Non classifié **DSTI/DOT/RTR/IR6(98)1/FINAL**

Organisation de Coopération et de Développement Economiques
Organisation for Economic Co-operation and Development

OLIS : 13-Apr-1999
Dist. : 14-Apr-1999

Or. Ang.

DIRECTION DE LA SCIENCE, DE LA TECHNOLOGIE ET DE L'INDUSTRIE
PROGRAMME DE COOPERATION DANS LE DOMAINE DE LA RECHERCHE EN MATIERE DE TRANSPORTS ROUTIERS ET DE LIAISONS INTERMODALES

DSTI/DOT/RTR/IR6(98)1/FINAL
Non classifié

Groupe d'experts scientifiques IR6 sur l'expérimentation de l'interaction entre véhicules et infrastructure (projet DIVINE)

INTERACTION DYNAMIQUE ENTRE VEHICULES ET INFRASTRUCTURE (PROJET DIVINE)

76558

Document complet disponible sur OLIS dans son format d'origine
Complete document available on OLIS in its original format

Or. Ang.

AVANT-PROPOS

Le programme de recherche en matière de transports routiers et liaisons intermodales (RTR) est une approche de coopération parmi les pays Membres visant à traiter des questions techniques, économiques et politiques associées à un transport routier sûr et efficace. Le Programme, par le biais de ses liens plus larges vers les autres modes, est le reflet d'une approche multimodale aux problèmes communs de transport et représente un effort combiné pour réduire l'impact négatif du transport sur l'environnement. Le Programme comprend deux principaux domaines d'activités :

- L'évaluation au niveau international des recherches et des politiques en matière de routes et de transports routiers pour fournir aux gouvernements des pays Membres et aux organisations internationales gouvernementales un support scientifique à la prise de décision.

- Le transfert de technologie et l'échange d'informations grâce à deux bases de données : le système de la Documentation Internationale de Recherche Routière (DIRR) et la Base de Données Internationale sur la Circulation et les Accidents de la Route (BICAR).

Sa mission est de :

- Développer une recherche innovante grâce à la coopération et la mise en réseau au niveau international.

- Entreprendre des analyses politiques conjointes et préparer des études technologiques sur des problèmes cruciaux du secteur du transport routier.

- Promouvoir les échanges d'informations scientifiques et techniques dans le secteur du transport et contribuer au transfert de la technologie routière dans les pays Membres de l'OCDE et les pays non-membres.

- Promouvoir le développement de politiques rationnelles pour parvenir à un secteur du transport sûr et efficace qui soit respectueux de l'environnement.

Les activités scientifiques et techniques concernent :

- Les stratégies de transport multimodal durable.

- La performance économique, l'infrastructure et la gestion des transports.

- La sécurité des transports et leur impact sur l'environnement.

RESUME ANALYTIQUE

N° DIRR 899920

Le Projet DIVINE - expérimentation de l'interaction dynamique entre véhicule et infrastructure - fournit les preuves scientifiques des effets dynamiques des véhicules lourds et de leurs systèmes de suspension sur les chaussées et les ponts, en vue d'aider les décisions en matière de politique de transport ayant une incidence sur les coûts de l'infrastructure et du transport routier de marchandises. Ce projet fait suite aux travaux d'un groupe d'experts scientifiques menés en 1992, qui recommandait de conduire une recherche internationale en coopération pour déterminer l'impact réel de la dynamique des véhicules sur la durée de vie des chaussées et leurs coûts, et fournir des méthodes d'évaluation des véhicules. Afin d'étudier tous les aspects de l'interaction véhicule-infrastructure, six Eléments de Recherche distincts ont été développés dans le cadre du projet DIVINE. Globalement, 17 pays et la Commission Européenne ont contribué au projet de recherche. Les implications politiques des résultats de la recherche sont présentées et discutées dans un rapport séparé. Les conclusions de ce rapport technique soulignent que la détérioration de la chaussée sous suspensions mécaniques est plus rapide de 15% que sous suspensions pneumatiques, et que la concentration du chargement dynamique pour les suspensions pneumatiques est deux fois moins importante que pour les suspensions mécaniques. Le rapport montre que les simulateurs peuvent reproduire les charges dynamiques des roues sur la route. Les propriétés essentielles des suspensions peu agressives pour les routes se caractérisent par un ressort de faible rigidité, un faible frottement de Coulomb et un niveau approprié d'amortissement visqueux. On retrouve ces propriétés dans les suspensions pneumatiques bien conçues et bien entretenues et il est peu probable que les suspensions mécaniques à ressort parviennent à un tel niveau de performance. Le rapport montre également que le profil en long de la couche de roulement du pont et de ses approches a un impact très important sur la réponse des suspensions des camions et donc sur la réponse dynamique du pont. Dans le cas d'une surface présentant un bon uni, l'influence du type de suspension des camions est négligeable, alors que son importance augmente avec la dégradation de l'uni.

Champ : Dimensionnement des chaussées ; Conception des ponts et murs de soutènement ; Construction des ponts et murs de soutènement .

Codes : 22 ; 24 ; 53.

Mots-clés : Calcul des chaussées ; calculateur numérique ; charge d'essieu ; chaussée (corps de) ; déformation ; dommage matériel ; dynamique ; méthode d'essai ; OCDE ; poids lourd ; pont ; simulation ; suspension (veh) ; usure.

TABLE DES MATIÈRES

NOTE DE SYNTHESE 8

CHAPITRE I – INTRODUCTION 15

I.1. Objectif du Projet 15
I.2. Interaction entre véhicules de marchandises et infrastructure : facteurs socio-économiques 16
I.3. Organisation et gestion du Projet DIVINE 16
I.3.1. Approche scientifique mise au point par l'OCDE 16
I.3.2. Structure organisationnelle du Projet 17
I.3.3. Financement du Projet DIVINE 20
I.3.4. Procédures suivies pour l'analyse critique 20
I.4. Brève description du Projet DIVINE 20
I.4.1. Objectifs du projet 20
I.4.2. Buts de la recherche 22
I.5. Présentation des résultats 23
I.5.1. Résultats pratiques pouvant être mis en application 24
I.5.2. Résultats visant à améliorer la connaissance scientifique 24
I.5.3. Structure du rapport technique final 24
I.6. Portée du Projet DIVINE 25

BIBLIOGRAPHIE 27

CHAPITRE II — LES ORIGINES DU PROJET DIVINE 28

II.1. Questions économiques et réglementaires 28
II.1.1. Contexte 28
II.1.2. Réduire les coûts routiers 29
II.1.3. Réduire les coûts pour l'usager 30
II.1.4. Législation en faveur des véhicules peu agressifs 32
II.1.5. Enquête sur les problèmes techniques clés dans les décisions politiques 33
II.2. Bases scientifiques du projet DIVINE 35
II.2.1. Contexte 35
II.2.2. Chargement dynamique des chaussées et des ponts 35
II.2.3. Procédures de dimensionnement structurel des chaussées 43
II.2.4. Coût du cycle de vie 45
II.2.5. Influence de la non-uniformité de la chaussée – méthodes d'analyse 46

BIBLIOGRAPHIE 48

CHAPITRE III – LE SYSTEME VEHICULE-INFRASTRUCTURE : UNE NOUVELLE APPROCHE. 50

III.1. Introduction 50
III.2. Composantes du système 51
III.2.1. Chaussées 51
III.2.2. Ponts 52
III.2.3. Véhicules 52
III.3. Principales caractéristiques du système 54
III.3.1. Profil en long de la chaussée 54
III.3.2. Forces dynamiques appliquées par la roue 54
III.3.3. Accélération du véhicule 55
III.3.4. Déformations/déflexions des chaussées et des ponts 55
III.3.5. Module de la chaussée et rigidité des ponts 55
III.3.6. Dégradation de la chaussée 56
III.3.7. Fréquence propre d'un pont et amortissement associé 56
III.4. Modèles conceptuels 56
III.4.1. Interaction véhicule-chaussée 57
III.4.2. Interaction véhicule-pont 57
III.5. Le Projet DIVINE et ses Eléments de recherche 60
III.5.1. Elément 1 : essai dynamique accéléré sur chaussée 60
III.5.2. Elément 2 : essai de réponse initiale de la chaussée 60
III.5.3. Elément 3 : essais avec le simulateur routier 61
III.5.4. Elément 4 : simulation informatique de la dynamique des véhicules lourds 61
III.5.5. Elément 5 : répétabilité spatiale des chargements dynamiques 62
III.5.6. Elément 6 : chargement dynamique des ponts 62
III.5.7. Résumé du Projet DIVINE 63

BIBLIOGRAPHIE 65

CHAPITRE IV – PERFORMANCE DU SYSTEME VEHICULE-INFRASTRUCTURE : RESULTATS DU PROJET DIVINE 67

IV.1. Réponse de l'infrastructure aux sollicitations des véhicules 68
IV.1.1. Réponse initiale de la chaussée et chargement dynamique - Détails de la recherche consacrée à l'Elément 2 69
IV.1.2. Chargement dynamique de la chaussée et répétabilité spatiale -- Détails de la recherche consacrée à l'Elément 5 75
IV.1.3. Réponses des ponts -- détails de la recherche consacrée à l'Elément 6 84
IV.2. Effets des suspensions des véhicules sur les performances et les dégradations des chaussées 89
IV.2.1. Détails des conditions de l'essai 89
IV.2.2. Comparaison résumée des effets des deux types de suspension 90
IV.2.3. Implications pour l'effet des suspensions sur les chaussées 93
V.3. Evaluation de la "moindre agressivité" des véhicules vis-à-vis de la chaussée 99
IV.3.1. L'essai de lâcher de la Communauté Européenne (CE) 100
IV.3.2. Essais sur les véhicules 101
IV.3.3. Evaluation des modèles informatiques 112
IV.3.4. Propriétés des suspensions peu agressives 117
IV.3.5. Evaluation de la performance des suspensions 120

BIBLIOGRAPHIE 122

CHAPITRE V – AMELIORER LE SYSTEME VEHICULE-INFRASTRUCTURE : LES VOIES OUVERTES PAR LA RECHERCHE DIVINE 124

V.1. Les chaussées 124
V.1.1. Réponse de la chaussée aux sollicitations des véhicules 125
V.1.2. Dimensionnement et performance des chaussées 127
V.1.3. Concepts de durée de vie et de performance des chaussées 130
V.2. Les ponts 131
V.2.1. Réponse des ponts aux charges dynamiques de roue 131
V.2.2. Résumé 133
V.3. Les véhicules 134
V.3.1. Caractéristiques des suspensions pneumatiques et acier actuelles 135
V.3.2. Exigences relatives à la performance des suspensions 136
V.3.3. Évaluation de la moindre agressivité des véhicules vis-à-vis de la route 136
V.3.4. Simulateurs de routes 137
V.3.5. Modèles informatiques de simulation 137
V.3.6. Performance dans des conditions extrêmes de défauts d'uni 137
V.3.7. Mise en oeuvre des spécifications de performance pour les suspensions 137
V.4. Les besoins de recherche 138
V.4.1. Dans quelles mesures le Projet DIVINE a-t-il répondu aux objectifs fixés ? 138
V.4.2. Quel est le type de recherche nécessaire pour améliorer la relation entre véhicules lourds et infrastructure ? 140
V.4.3. Comment une meilleure connaissance des interactions physiques peut-elle conduire à une modélisation pratique des coûts pour les administrations et les usagers de la route ? 142
V.5. Conclusions résumées 143

ANNEXE A TERMINOLOGIE ET BREVE DESCRIPTION DU DIMENSIONNEMENT DES CHAUSSEES, DE L'ANALYSE DE L'ETAT DES CHAUSSEES ET DE LA CONCEPTION DES PONTS 145

A.1. Terminologie 145
A.1.1. Réponse initiale de la chaussée 145
A.1.2. Endommagement ou dommage 145
A.1.3. Dégradations 145
A.1.4. Détérioration de la chaussée 145
A.2. Développement des procédures de dimensionnement structurel des chaussées 146
A.2.1. Dimensionnement empirique 146
A.2.2. Essai routier AASHO 146
A.2.3. Dimensionnement mécaniste 147
A.2.4. Essais accélérés de chaussée 148
A.3. Développement des procédures d'analyse de l'état de la chaussée 150
A.4. Développement des méthodes de dimensionnement des ponts tenant compte du chargement dynamique 152

BIBLIOGRAPHIE 153

ANNEXE B INSTALLATIONS ET EQUIPEMENT UTILISES 155

B.1. Installation sous abri d'essai accéléré de chaussée de Canterbury (CAPTIF – Canterbury Accelerated Pavement Testing Indoor Facility) 155
B.2. Routes d'essai du Projet DIVINE 156
B.2.1. Site d'essai de Virttaa (Finlande) 156

B.2.2. Route d'essai de l'Administration fédérale des routes des Etats-Unis (FHWA) 157
B.2.3. Section test sur la RN10 à Trappes (France) 157
B.3. Ponts utilisés pour les essais de l'Elément 6 159
B.4. Véhicules utilisés pour les Eléments 2, 3, 5 et 6 160
B.4.1. Véhicule du Conseil National de Recherche du Canada (NRC – National Research Council) 160
B.4.2. Véhicule du Laboratoire de recherche sur les transports du Royaume-Uni (Transport Research Laboratory – TRL) 161
B.4.3. Remorque de Hanovre (Allemagne) 162
B.4.4. Véhicules d'essai de l'Australie 163
B.5. Le laser RST portable 164

ANNEXE C GLOSSAIRE DES ABREVIATIONS 165

ANNEXE D LISTE DES PARTICIPANTS 167

NOTE DE SYNTHESE

Le système routier constitue un patrimoine national considérable, représentant environ une demie à trois fois le Produit National Brut des pays de l'OCDE. Il contribue à faciliter le commerce, les communications, la croissance économique et le développement social. Toutefois, dans de nombreux pays, une part importante de l'infrastructure routière est soit vétuste, ou a atteint la fin de sa durée de vie économique. Dans le même temps, les financements pour la construction et l'entretien de l'infrastructure ont été réduits en raison des besoins croissants dans la plupart de ces pays. Ces facteurs, ainsi que la rapidité de la croissance de la demande du transport de marchandises, nécessitent des réponses scientifiques et techniques afin de réduire les coûts d'entretien liés à la circulation des véhicules lourds sur les chaussées et les ponts, et de développer des pratiques de conception meilleures et plus intégrées pour les véhicules, les chaussées et les ouvrages d'art. Le projet DIVINE (Dynamic Interaction between Vehicle and Infrastructure Experiment) a été initié afin de décrire, de manière objective, les importants aspects de l'interaction entre les véhicules lourds et l'infrastructure routière, et de proposer des moyens pour que les facteurs responsables des éléments de principe de cette interaction - c'est-à-dire, les chaussées, les ouvrages d'art, les véhicules, les politiques et réglementations en matière de transport - puissent agir de manière à réduire les conséquences négatives du transport routier de marchandises ainsi que les coûts globaux d'infrastructure et les coûts pour l'usager. Les résultats du projet sont présentés dans ce rapport de recherche technique ainsi que dans un rapport séparé sur les implications politiques du Projet DIVINE.

Une nouvelle relation de travail nécessite une nouvelle approche

Les véhicules routiers de marchandises sont exploités dans un environnement extrêmement concurrentiel et fortement réglementé. Ils constituent les éléments essentiels des systèmes globaux en croissance de transport de marchandises soutenant les services de logistique intégrée. En outre, les paramètres d'exploitation de plus en plus stricts des véhicules lourds ont entraîné de rapides progrès technologiques dans la conception et l'exploitation de ces véhicules. Toutefois, on ne réalise pas toujours que les coûts totaux d'exploitation des véhicules lourds, qui sont souvent répartis entre plusieurs entreprises privées, sont bien plus importants que les coûts d'entretien routier. Les coûts d'exploitation des véhicules sont fortement influencés par l'état des routes, les conditions de circulation et, indirectement, par les réglementations imposées par les services routiers. La grande variété de disciplines technologiques en matière de véhicule et d'infrastructure, couplée à des disparités dans les responsabilités entre le secteur public et privé, a abouti à une situation dans laquelle l'infrastructure et les véhicules lourds qui utilisent l'infrastructure ne sont jamais considérés comme un système à part entière. En fait, leur relation a souvent eu une connotation négative, en raison principalement des dégradations des chaussées, des problèmes de sécurité et de congestion et des préoccupations environnementales associés aux véhicules lourds.

La situation est complexe car la demande de transport de marchandises augmente à la fois en termes de masse et de volume. Cette tendance, associée à la nécessité de mieux répondre aux exigences spécifiques des clients, nécessite de disposer de camions plus grands et plus lourds et de configurations très diverses. La simple logique consistant à recourir à des chargements de marchandises plus concentrés, se traduisant par moins de déplacements des véhicules de marchandises et par une moindre exposition des

camions sur le système routier, signifie qu'il faudra trouver des solutions pour le transport qui remettent en question les limites légales actuelles de poids et dimensions des véhicules et les méthodes d'application de ces limites.

Ce n'est que dans les années 1950 — avec l'essai routier AASHO (*American Association of State Highway Officials*) — qu'on a commencé à disposer d'informations techniques solides concernant les effets des charges à l'essieu sur la performance des chaussées. On a maintenant besoin d'un plus haut niveau de connaissances scientifiques sur l'interaction entre les véhicules lourds et les chaussées, et entre les véhicules lourds et les ponts, afin d'introduire des réglementations fondées sur la performance des véhicules en termes de moindre agressivité vis-à-vis de la route. Un véhicule peu agressif est celui dont l'exploitation sur un système routier nécessite un entretien routier moins important pour un niveau de charge à l'essieu donné.

L'essai AASHO a introduit le concept de niveau de service de la chaussée et une attention croissante a été accordée au suivi de l'état fonctionnel des chaussées et des ponts pour le bien-être de tous les usagers de la route. Malgré le développement de ce concept, les utilisateurs de véhicules lourds n'ont, jusqu'à récemment, pas suscité une attention directe suffisante, en particulier si l'on reconnaît que l'uniformité de la structure de la chaussée et l'uni de son revêtement sont nécessaires afin que la route soit convenable pour les véhicules. A cet égard, les techniques avancées de gestion des routes de demain devront reconnaître l'importance de l'effet global de l'interaction véhicule-chaussée en termes de coûts à la fois pour les services des routes et les utilisateurs des véhicules de marchandises. Ces techniques encourageront l'utilisation de véhicules peu agressifs transportant des charges élevées sur des infrastructures de grande qualité, plutôt que des limites portant sur le poids à l'essieu et qui ne tiennent pas compte des qualités du véhicule ou de l'infrastructure.

Au cours des 30 dernières années, le Programme de recherche en matière de transports routiers et de liaisons intermodales de l'OCDE, RTR, (anciennement Programme de recherche en matière de routes et de transports routiers) a coordonné une vingtaine d'études sur l'interaction entre l'infrastructure et les véhicules de marchandises. Le projet DIVINE s'appuie sur toutes ces précédentes études et représente une étape importante dans le développement de la connaissance scientifique et technologique, et de la gestion du système véhicule-infrastructure. Le projet DIVINE a adopté une nouvelle approche consistant à examiner l'effet de l'utilisation combinée d'une meilleure technologie pour les véhicules lourds et de meilleures techniques de construction routière et de gestion de l'entretien des chaussées, en vue de réduire potentiellement les coûts routiers associés à l'utilisation des véhicules lourds. Parallèlement, le projet a également recherché à réduire les coûts de construction des ponts grâce à une meilleure connaissance des charges admissibles de circulation. Une des questions techniques essentielles traitées par le Projet DIVINE est, par conséquent, de savoir si les technologies visant à rendre les véhicules peu agressifs pour les chaussées sont également favorables pour les ponts.

Résultats scientifiques du Projet DIVINE

Le projet DIVINE est un programme de recherche international en coopération qui a impliqué des services routiers, des organisations de recherche dans le domaine des routes et des ponts, et le secteur privé de 17 pays Membres de l'OCDE. Les éléments principaux de la recherche ont été conduits dans neuf pays. Le projet était supervisé par le Comité de Direction du Programme RTR avec l'aide d'un Comité Exécutif restreint pour le projet DIVINE, responsable de la performance et de la coordination globale du Projet ainsi que des questions financières et autres. Un Groupe d'Experts Scientifiques – composé de spécialistes dans les domaines des véhicules, des chaussées, des ouvrages d'art, de la gestion des chaussées et des politiques de transport – a géré le Projet et a constitué le point focal pour l'échange de

vues, l'analyse des résultats, la planification et l'exécution des travaux de recherche et la communication des résultats. Les résultats scientifiques du Projet DIVINE ont été soumis à examen par des pairs extérieurs et indépendants. Les sections suivantes présentent une synthèse des principaux aboutissements scientifiques du Projet DIVINE.

Les charges dynamiques ont un impact sur les chaussées

Pour des chaussées relativement épaisses (160 mm de matériaux bitumineux), les déformations horizontales mesurées à la base de la couche bitumineuse sont presque directement proportionnelles à la force d'impact dynamique de la roue. Par exemple, une augmentation de 10% de la charge dynamique de roue provoque une augmentation de 7 à 12% de la déformation. Compte tenu de la relation reconnue entre déformation et endommagement du matériau constitutif de la chaussée, ceci implique une dégradation sensiblement plus importante sous un trafic qui applique régulièrement de telles charges. Dans le cas des chaussées minces, l'amplitude des déformations horizontales est plus grande que pour les chaussées épaisses, mais les déformations sont moins sensibles à la force d'impact dynamique de la roue et semblent être influencées par les conditions de contact à la surface entre le pneu et la chaussée.

Le chargement dynamique des chaussées présente une certaine répétabilité

Sous un trafic composé de différents types de véhicules, les surcharges dynamiques ont tendance à se concentrer en des points particuliers de la route à des intervalles de 8 à 10 mètres. Sur une route dont l'uni est bon, la somme cumulée des charges d'essieu aux points de concentration est d'environ 10% supérieure à ce qu'elle est en moyenne. Sur une route dont l'uni est mauvais, cet effet est au moins deux fois plus important. Pour les suspensions pneumatiques, la concentration des charges dynamiques est à peu près deux fois moins importante que pour les suspensions à ressorts en acier. Ce phénomène dépend étroitement du profil de la route, de la combinaison des types de suspension utilisés par les véhicules dans le flux du trafic, de la configuration des roues et de la gamme des vitesses de ces véhicules. Dans les cas où la composition du flux de trafic de poids lourds a tendance à être limitée à quelques types seulement, le risque de dégradation de la chaussée due à la répétabilité spatiale est donc plus élevé. De tels cas deviennent de plus en plus fréquents, en particulier du fait que les véhicules de marchandises tendent à avoir une géométrie fonctionnelle plus homogène.

Le chargement dynamique dépend du type de suspension

Le Projet DIVINE a confirmé que la force dynamique de la roue dépend du type de suspension, du profil de la chaussée et de la vitesse du véhicule. Sur des routes dont l'uni est relativement bon, par exemple, les suspensions acier ont des facteurs d'impact de 1.3 et les suspensions pneumatiques des facteurs d'impact de 1.1-1.15 pour les groupes d'essieux des semi-remorques alors que, dans le cas de camions rigides ou de tracteurs à essieux simples, la différence est presque négligeable. Cependant, sur les routes dont l'uni est mauvais, les suspensions acier ont des facteurs d'impact de 1.4-1.5 et les suspensions pneumatiques de 1.2 pour ces groupes d'essieux. Ces résultats impliquent qu'en "contrôlant" le profil longitudinal, il est possible de minimiser le chargement dynamique dû aux véhicules lourds.

Certaines formes de dégradation de la chaussée sont atténuées avec les suspensions pneumatiques

L'essai accéléré de chargement dynamique de chaussée du Projet DIVINE a montré que le profil de la chaussée se détériore plus rapidement sous une suspension acier que sous une suspension pneumatique supportant la même charge. Certains aspects de la fissuration ainsi que la profondeur d'ornière maximum sont également plus importantes sous la suspension acier. Le rythme de dégradation de la chaussée sous la suspension acier a été plus rapide, d'au moins 15%, que sous la suspension pneumatique. Dans cet essai accéléré, les modifications du profil de la chaussée à long terme sous la suspension acier sont en corrélation à la fois avec la charge dynamique de roue et la résistance structurelle locale. D'autre part, une très faible modification du profil à long terme a été constatée sous la suspension pneumatique.

La dynamique des véhicules peut avoir un impact sur les ponts

L'essai sur les ponts du Projet DIVINE a montré que le profil en long de la surface d'un pont et de ses approches jouait un rôle essentiel dans la réponse des suspensions des camions et, en conséquence, dans la réponse dynamique du pont. Dans le cas d'un profil de bonne qualité, l'influence de la suspension du camion est insignifiante, bien que l'influence de la suspension augmente au fur et à mesure de la dégradation de l'uni. Pour les ponts de moyenne et longue portée (20-70 mètres) dont l'uni est bon, les réponses dynamiques sont relativement faibles à la fois pour les véhicules équipés de suspensions pneumatiques ou de suspensions acier. Dans cette gamme, on a constaté une augmentation de la réponse pour les véhicules équipés de suspensions pneumatiques sur des ponts d'une fréquence de 1.6 Hz (70 mètres) et pour les véhicules équipés de suspensions acier sur des ponts d'une fréquence de 3.0 Hz (40 mètres). Dans le cas des ponts de faible portée (10 mètres) dont l'uni est mauvais, des réponses dynamiques importantes sont générées à la fois par les véhicules équipés de suspension pneumatique ou de suspension acier. Les réponses les plus élevées ont été mesurées pour les ponts de courte portée d'un amortissement moyen ou en dessous de la moyenne, au passage de véhicules équipés de suspensions pneumatiques dont les vibrations d'essieux sont excitées par des défauts d'uni de courte longueur d'onde.

Les suspensions pneumatiques peuvent être peu agressives

Les résultats du Projet DIVINE ont montré que, pour réduire la réponse de la chaussée aux véhicules lourds, il était nécessaire de contrôler le chargement dynamique, à la fois dans les modes de basses fréquences de la partie suspendue du véhicule, et dans les modes de hautes fréquences de l'essieu. En ce qui concerne le contrôle de la dégradation de la chaussée, les résultats du Projet DIVINE ont montré que la plupart des modifications du profil étaient liées aux modes de basses fréquences, et seules quelques indications ont montré que les modes de hautes fréquences entraînaient des modifications du profil. De même, le Projet DIVINE a démontré que l'orniérage était lié aux modes de basses fréquences, mais il est plus difficile de tirer des conclusions sur l'influence spécifique du chargement dynamique sur la fissuration. Dans les modes importants de basses fréquences, les suspensions pneumatiques ont en général des fréquences naturelles plus basses et peuvent présenter un amortissement plus élevé que les suspensions mécaniques à ressorts en acier. Ces caractéristiques se traduisent par un chargement dynamique moindre, dans le cas de suspensions pneumatiques, à la condition que les amortisseurs soient correctement entretenus. Les suspensions pneumatiques n'ont pas nécessairement une meilleure performance que les suspensions mécaniques dans les modes de hautes fréquences de vibration des essieux et, ici encore, requièrent un amortissement approprié.

En ce qui concerne les ponts, le projet DIVINE a montré que, dans certains cas, il était nécessaire de contrôler les modes de hautes fréquences des essieux relativement aux réponses des ponts de faible portée. Les suspensions pneumatiques et mécaniques peuvent, de même, rentrer en résonance avec les vibrations des ponts dans les bandes spécifiques du spectre des fréquences des ponts, de l'amortissement, et de l'état du profil et de la vitesse du véhicule. Dans des conditions spécifiques, les suspensions pneumatiques peuvent produire d'importantes réponses à hautes fréquences pour les ponts de faible portée.

Il est nécessaire de tester la moindre agressivité des suspensions vis-à-vis de la route

Le Projet DIVINE a permis de confirmer les propriétés essentielles des suspensions peu agressives. Elles se caractérisent par une faible rigidité du ressort, un faible coefficient de frottement de Coulomb, et un niveau d'amortissement visqueux suffisant. On retrouve en général ces propriétés pour les suspensions pneumatiques bien conçues et bien entretenues et il est peu probable que des suspensions mécaniques à ressort puissent atteindre un tel niveau de performance. En outre, le Projet DIVINE a montré que pour les suspensions de groupes d'essieux – c'est-à-dire les configurations faisant appel à des essieux tandem et tridem – il était important de contrôler la performance des suspensions en termes de répartition de la charge entre les essieux.

On a trouvé que la directive actuelle de la Commission Européenne (CE), imposant une fréquence maximum de 2 Hz et un amortissement minimum de 20%, permettait généralement de différencier les suspensions pneumatiques des suspensions acier, mais qu'elle était moins bien adaptée à son but initial d'établir une performance équivalente à une suspension pneumatique. En outre, le chargement dynamique produit par les suspensions est sensible à la fois à la fréquence et à l'amortissement des suspensions, tels que mesurés à l'aide de l'essai de lâcher de la CE. On a également trouvé que la fréquence et l'amortissement des suspensions pneumatiques et mécaniques n'étaient pas des paramètres indépendants et que, pour des raisons pratiques, il était difficile de concevoir des suspensions pneumatiques ou mécaniques ayant un bon amortissement et une fréquence supérieure à 2 Hz.

La sensibilité du chargement dynamique à l'amortissement de la suspension est la suivante : il y a une très faible augmentation du chargement dynamique si l'amortissement passe de 20 à 15%, une augmentation légèrement plus forte si l'amortissement est de 10%, puis une forte augmentation si l'amortissement descend en dessous de 10%. Ceci est particulièrement vrai dans le cas où la fréquence de la suspension est limitée à 1.5 Hz. Le Projet DIVINE a également montré qu'il y avait peu d'avantages, pour obtenir une réduction du chargement dynamique de la chaussée, à réduire la fréquence de la suspension en dessous de 1.5 Hz ou à augmenter l'amortissement au-delà de 20%. Toutefois, un amortissement supérieur à 20% pourrait présenter des avantages pour améliorer la sécurité des véhicules lourds et pour réduire les vibrations d'essieu sur des routes présentant de sérieux défauts d'uni.

Le projet DIVINE propose une méthode d'essai des suspensions qui pourrait se révéler plus précise et plus cohérente que l'essai de lâcher de la CE. Toutefois, sur la base des expériences menées, le Projet recommande de définir une suspension peu agressive à l'aide du test de lâcher de la CE et des critères suivants :

- Une fréquence inférieure ou égale à 1.5 Hz, et

- Un amortissement supérieur ou égal à 20%.

De nouvelles réflexions sur les techniques routières

Le Projet DIVINE a montré que la réponse de la chaussée au chargement dynamique du véhicule était suffisamment élevée pour justifier de nouvelles réflexions spécifiques sur les méthodes de dimensionnement des chaussées. Mais ces réflexions peuvent être différentes en fonction de l'épaisseur de la chaussée considérée. Dans ce contexte, de plus amples recherches sur les réponses des chaussées minces ainsi que sur les effets de l'interface pneu-chaussée sont nécessaires. La variabilité structurelle des chaussées doit, également, être examinée dans les normes pour les nouvelles constructions et pour les mesures du niveau de service des chaussées.

Les résultats du Projet DIVINE montrent qu'il est nécessaire d'assurer un suivi et une maîtrise des profils en long afin de réduire l'intensité du chargement dynamique. L'indice de qualité d'uni IRI (International Roughness Index) pourrait apporter une aide, mais il serait nécessaire de disposer de meilleurs algorithmes et d'indices mieux adaptés. Il est également nécessaire d'assurer le suivi et la maîtrise des profils en long afin de déterminer leurs effets sur la répétabilité spatiale, et de soutenir la mise au point d'un algorithme qui permettrait de définir des profils limitant la répétabilité.

L'intention du Projet DIVINE n'a jamais été de valider les modèles de performance des chaussées ou de développer de nouveaux modèles. Toutefois, le Projet DIVINE a montré que la portance des chaussées et la force d'impact dynamique interagissaient. Ces résultats semblent prouver qu'il est essentiel à l'avenir d'inclure la variabilité structurelle et le chargement dynamique de la chaussée dans les modèles de performance.

De nouveaux enseignements sur les réponses des ponts

Le Projet DIVINE a montré que la réponse dynamique des ponts ne pouvait être comprise que si elle était considérée comme une partie du système qui comprend le pont, le profil de la route, la masse du véhicule, sa configuration, sa vitesse ainsi que sa suspension. La nécessité de comprendre ce système complexe devient de plus en plus forte à une époque où l'infrastructure en matière de ponts est vieillissante et se détériore, et où elle doit supporter des charges de plus en plus élevées du fait que l'industrie et les gouvernements recherchent une augmentation de l'efficacité des transports. Le Projet DIVINE a permis de recueillir certaines données uniques qui proposent des moyens pour fournir des lignes directrices plus performantes aux intervenants dans les divers aspects de l'industrie des ponts — conception, entretien, évaluation et gestion. De même, le Projet DIVINE avance des suggestions pour favoriser le développement de systèmes de suspension qui soient moins agressifs pour les ponts.

L'affectation des coûts routiers est une question interactive

Les résultats du Projet DIVINE n'apportent pas d'information directe sur l'affectation des coûts routiers, mais ils indiquent que le dimensionnement actuel des chaussées et les procédures d'évaluation stratégique pourraient surestimer l'effet des charges de roues par rapport aux effets liés à la variabilité de la structure de chaussée à sa construction. Etant donné l'importance du recouvrement des coûts dans le financement des routes et la part importante des coûts routiers affectée au poids du camion et à son trajet, une recherche étendue est nécessaire pour mieux comprendre les contributions relatives du poids du camion, de la moindre agressivité du véhicule, de l'état initial et actuel de la route, et des effets de son environnement sur la dégradation de la route. Les résultats du Projet DIVINE devraient être d'une aide précieuse pour les pays Membres de l'OCDE pour concevoir des programmes de recherche efficaces.

Conclusion

Le Projet DIVINE a constitué une nouvelle approche en termes de financement, de conduite et de diffusion des résultats d'une recherche internationale dans le secteur routier. Il a permis d'arriver à des progrès importants dans la compréhension scientifique de l'interaction entre les véhicules d'une part et les chaussées et les ponts d'autre part, et de clairement définir un nouveau concept de suspensions peu agressives des véhicules routiers. Les résultats scientifiques et techniques présentés dans ce rapport devraient contribuer à améliorer la conception, la construction, l'entretien et les pratiques de gestion des ponts, des chaussées et des véhicules. Ces résultats ont par conséquent des implications énormes pour les planificateurs, les ingénieurs, les chercheurs et toute une partie du secteur privé impliquée dans le secteur du transport routier. En outre, les implications politiques du Projet DIVINE – présentées dans un rapport séparé – vont très loin dans leur portée économique potentielle car elles plaident en faveur d'une nouvelle manière de considérer les différentes restrictions imposées à l'exploitation des véhicules lourds dans les pays Membres de l'OCDE. De ce point de vue, le Projet DIVINE a démontré qu'il constituait un effort d'innovation pouvant introduire une ère nouvelle dans le secteur du transport routier.

CHAPITRE I – INTRODUCTION

I.1. Objectif du Projet

Le Projet DIVINE — Acronyme de "*Dynamic Interaction between Vehicle and Infrastructure Experiment*" (essai sur l'interaction dynamique véhicule-infrastructure) — est fondé sur un programme scientifique d'études, analyses et essais, menés, coordonnés et interprétés par un Groupe d'experts scientifiques de l'OCDE en collaboration avec des instituts et compagnies privés des pays Membres participants.

Le Projet s'appuie sur les travaux menés antérieurement par plusieurs Groupes d'experts qui ont examiné les différents aspects liés à la planification, la construction, la préservation des infrastructures et leur réglementation. Un Groupe d'experts scientifiques sur le Chargement dynamique des chaussées (OCDE, Recherche en matière de Routes et de Transports Routiers, 1992) a, notamment, identifié de nouvelles voies offertes pour mieux comprendre l'interaction des véhicules lourds avec les chaussées et les ponts, ainsi que les avantages liés à la technologie des systèmes de suspension "peu agressifs" pour la route.

L'objectif principal du Projet DIVINE est d'apporter des preuves scientifiques des effets dynamiques des véhicules lourds et de leur système de suspension sur les chaussées et les ponts afin d'aider à élaborer des décisions en matière de politique des transports ayant une incidence sur les coûts de l'infrastructure et du transport routier de marchandises. Il vise également à indiquer les voies les plus prometteuses afin d'améliorer l'interaction des véhicules lourds avec les routes et les ponts. Les travaux de recherche ont été planifiés de telle sorte que les résultats obtenus par le Groupe soient significatifs pour l'ensemble des pays Membres, même si les conditions propres à l'infrastructure et aux véhicules diffèrent d'un pays à l'autre et entre régions. Les récents progrès technologiques en matière de conception du véhicule et au niveau de la gestion de l'infrastructure ont été pris en compte dans le plan de recherche et six lignes de recherche spécifiques (dénommées Eléments de Recherche) ont été définies. Une attention particulière a également été accordée à la nécessité de renforcer la sécurité des véhicules lourds et d'atténuer leurs effets sur l'environnement.

Le rapport présente les résultats de ces travaux et leurs implications techniques. Il est complété par une série de rapports de recherche publiés par les instituts participants. Il est admis que, en raison des différences marquantes entre disciplines et techniques impliquées et en raison des disparités entre les responsabilités des secteurs public et privé pour les deux "partenaires du système" concernés, l'infrastructure et les véhicules lourds qui l'empruntent n'ont jamais été considérés comme un système de transport à part entière. En fait, leurs relations ont souvent eu une connotation négative, reflétant essentiellement l'impact des véhicules lourds sur la détérioration des routes, la sécurité, la congestion et l'environnement. Des tentatives sont faites dans ce rapport pour décrire, d'une manière objective, les aspects importants de l'interaction des véhicules lourds et de l'infrastructure et pour suggérer des solutions grâce auxquelles les responsables des chaussées, des ponts, des véhicules, des politiques et

réglementations en matière de transports, et de la recherche pourraient agir afin d'atténuer les conséquences négatives du transport routier de marchandises, réduire les coûts et améliorer l'efficacité.

I.2. Interaction entre véhicules de marchandises et infrastructure : facteurs socio-économiques

Les fonds disponibles pour la construction et l'entretien de l'infrastructure routière diminuent par rapport aux besoins financiers croissants pour l'étendue des réseaux routiers mondiaux. Dans le même temps, l'expansion rapide des services de transport de marchandises impose des demandes importantes et croissantes sur cette même infrastructure. Ces pressions sur l'infrastructure persisteront même si les autres modes de transport et les opportunités offertes par le transport intermodal sont pleinement exploités.

Les nations adoptent, à l'heure actuelle, des politiques de mobilité durable. La congestion du trafic, y compris la contribution des camions, les effets des émissions et du bruit du trafic routier sur l'environnement et les effets des véhicules lourds sur la sécurité routière constituent une préoccupation croissante. Si le soutien technologique des "systèmes de transport intelligents (STI)" est considéré comme un des agents potentiels d'atténuation des pressions à long terme imposées aux systèmes de transport de marchandises, une croissance économique continue, le maintien de l'emploi et de la qualité de vie imposeront des réformes des aspects physiques et logistiques des systèmes du transport routier.

Les demandes visant à transporter plus de marchandises, à la fois en termes de masse et de volume, et à répondre plus rapidement et mieux aux besoins des consommateurs, amèneront à envisager le recours à des camions plus lourds et plus grands et dont la diversité des configurations permettra une plus grande efficacité. Des améliorations majeures en matière de sécurité routière sont également requises, et le rôle des véhicules lourds dans les accidents de la route et la congestion fait l'objet d'un examen de plus en plus approfondi. La simple logique consistant à recourir à des chargements plus concentrés — que ce soit en volume ou en masse — se traduisant par moins de déplacements des véhicules de marchandises et par une moindre exposition des camions sur le système routier, amènera, de plus en plus, à proposer des solutions de transport qui nécessiteront des réponses fiables aux questions de l'interaction camions-routes.

Si les réglementations nationales et régionales en matière de poids et dimensions des véhicules lourds sont appliquées sous diverses formes depuis plus de 50 ans, ce n'est que dans les années 1950 — avec l'essai routier AASHO (Highway Research Board, 1962) —, que des informations techniques solides sur les effets des charges à l'essieu sur la performance des chaussées sont devenues disponibles. Depuis les années 1970, des recherches de plus en plus nombreuses ont été menées sur l'interaction camions-routes, y compris des essais accélérés de chaussée, des essais routiers en vraie grandeur à long terme. Ces recherches ont conduit à des progrès notables dans les techniques de mesure et de modélisation assistée par ordinateur. L'OCDE a joué un rôle moteur en stimulant et en coordonnant ces recherches. Au cours des 30 dernières années, l'OCDE a coordonné une vingtaine d'études sur l'interaction des véhicules lourds et de l'infrastructure. Le Projet DIVINE représente une étape importante dans la connaissance scientifique et technologique, et dans la gestion du système véhicule-infrastructure.

I.3. Organisation et gestion du Projet DIVINE

I.3.1. Approche scientifique mise au point par l'OCDE

Au cours de ces dernières années, un certain nombre de projets de recherche sur l'infrastructure, menés par le Programme de recherche en matière de transports routiers et de liaisons intermodales (RTR)

de l'OCDE (anciennement Programme de recherche en matière de routes et de transports routiers), ont traité des questions économiques et scientifiques relatives à l'effet des véhicules lourds sur l'infrastructure, y compris les exigences en matière de construction et d'entretien des chaussées. Le Projet DIVINE est axé sur une connaissance meilleure et plus globale des implications de l'exploitation des véhicules lourds de marchandises pour trois éléments clés qui interagissent : les chaussées, les ponts et les véhicules. Il a examiné le rôle potentiel des nouvelles technologies des systèmes de suspension pour atténuer les effets dommageables des véhicules lourds sur les chaussées et les ponts, et pour permettre une efficacité maximum du transport routier de marchandises.

Un élément clé du Projet DIVINE a été de quantifier les avantages potentiels liés à un recours plus important aux véhicules lourds équipés de systèmes de suspension dits "peu agressifs" pour la route. Dans le cadre de ce rapport, le terme "peu agressif" se réfère à un véhicule lourd de marchandises dont la conception minimise le chargement dynamique appliqué à la chaussée et aux ponts. Même s'il est admis que les caractéristiques des pneus peuvent avoir une incidence significative sur la détérioration[1] de la chaussée, elles n'ont pas nécessairement d'effets notables sur le chargement dynamique. En conséquence, un accent particulier est mis sur les caractéristiques de conception des types de suspension.

I.3.2. Structure organisationnelle du Projet

Le Projet DIVINE est un programme international de recherche en coopération dont le plan de recherche a été clairement défini, et dont la structure de gestion et le budget sont administrés par l'OCDE. Les administrations nationales des routes, les organismes de recherche des ponts et chaussées et le secteur privé de 17 pays Membres de l'OCDE y ont activement participé. Les principaux Eléments de la Recherche ont été menés dans neuf pays.

Le Projet a été supervisé par le Comité de Direction RTR, la plus haute instance du Programme RTR. Il a été aidé dans sa tâche par un Comité Exécutif restreint, responsable du déroulement global et de la coordination du Projet, ainsi que des questions financières et autres. Le Comité Exécutif a également examiné les problèmes stratégiques soulevés par le Projet et a prévu la mise en oeuvre de ses résultats. Un Groupe d'experts scientifiques a conduit le projet au niveau scientifique et a servi de forum pour échanger les points de vue, effectuer l'analyse des résultats, planifier et exécuter les travaux de recherche et en faire rapport. Pour assurer une coordination appropriée entre les différents Eléments de Recherche du Projet, un Directeur de Programme a été nommé. La préparation de rapports sur les travaux menés par le Groupe d'experts scientifiques dans le cadre de chaque Elément de Recherche a constitué un élément clé de la direction du Projet (voir figure I.1.).

Le programme de recherche DIVINE est fondé sur une synthèse des programmes nationaux de recherche et des choix politiques nationaux en matière de transport de marchandises ainsi que sur la nécessité d'établir des normes de performance pour les véhicules. Le champ du programme de recherche était vaste et diversifié, et a reposé sur une identification claire des plans de recherche, une normalisation des techniques de recherche et une coordination entre l'OCDE, les représentants des pays Membres et le Directeur du Programme DIVINE. Le Groupe d'experts était composé d'experts dans les domaines des véhicules, des chaussées, des ponts, de la gestion routière et de la politique des transports.

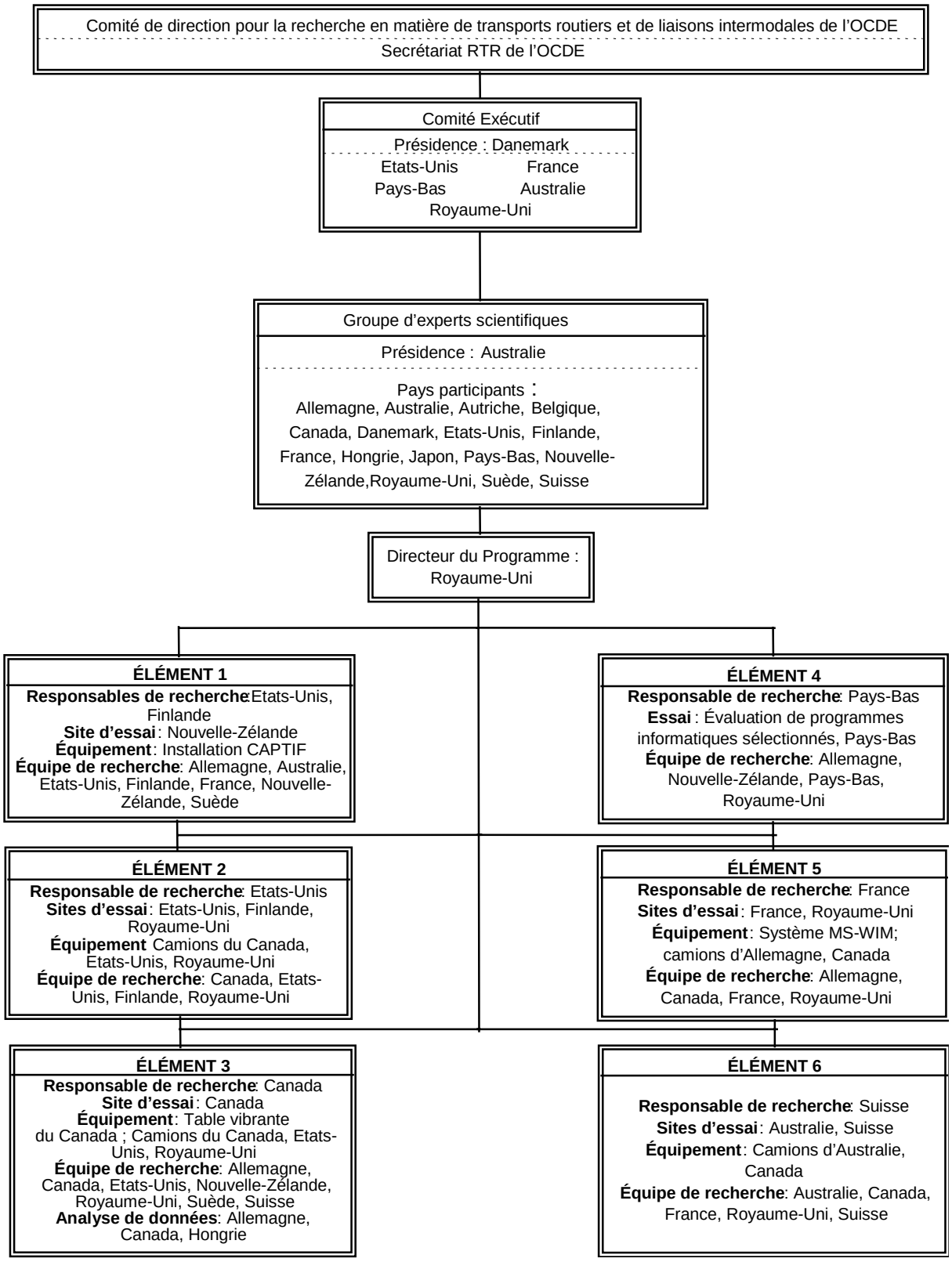
Cette méthode de travail a facilité le transfert de technologie d'un secteur à l'autre et, souvent, d'un pays à l'autre. Ainsi, des avantages moins tangibles mais réels en ont découlé. On peut citer, entre autres, l'élargissement du réseau d'experts techniques, un enrichissement des idées, et une meilleure

[1] Voir définition dans l'Annexe A.

appréciation de l'ensemble des problèmes rencontrés par des groupes similaires travaillant dans différents environnements techniques et économiques.

Le Projet a été lancé en 1993 et les résultats intermédiaires ont été présentés à un séminaire tenu à Sydney, Australie, en 1995 (OCDE et AUSTROADS, 1995). Les résultats définitifs de la recherche ont été largement diffusés en 1997 à l'occasion de conférences régionales en Amérique du Nord, en Europe et en Asie-Pacifique. Ces conférences ont été organisées dans le but d'impliquer les praticiens et experts du domaine des routes et des véhicules et pour débattre et progresser dans la résolution des problèmes politiques les plus importants dans toutes ces régions, au vu des résultats du Projet DIVINE.

Figure I.1. **Gestion et structure du projet de recherche DIVINE**



I.3.3. Financement du Projet DIVINE

Les participants au Projet ont apporté un financement substantiel pour mener les essais, faire l'analyse des données et préparer les rapports. Le coût total du Projet était de l'ordre de 1.3 million de dollars US. En outre, de nombreux participants ont supporté une part non négligeable de leur propre coût en fournissant par exemple des équipements et du personnel gratuitement ou, encore, en apportant leur aide soit gratuitement, soit par d'autres moyens, pour les travaux menés dans le cadre d'autres Eléments de Recherche.

Les participants indirects ont également fait des apports substantiels au Projet sous forme de dons, de prêt d'équipements, de logiciels ou d'autres outils, et ces apports correspondent eux aussi à des sommes importantes. Ces apports "en nature" ont été mis à disposition par les instituts de recherche, les gouvernements et les industries. Le coût total estimé du Projet DIVINE est de 3.4 millions de dollars US, dont 1.3 million pour le budget principal.

Le budget principal visant à couvrir les dépenses directes a été alimenté par des fonds initialement recueillis par le Comité de Direction RTR et auxquels certains membres ont contribué à différentes étapes du Projet. En tout, 17 pays ont fait des dons, ainsi que la Commission Européenne (DG VII). De plus amples détails sur le budget du Projet DIVINE sont présentés dans le tableau I.1. Ce tableau montre le soutien financier reçu ainsi que l'origine et les montants estimés des contributions en nature. Les fonds ont été gérés par l'OCDE en suivant une procédure systématique d'approbation des dépenses à laquelle participait le Directeur du Programme.

I.3.4. Procédures suivies pour l'analyse critique

Les résultats scientifiques du Projet DIVINE – c'est-à-dire les rapports scientifiques pour chacun des Eléments de Recherche – ont été soumis à une analyse critique indépendante avant publication. L'objectif de cette analyse critique était d'offrir aux auteurs des rapports de recherche une évaluation visant à les aider à apporter tout complément, modification, et analyse jugés nécessaires et, ainsi, de s'assurer de produire un rapport de grande qualité. A cette fin, un groupe restreint d'examinateurs, spécialisés dans les domaines couverts par DIVINE, a été sélectionné par le Comité Exécutif. Leur cahier des charges leur demandait de se concentrer en particulier sur la rigueur scientifique et technique de la recherche, son analyse et la validité des conclusions tirées.

I.4. Brève description du Projet DIVINE

I.4.1. Objectifs du projet

Le Projet DIVINE a consisté en un effort de recherche internationale coordonnée pour faire progresser la compréhension de la relation scientifiquement établie entre les différents systèmes de suspension des véhicules et la détérioration des chaussées, et de ses implications pour la gestion du patrimoine d'infrastructures et pour la productivité du transport routier de marchandises. Il aborde des questions clés posées aujourd'hui et celles qui auront vraisemblablement une portée croissante à l'avenir. Les plus importantes de ces questions concernent les points suivants :

Tableau I.1a. **Contributions nationales versées directement pour le Projet DIVINE**

Pays (partenaire pour le financement)	Montant des dons en USD (ou équivalent, chiffres arrondis)
Australie (Consortium: gouvernement & secteur privé)	82 000.00
Autriche (Gouvernement)	50 000.00
Canada (Consortium: gouvernement & secteur privé)	74 000.00
Danemark (Gouvernement)	43 500.00
Finlande (Gouvernement)	50 000.00
France (Gouvernement & secteur privé)	125 462.00
Hongrie (Gouvernement)	15 000.00
Islande (Gouvernement)	15 000.00
Japon (Gouvernement)	150 000.00
Pays-Bas (Gouvernement)	62 500.00
Norvège (Gouvernement)	51 500.00
Suède (Gouvernement & secteur privé)	66 000.00
Royaume-Uni (Gouvernement)	81 500.00
Etats-Unis (Gouvernement)	200 000.00
Total des contributions nationales	1 066 462.00
CE (DG VII)	222 000.00
GRAND TOTAL	1 288 462.00

Tableau I.1b. **Contributions en nature affectées directement par certains participants aux Eléments de Recherche**

Contributions nationales en nature	Contributions en nature de l'industrie	Montant en USD (chiffres arrondis)
Australie Gouv.		421 000,00
	BPW (Allemagne), Boral, York (Australie) (R.El 6)	76 500,00
Canada Gouv.(NRC) (R.El 3)		310 000,00
Etats-Unis Gouv. (FHWA)		263 250,00
Finlande Gouv. (FINNRA)		50 000,00
France Gouv. (LCPC) (R.El 5)		240 400,00
	Renault (France) (R.El 5)	27 400,00
	Cofiroute (France) (R.El 5)	7 300,00
	Transfibre (France) (R.El 5)	840,00
	Drouard (France) (R.El 5)	11 000,00
	Vectra/Leem (France) (R.El 5)	10 000,00
	TNZ (Nouvelle-Zélande) (R.El.1)	111 500,00
	TNO (Pays-Bas) (R.El.4)	40 200,00
Royaume-Uni Gouv.		137 000,00
Suisse Gouv. (OFR)		237 700,00
Financement national interne pour certains Eléments de Recherche		
Allemagne (R.El 3)		55 000,00
Suisse (R.El 6)		105 000,00
Financement international pour certains Eléments de Recherche		
Royaume-Uni (R.El 2) au VTT		27 400,00
Total des contributions en nature		**2 131 490,00**

Source : OECD.

- Réduire tous les types d'impact des camions sur les réseaux routiers, y compris la détérioration de l'état des routes et les effets négatifs sur la sécurité et l'environnement.

- Améliorer la productivité du transport de marchandises par une réforme des politiques en matière de poids et dimensions des véhicules.

- Quantifier les avantages potentiels des systèmes de suspension "peu agressifs" sur la prolongation de la durée de vie de la chaussée et sur la réduction de ses coûts d'entretien ; et

- Prendre mieux en compte les effets des véhicules lourds dans les méthodes de dimensionnement des chaussées et des ponts adoptées pour la construction des nouvelles infrastructures.

En raison de la diversité des environnements des politiques de transport dans les pays Membres de l'OCDE et entre les différentes régions, les résultats de DIVINE s'appliqueront différemment. Même si tous les pays ont des préoccupations majeures quant à la productivité des véhicules lourds de marchandises et leurs effets sur la détérioration de l'infrastructure, à la sécurité, à la congestion du trafic et à la pollution, des priorités différentes s'imposent dans les diverses régions de l'OCDE. Par exemple, l'Europe se préoccupe généralement des questions liées à la congestion du trafic et à l'environnement, l'Amérique du Nord est très préoccupée par la sécurité des ponts et des routes, et une des priorités pour la région Asie-Pacifique est d'assurer une meilleure productivité.

En conséquence, il s'est avéré important que le Projet DIVINE fournisse des résultats qui soient hautement pertinents au niveau de ces problèmes politiques spécifiques à chaque région. Dans le même temps, les participants au Projet n'ont pas souhaité prendre l'entière responsabilité pour indiquer comment les recommandations scientifiques devraient être appliquées aux problèmes politiques. En conséquence, le Projet DIVINE a été développé en vue de fournir une base scientifique pour :

- Quantifier l'influence des suspensions des véhicules lourds sur la durée de vie des chaussées et/ou leurs coûts.

- Préserver les performances des véhicules "peu agressifs" en cours d'exploitation.

- Quantifier l'influence des suspensions des véhicules lourds sur la durée de vie des ponts et/ou leurs coûts ; et

- Proposer des indices d'état de la route les plus pertinents possible pour rendre compte de l'effet dommageable des camions.

I.4.2. Buts de la recherche

La principale motivation de la recherche était d'améliorer la fabrication des véhicules, la construction et l'entretien des chaussées, et le dimensionnement des ponts. La recherche a visé à contribuer à :

- Encourager la conception et l'utilisation de véhicules lourds "peu agressifs", ainsi que le recours à des procédures pour concevoir et évaluer la "moindre agressivité" de ces véhicules.

- Evaluer les conséquences de l'introduction des nouvelles technologies des systèmes de suspension des véhicules sur le dimensionnement des ponts.

- Réduire la détérioration des réseaux routiers (y compris des chaussées et des ponts).

- Evaluer les choix politiques relatifs aux poids par essieu, aux configurations et au nombre d'essieux.

- Développer des procédures d'affectation des coûts routiers et de planification de l'entretien en tenant compte du poids des véhicules ; et

- Offrir une base internationale commune pour élaborer conjointement les futures normes, les procédures d'essai et les initiatives en matière de politique pour les véhicules lourds de marchandises.

Le Programme était constitué de six Eléments de Recherche étroitement liés et formant un ensemble visant à répondre aux quatre questions fondamentales suivantes :

1. Dans des conditions contrôlées, de combien les charges dynamiques réduisent-elles la durée de vie de la chaussée, et quelle est leur influence sur la performance des ponts ?

2. Comment les résultats obtenus dans des conditions contrôlées sont-ils transférables à des conditions réelles de circulation en présence de trafic mixte et dans des conditions environnementales différentes ?

3. Comment la moindre agressivité des véhicules lourds doit-elle être spécifiée et comment doit-elle être testée ?

4. En pratique, à quel accroissement de la durée de vie de la chaussée peut-on s'attendre si l'on utilise des véhicules lourds peu agressifs ?

Le programme de recherche a été conçu de manière à répondre parallèlement à chacune de ces questions en utilisant différentes approches et divers ensembles de données, en vue d'augmenter la fiabilité des résultats et d'aboutir à des réponses complémentaires dans l'hypothèse où l'un des Eléments de Recherche ne fournirait pas de résultat satisfaisant.

I.5. Présentation des résultats

Les conclusions du projet de recherche DIVINE présentés dans ce rapport ont pour objet de promouvoir la mise en oeuvre des résultats obtenus et à fournir des informations sur les principaux aspects des travaux de recherche menés, l'analyse des données, les résultats et conclusions scientifiques. Lors de la rédaction de ce rapport, une attention particulière a été portée sur : (i) la façon dont les résultats peuvent être appliqués en pratique et (ii) la façon dont le Projet DIVINE a fait progresser les connaissances scientifiques.

I.5.1. Résultats pratiques pouvant être mis en application

Le Groupe d'experts estime que les principales applications des résultats du Projet DIVINE seront vraisemblablement les suivantes :

- Amélioration des méthodes d'évaluation des conséquences liées aux modifications des politiques réglementaires pour les véhicules lourds.

- Meilleure intégration de l'infrastructure et du véhicule lourd dans les décisions politiques en matière de transport.

- Progrès technologiques dans les domaines des routes, des ponts et des véhicules.

- Meilleure compréhension des limites et coûts propres aux ponts par rapport à l'utilisation qu'en font les véhicules lourds.

- Progrès technologiques dans le domaine des techniques d'essai et de modélisation assistée par ordinateur.

I.5.2. Résultats visant à améliorer la connaissance scientifique

Le Projet DIVINE représente une étape majeure dans l'amélioration des connaissances scientifiques sur l'interaction camions-routes. Il se situe dans la lignée de l'Essai routier AASHO, du développement des essais accélérés de chaussée et des progrès rapides dans les techniques de mesure, de surveillance et de modélisation. Si toutes ces initiatives ont contribué à une meilleure connaissance de l'influence des véhicules sur l'infrastructure, elles se sont essentiellement concentrées sur un des éléments du système — habituellement, la chaussée — et elles n'ont pas véritablement examiné, de manière interactive, les effets de tous les éléments. A cet égard, le Projet DIVINE constitue une étude scientifique unique.

Il est donc essentiel d'expliquer l'importance scientifique du Projet DIVINE dans le contexte d'autres développements majeurs des connaissances et de documenter, de manière exhaustive, les Eléments de Recherche de DIVINE. L'accent consécutif mis sur l'aspect interactif de DIVINE ne s'accorde pas pleinement avec les impératifs liés à la mise en oeuvre des résultats de la recherche, qui nécessitent une identification des informations pertinentes pour chaque élément du système "chaussée, pont et véhicule". Ce problème a été résolu dans la structure du Rapport en présentant les résultats scientifiques de manière interactive et en exposant ensuite les implications pour chaque élément du système dans une section distincte du rapport.

I.5.3. Structure du rapport technique final

Afin de présenter des conclusions qui aident à la fois à appliquer les résultats de la recherche et à décrire l'importance scientifique du travail accompli, le présent rapport est complété par un ensemble de rapports scientifiques sur les divers Eléments de Recherche menés dans le cadre du Projet DIVINE.

La structure du présent rapport est la suivante :

- ***Chapitre II : Les origines du Projet DIVINE.*** Le chapitre décrit les problèmes réglementaires et économiques associés aux travaux DIVINE et le contexte scientifique. Il présente les résultats d'une enquête sur les problèmes politiques clés, menée par le Groupe d'experts, et expose les bases scientifiques du Projet en se référant à l'étude sur l'état des connaissances sur le chargement dynamique des chaussées menée en 1992 par un groupe d'experts de l'OCDE (OCDE, Recherche en matière de routes et de transports routiers, 1992).
- ***Chapitre III : Le système infrastructure-véhicule : une nouvelle approche***. Pour aider les non spécialistes, le chapitre décrit les principaux éléments et caractéristiques du système véhicule-infrastructure. Les modèles conceptuels de la nouvelle approche des interactions véhicule-infrastructure sont présentés et le Programme de Recherche DIVINE et ses Eléments sont résumés.
- ***Chapitre IV : La performance du système véhicule-infrastructure : les résultats du Projet DIVINE.*** Les résultats du Projet sont décrits du point de vue de l'interaction dynamique entre infrastructure et véhicules lourds. Ils sont présentés en exposant les résultats applicables aux domaines d'influence suivants :
- Effets des véhicules sur la réponse dynamique des chaussées et des ponts.
- Effets des suspensions des véhicules lourds sur la détérioration de la chaussée ; et
- Méthodes d'évaluation de la moindre agressivité des véhicules.
- ***Chapitre V : Améliorer le système véhicule-infrastructure : les répercussions de la recherche DIVINE***. Sans nécessairement apporter des réponses dans tous les domaines, le Projet DIVINE a des implications importantes en termes d'analyse plus rationnelle de l'utilisation de l'infrastructure par les véhicules lourds. Le chapitre examine le rôle potentiel des progrès technologiques dans le domaine des chaussées, des ponts et des véhicules et discute des besoins de recherche futurs. Les conclusions et recommandations sont résumées.
- ***Annexe A :*** elle fournit au lecteur certaines définitions des termes utilisés dans le rapport, ainsi qu'une vue d'ensemble du développement des pratiques de dimensionnement des chaussées et des ponts et des procédures d'analyse des chaussées tenant compte du chargement dynamique.
- ***Annexe B*** : Elle contient une brève description des installations et équipements utilisés dans les divers Eléments de recherche du programme DIVINE.
- ***Annexe C*** : Elle contient un glossaire des abréviations.

I.6. Portée du Projet DIVINE

Le Projet DIVINE a examiné les mérites d'un aspect essentiel de la technologie des véhicules peu agressifs et on espère que les résultats aideront à la mise en place d'un nouveau cadre interdisciplinaire pour évaluer l'interaction véhicule-infrastructure. Le succès du Projet repose sur les éléments clés suivants : une forte concentration sur les problèmes politiques prioritaires, un important soutien de la part des gouvernements et de la Commission Européenne, et l'implication de l'industrie privée.

Vraisemblablement, les résultats du Projet DIVINE accéléreront le changement actuel dans la façon dont est perçue l'interaction camions-routes. Bien que d'un point de vue qualitatif on reconnaisse que les camions "détériorent" les chaussées à un rythme qui dépend non seulement de la charge statique transportée par le camion, mais également de la performance dynamique du véhicule, du profil en long de la route et de la variabilité structurelle de la route, le projet DIVINE a tenté de quantifier l'ampleur de ces effets et a permis d'étoffer les preuves scientifiques existantes.

Le Projet DIVINE a montré qu'il ne convenait plus d'isoler l'effet "véhicule". Même si le camion impose la "charge" sur l'infrastructure, la recherche montre que le mauvais uni des routes et la non-homogénéité des constructions augmentent la détérioration et la dégradation structurelle des chaussées ainsi que la fatigue des ponts causées par les véhicules lourds. Le Projet DIVINE pourrait servir de catalyseur pour un meilleur partenariat entre les opérateurs routiers et les constructeurs de véhicules lourds.

Le Projet DIVINE a également offert une occasion historique pouvant servir de modèle à d'autres recherches interdisciplinaires en coopération. Des avantages économiques substantiels peuvent être tirés de l'amélioration de l'interaction des véhicules lourds de marchandises et des infrastructures, et certaines caractéristiques essentielles de la moindre agressivité des véhicules ont été établies. Les lacunes dans les connaissances actuelles relatives à la performance des ponts et chaussées sous chargement dynamique doivent maintenant être comblées afin de réduire, à l'avenir, les coûts pour les opérateurs et les usagers de la route.

Le Projet DIVINE a fourni un cadre nouveau, nécessaire, grâce auquel les connaissances actuelles sur les performances de la chaussée par rapport aux charges à l'essieu peuvent être élargies en se fondant sur la base d'une coopération internationale, gérée scientifiquement.

BIBLIOGRAPHIE

HIGHWAY RESEARCH BOARD (1962). *The AASHO Road Test. Report 7: Summary Report*. National Academy of Sciences - National Research Council Publication 1061, Washington DC.

OCDE et AUSTROADS (1995). *Dynamic Loading Of Heavy Vehicles And Road Wear Mid-Term Seminar*. Proceedings; Sydney.

OCDE (1992), RECHERCHE EN MATIÈRE DE ROUTES ET DE TRANSPORTS ROUTIERS. *Le chargement dynamique des chaussées*. OCDE, Paris.

CHAPITRE II — LES ORIGINES DU PROJET DIVINE

II.1. Questions économiques et réglementaires

II.1.1. Contexte

Des efforts sont déployés dans de nombreux pays, à différents niveaux, pour réduire les coûts globaux du transport routier pour la société, améliorer la sécurité routière et réduire l'impact des routes et des véhicules sur l'environnement. Il est de plus en plus admis, depuis quelques années, que les véhicules lourds requièrent une attention particulière et, à cette fin, on a cherché à prendre des mesures pour contrôler les effets de ces véhicules sur la dégradation des chaussées et des ponts, sur les accidents de la route, sur la congestion, sur l'utilisation des emprises routières, sur la compatibilité avec la conception géométrique des routes, sur les dispositifs de régulation du trafic, ainsi que sur les niveaux de qualité de l'air et de bruit de la circulation.

Parallèlement, des moyens de plus en plus sophistiqués pour concevoir, surveiller, entretenir et gérer les chaussées ont été développés grâce à la mise à disposition de données de meilleure qualité sur le trafic des véhicules lourds et sur les charges à l'essieu, recueillies à l'aide des systèmes de pesage en marche (WIM - *Weigh-in-Motion*). L'adoption de procédures mécanistes de dimensionnement des chaussées et l'utilisation croissante des systèmes de gestion des chaussées se sont traduites par un fort accent mis sur la réponse de la chaussée à la charge, la durée de vie de calcul, les stratégies d'intervention d'entretien et l'influence importante des chargements des véhicules lourds sur la durée de vie initiale calculée et la durée de vie résiduelle des chaussées. De même, les méthodes de conception des ponts dépendent fortement des charges des véhicules lourds et, dans tous les pays, les réglementations sur les poids et dimensions des véhicules lourds comprennent d'importantes obligations pour contrôler le poids total en charge des véhicules lourds et la répartition de cette charge sur les essieux. Cependant, ces activités sont fondées sur des modèles très simples de véhicules, de chaussées et de ponts et ne reflètent pas de manière adéquate la nature interactive du système infrastructure-véhicule.

Le Projet DIVINE a été conçu pour fournir des outils scientifiques afin d'aider à traiter les problèmes liés à la croissance du trafic et à la dégradation des chaussées, et de tirer parti des innovations technologiques sur les véhicules, y compris l'amélioration des configurations des systèmes de suspension, pour accroître la productivité. De telles innovations pourraient également aider à renforcer la sécurité et à minimiser l'impact sur l'environnement.

Le concept du Projet DIVINE repose sur l'identification de moyens techniques, d'une part, visant à réduire les coûts routiers et, d'autre part, offrant un potentiel d'amélioration de la productivité des opérations de fret routier. Les possibilités d'améliorer la productivité dépendent d'une réforme des limites des poids et dimensions des camions et des politiques réglementaires associées. Un scénario important qui devait être abordé par le Projet DIVINE concerne l'introduction d'une législation sur la moindre agressivité des véhicules ; à titre d'illustration, les Directives de la Commission Européenne (CE) offrent un exemple de normes de moindre agressivité qui pourraient être plus largement adoptées.

II.1.2. Réduire les coûts routiers

Comme indiqué précédemment, une part substantielle des coûts de construction et d'entretien des routes est attribuée aux effets du trafic de véhicules lourds, qui eux-mêmes sont corrélés à la charge à l'essieu. La méthode d'attribution comporte habituellement une relation selon une "loi de la puissance", ce qui signifie que les normes initiales de construction et la dégradation ou le dommage attribuable aux charges — et, en conséquence les coûts — augmentent à un rythme plus rapide que les charges à l'essieu.

Le pourcentage des coûts routiers globaux attribués aux véhicules lourds varie d'un pays à l'autre, mais est toujours significatif (par exemple, jusqu'à 50% des coûts de réhabilitation des chaussées). Les autres coûts routiers sont considérés comme étant liés à la mobilité et à la mise à disposition d'un espace routier pour les autres catégories de véhicules ainsi qu'à d'autres facteurs, tels que les conditions environnementales, qui ne sont pas directement liés aux niveaux d'utilisation de la route.

Une récente étude de l'OCDE (OCDE, Recherche en matière de Routes et de Transports Routiers, 1994) a établi que le financement annuel consacré aux routes variait entre dollars US 10 et 90 millions pour 1 000 km de routes, que le financement total représentait de 0.2 à 1.9% du PNB dans les pays Membres et que l'affectation de ces fonds entre constructions nouvelles, réhabilitation et entretien divers variait beaucoup entre pays. Toutefois, les coûts de réhabilitation et d'entretien représentent en général entre 40 et 80% des coûts routiers totaux. A titre d'illustration, les coûts d'entretien routier (y compris les coûts de réhabilitation) peuvent représenter 0.4% du PNB, ou un coût annuel unitaire de USD 15 millions pour 1 000 km de routes.

Les responsables des routes dans tous les pays doivent faire face au dilemme suivant : d'une part, un trafic de poids lourds croissant associé à la croissance économique — générant des coûts de construction et d'entretien croissants — d'autre part, les attentes de plus en plus fortes des usagers pour trouver des routes en bon état et une meilleure sécurité routière et, enfin, une réduction des budgets routiers (OCDE, Recherche en matière de Routes et de Transports Routiers, 1994). Parallèlement, le réseau routier constitue un patrimoine considérable pour chaque pays ; il facilite le commerce, les communications, la croissance économique et le développement social. La valeur de cet investissement est comprise entre la moitié et le triple du PNB. En outre, les infrastructures routières dans de nombreux pays deviennent vétustes et de nombreux tronçons de routes arrivent en fin de vie économique. On comprend ainsi que les politiques réglementaires locales et nationales comportent des dispositions strictes visant à la protection des routes.

Afin d'apporter de nouvelles options pour résoudre ces problèmes, le Projet DIVINE cherche à quantifier — pour la première fois — l'influence de la conception des systèmes de suspension des véhicules lourds, du profil en long et de la variabilité structurelle des chaussées sur les dommages et dégradations des chaussées. Le recours à une meilleure technologie pour les véhicules lourds et à de meilleures techniques de construction et de gestion de l'entretien des chaussées présente un fort potentiel pour réduire les coûts routiers associés à l'utilisation des véhicules lourds. Il pourrait être possible de réduire, dans une certaine mesure, les coûts de construction des ponts grâce à une meilleure connaissance des charges de trafic calculées pour leur dimensionnement. Un des problèmes critiques traités dans le Projet DIVINE est, en conséquence, de savoir si les technologies visant à rendre les véhicules moins agressifs pour les chaussées sont également favorables pour les ponts.

II.1.3. Réduire les coûts pour l'usager

Malgré la valeur très élevée du patrimoine routier et la part substantielle des budgets nationaux consacrée à leur construction et leur entretien, les coûts supportés par les usagers de la route sont, d'une manière générale, dix fois supérieurs aux coûts supportés par les services responsables des routes (OCDE, Recherche en matière Routes et de Transports Routiers, 1994). Cette valeur dépend beaucoup, d'une part, de l'engagement de fonds suffisants pour l'entretien et, d'autre part, du volume de trafic empruntant la route. Le rapport intitulé *Entretien et réhabilitation des routes : financement et stratégies d'affectation* (OCDE, Recherche en matière de Routes et de Transports Routiers, 1994) présente, entre autres, les recommandations suivantes à l'attention des gouvernements et administrations routières :

- *"C'est pour le bien des usagers que doit être exécuté l'entretien des routes et des ouvrages d'art. Aussi, la participation du public est-elle un élément essentiel dans la mise au point du programme d'entretien routier.*

- *Il faut traiter les coûts pour l'usager comme des coûts importants et les prendre en compte dans le cadre analytique du système de gestion des routes et des ouvrages d'art".*

Les coûts du transport routier représentent un élément extrêmement important dans l'économie d'une nation, en général, de 2 à 17% du PNB (OCDE, 1994). Les pourcentages les plus faibles s'appliquent principalement aux économies industrielles avancées. Ces coûts sont supportés à la fois par les usagers commerciaux de la route – tels que les opérateurs de véhicules de marchandises – et les particuliers, et ils sont répercutés sur les prix des biens de consommation et des services.

L'ensemble des coûts pour l'usager, y compris les coûts d'exploitation des véhicules légers et lourds, augmente au fur et à mesure de la dégradation de la route. Outre les coûts pour les véhicules lourds, l'impact de l'état de la route sur les coûts des véhicules légers est très fort en raison de leur très grand nombre ; ces véhicules ne sont toutefois pas pris en compte dans le présent rapport.

Les deux types suivants de coûts pour l'usager sont importants dans le cadre de l'exploitation des véhicules de marchandises :

- Si les routes se détériorent sensiblement, les usagers de la route subissent une réduction dans le confort de conduite, donc de leur vitesse, ainsi qu'une augmentation des coûts d'entretien du véhicule, de la consommation de carburant et des coûts liés à l'endommagement des marchandises. Ces coûts pourraient être désignés comme les coûts directs pour l'usager.

- Les règlements en matière de poids et dimensions des véhicules lourds limitent les charges utiles et tendent, en conséquence, à accroître les parcours nécessaires pour accomplir une tâche donnée par rapport aux parcours nécessaires si des limites plus élevées étaient adoptées. Les parcours des camions sont à leur tour directement liés aux coûts d'exploitation des véhicules dont les coûts en carburant et les salaires des conducteurs constituent en général la part la plus importante. Ces coûts pourraient être désignés comme les coûts indirects pour l'usager.

Coûts directs pour l'usager

Les coûts d'entretien des véhicules lourds augmentent avec une dégradation de l'uni de la couche de roulement. Cependant, les éléments les plus importants dans les coûts d'entretien des véhicules lourds sont ceux liés au moteur, à la transmission et aux pneus, et seule une partie du coût des pneus peut

être attribuée aux défauts d'uni de la route. Un autre coût relativement élevé incombant aux exploitants de véhicules concerne la fatigue structurelle du châssis et de la caisse du véhicule. Les exploitants ont trois solutions pour y faire face, chacune de ces solutions impliquant des coûts : réparer ou remplacer plus fréquemment les pièces détachées ; réparer ou remplacer plus fréquemment l'ensemble de la caisse ou le véhicule ; ou choisir un véhicule plus lourd et plus solide pour faire face à des conditions d'exploitation plus difficiles (cette dernière option est discutée plus avant dans le cadre des coûts indirects exposés ci-dessous). D'autres éléments, tels que les suspensions, compris dans le coût d'entretien et qui pourraient être associés aux défauts d'uni de la route sont relativement mineurs pour les véhicules lourds.

Les coûts en carburant augmentent également avec la dégradation de l'uni. Les réductions de vitesse associées à un uni moins bon des routes auraient tendance à contrebalancer cet effet. Cependant, à court terme, les réductions de vitesse dues à des défauts d'uni tendront à avoir plus d'impact sur les coûts parce qu'elles entraînent des temps de parcours plus longs, augmentent les coûts d'exploitation des véhicules et, enfin, réduisent la productivité. Toutefois, il semble que les conducteurs peuvent s'adapter à des conditions de mauvais uni et qu'en conséquence l'effet sur les vitesses pratiquées et les temps de parcours est relativement faible.

La détérioration de la qualité du confort de conduite due à une dégradation de l'uni entraîne, d'une part, une plus grande fatigue chez le conducteur et réduit ainsi potentiellement la productivité, et d'autre part, un plus grand risque d'endommagement de la cargaison, même si ce dernier cas s'applique principalement aux produits sensibles tels que l'équipement électronique ou les matières dangereuses.

En résumé, pour les véhicules de marchandises, il semblerait que la fatigue structurelle du châssis et de la caisse du véhicule, les réductions de vitesse et l'usure des pneus induites par un uni moins bon sont vraisemblablement les éléments ayant la plus forte influence sur ces coûts.

Coûts indirects pour l'usager

Des améliorations de la productivité des véhicules lourds peuvent se traduire par des réductions potentielles substantielles des coûts d'exploitation des véhicules. Ce point est considéré comme un problème politique important dans le cadre du Projet DIVINE. Un autre type de coûts indirects associés à l'état de la route peut apparaître sous forme d'augmentation de coûts résultant de la nécessité d'augmenter la tare du véhicule pour assurer une exploitation durable de celui-ci sur des routes en mauvais état.

Une meilleure productivité et efficacité des transports sont essentielles pour assurer la compétitivité des industries au niveau international. Des limites de charge à l'essieu plus élevées se traduisent par une plus grande productivité d'exploitation des camions et, en conséquence, par des coûts plus faibles. Dans une large mesure, ces économies sont répercutées sur les utilisateurs de services de transport et entraînent également un coût moindre des biens de consommation. Cependant, toute augmentation de coûts dans la construction et l'entretien du réseau routier d'un pays constitue une limite importante à l'étendue des avantages économiques obtenus en pratique.

Il convient de souligner, une fois encore, que les coûts d'exploitation des véhicules de marchandises dépassent largement les coûts routiers imputables à ces véhicules et que des économies relativement importantes sur les coûts de transport peuvent être réalisées en ciblant une meilleure productivité. A titre d'exemple, en Australie (1989-90), le coût d'exploitation moyen annuel d'un véhicule à six essieux était de USD 175 000, chiffre que l'on peut comparer au coût d'exploitation moyen annuel d'une route imputable à un véhicule du même type, soit USD 11 300 (*Interstate Commission*, 1989).

La mise en oeuvre des améliorations de la productivité dépend clairement des politiques nationales en matière de financement routier, des charges supportées par l'usager, des réglementations en matière de poids et dimensions des véhicules lourds. Le Projet DIVINE reconnaît qu'il y a trois types d'objectifs politiques :

- Réduire la dégradation de la chaussée (et, donc, réduire les coûts d'entretien).
- Améliorer la productivité tout en évitant d'augmenter les coûts routiers ; et
- Réduire les coûts routiers et accroître la productivité.

Le Projet DIVINE a fortement orienté ses efforts vers ce dernier objectif.

Une meilleure productivité et des charges utiles plus élevées peuvent être obtenues à l'aide d'une combinaison d'options de politique des transports choisies pour répondre au mieux à l'environnement économique et réglementaire de chaque pays. Ces options politiques pourraient comporter, entre autres, les éléments suivants :

- La possibilité d'augmenter le poids total en charge pour les véhicules peu agressifs, éventuellement en ajoutant des essieux plutôt qu'en augmentant le poids par essieu. Ceci pourrait conduire à accroître le recours à des tridems à la place de tandems.
- Envisager une augmentation des poids par essieu sur des tandems et tridems reconnus comme moins agressifs.
- Mettre en oeuvre des moyens fiables pour mesurer et évaluer la moindre agressivité des systèmes de suspension des véhicules lourds (y compris les performances dynamiques et de répartition de la charge entre les essieux).

II.1.4. Législation en faveur des véhicules peu agressifs

Les récentes tendances de la technologie du véhicule, en particulier l'usage accru des suspensions pneumatiques au lieu des suspensions mécaniques, ont conduit à examiner les mérites d'une législation sur la moindre agressivité des véhicules lourds fondée sur des exigences en matière d'homologation. Les Directives de la CE applicables aux essieux simples moteurs auxquels on peut appliquer des limites harmonisées de poids plus élevées exigent l'utilisation de suspensions pneumatiques, ou équivalentes, et de pneus jumelés. Les Directives de la CE comportent une norme pour les suspensions non pneumatiques : cette norme contient un essai dynamique simple incluant la fréquence et l'amortissement de la suspension. Étant donné que cette norme ne mesure pas directement la performance de la suspension en termes de chargement dynamique mais spécifie certaines caractéristiques dynamiques de la suspension, on peut dire qu'il s'agit d'une norme paramétrique.

L'industrie automobile craint que les exigences de la CE relatives aux suspensions soient trop simplifiées, et toutes tentatives pour élargir l'application de telles exigences semblent justifier des recherches complémentaires à la fois au niveau de la méthode d'évaluation des suspensions et des normes de performances exigées.

II.1.5. Enquête sur les problèmes techniques clés dans les décisions politiques

Afin d'assurer la pertinence des résultats du Projet DIVINE pour les différents domaines de la recherche scientifique et de la prise de décision, le Groupe d'experts scientifiques a mené une enquête sur les problèmes politiques les plus importants posés par l'interaction infrastructure-véhicules lourds. Dans chacun de leur pays, les membres du groupe ont contacté les principaux responsables de la formulation des politiques sur les poids et dimensions des véhicules, ainsi que sur le dimensionnement et l'entretien des chaussées et des ponts. Sur la base des réponses aux questions posées à ces personnes ou institutions, les principaux problèmes identifiés portent sur les thèmes suivants :

Dimensionnement et entretien des chaussées empruntées par les camions

- Le dimensionnement des chaussées doit-il prendre en compte l'effet des charges dynamiques sur la vie de la chaussée ?

- Quels sont les modèles de performance de chaussée les mieux adaptés pour les chaussées neuves ou réhabilitées ?

- En pratique, à quelle augmentation de la durée de vie de la chaussée peut-on s'attendre si l'on utilise des véhicules peu agressifs ?

- Quel est le type d'entretien routier optimum et sa périodicité ?

- Sait-on vraiment comment l'endommagement de la chaussée est déclenché et comment il se propage ?

Moindre agressivité des véhicules

- Il est nécessaire d'avoir de nouveaux moyens pour évaluer la moindre agressivité des véhicules vis-à-vis de la route et une harmonisation internationale de cette évaluation.

- Il y a nécessité pour les propriétaires de véhicules de maintenir les performances des véhicules peu agressifs en cours d'exploitation et de se doter des moyens qui permettent de le faire.

Réglementations liées aux camions

- Quel est l'effet des essieux isolés ou multiples (tandem, tridem et quadruple) sur la performance de la chaussée et quelles sont les limites réglementaires pour chacun de ces essieux pour une dégradation équivalente de la chaussée ?

- Dans la mise en oeuvre des réglementations sur les véhicules peu agressifs, il est nécessaire de minimiser les incertitudes pour l'industrie des transports lorsqu'il s'agit d'acquérir de nouveaux équipements.

Profil en long de la route

- Quelle est la pertinence des indices actuels d'état des chaussées par rapport aux effets des camions ?

Évaluation économique des chaussées

- Il est nécessaire de quantifier l'effet des différentes suspensions sur les coûts routiers.
- Il est nécessaire d'évaluer les coûts et avantages des véhicules peu agressifs.

Limitation de charges sur les ponts et coûts

- Quelle est l'amplitude des facteurs dynamiques de la charge roulante et comment ceux-ci sont-ils pris en compte dans le dimensionnement d'un pont ?
- Quelle est la capacité de chargement du parc de ponts d'un pays ?
- Il est nécessaire de quantifier les coûts des ponts en fonction des charges à l'essieu et de la charge totale des véhicules.
- Il est nécessaire d'évaluer quantitativement l'influence de la concordance de fréquence sur la vie des ponts et leurs coûts d'entretien.
- Il est nécessaire d'évaluer l'efficacité de la moindre agressivité dans des conditions de poids total en charge plus élevé.

Coûts pour l'usager

- Quelles sont les méthodes les plus équitables et efficaces qui peuvent être utilisées pour l'affectation des coûts ?

En résumé, pour répondre aux questions les plus importantes soulevées dans l'enquête, les partenaires du Projet DIVINE se sont particulièrement intéressés à :

- La quantification des avantages associés aux véhicules peu agressifs en termes d'extension de la durée de vie de la chaussée et de réduction des coûts d'entretien dus aux camions.
- L'amélioration du dimensionnement des chaussées pour les camions ; et
- L'amélioration de la productivité du transport de marchandises.

II.2. Bases scientifiques du projet DIVINE

II.2.1. Contexte

En 1992, un Groupe d'experts scientifiques de l'OCDE a présenté une approche technologique des relations dynamiques des véhicules lourds avec la performance des chaussées et la réponse des ponts. Le rapport comporte des recommandations sur une recherche en coopération internationale visant à déterminer la véritable portée de la dynamique des véhicules sur la vie et les coûts des chaussées, et à fournir des méthodes d'évaluation des véhicules. Le Projet DIVINE est élaboré sur les bases scientifiques de ce rapport qui donne un exposé global des charges dynamiques appliquées par les véhicules aux chaussées et aux ponts.

Lors du lancement du Projet DIVINE, il est devenu évident qu'en raison de sa forte orientation sur les conséquences politiques, une base scientifique élargie s'imposait. Afin de discuter des coûts routiers et des coûts pour l'usager, le Projet devait aborder de manière réaliste l'impact des effets interactifs entre la chaussée et le véhicule. A cette fin, il a été nécessaire d'utiliser une terminologie particulière pour décrire les effets de l'interaction véhicule-chaussée. A ce point du rapport, l'utilisation des termes a été associée, soit aux chaussées, soit aux ponts, à savoir dégradation, réponse, durée de vie résiduelle, détérioration, dommage, profil en long de la chaussée, confort de roulement, défauts d'uni, variabilité structurelle et état de la route. Dans de nombreux cas, le sens individuel de ces mots apparaît relativement clair, mais ils ont été utilisés de différentes façons, par le passé, et peuvent avoir plusieurs connotations. C'est pourquoi, les paragraphes suivants présentent leur signification et celle des termes connexes, et tentent de familiariser le lecteur avec le contexte général dans lequel cette terminologie est utilisée dans le présent rapport.

La question de la *performance de la chaussée*, qui est souvent examinée dans le contexte des modèles de prévision du comportement des chaussées, est également essentielle eu égard aux objectifs du Projet DIVINE. La *réponse initiale de la chaussée* et la *réponse en termes de dégradation de la chaussée* sont des paramètres clés dans les procédures de dimensionnement des chaussées et dans les modèles mis au point pour prévoir la détérioration de la chaussée dans le temps. Si ces concepts ont été examinés par le Groupe de l'OCDE en 1992, une brève description de la *réponse initiale* et de la *réponse en dégradation* est incluse dans ce rapport. Ces concepts trouvent leur origine dans l'Essai routier AASHO et ont été élaborés à l'aide de procédures empiriques ou mécanistes de dimensionnement des chaussées et de modèles de prévision du comportement des chaussées (voir en Annexe A).

Plus récemment, les recherches EAVG (essai accéléré en vraie grandeur) et PLTC (performance à long terme des chaussées) ont pris en compte les effets de la *non uniformité* de la construction des chaussées et des matériaux routiers, l'introduction de nouveaux matériaux ou de matériaux innovants tels que les liants modifiés par des polymères, et l'utilisation de matériaux non normalisés ou marginaux et de sous-produits tels que les laitiers et les cendres volantes.

II.2.2. Chargement dynamique des chaussées et des ponts

Le rapport OCDE sur *Le chargement dynamique des chaussées* (1992) décrit l'état des connaissances actuelles sur le sujet et forme la base du projet DIVINE. Les principaux résultats de ce rapport sont présentés ci-dessous, avec des commentaires plus détaillés dans les cas où les aspects traités sont particulièrement pertinents pour le projet DIVINE.

Nature du chargement dynamique

Suite à une variété de processus statiques et dynamiques, les véhicules lourds appliquent aux routes et aux ponts des charges par roue qui sont plus élevées que celles auxquelles on peut s'attendre sur la base des charges à l'essieu nominales. La composante statique dépend du poids total du véhicule et de sa configuration d'essieux et elle est très influencée par les limites légales, applicables à la charge à l'essieu et au poids total en charge des véhicules, adoptées dans les divers pays. La composante dynamique dépend de la dynamique verticale du véhicule et englobe des facteurs tels que la répartition des masses et la rigidité de la structure du véhicule, la répartition des masses de charge utile, les suspensions et les pneus, ainsi que le profil en long de la surface de la route et la vitesse du véhicule. Les vibrations verticales font varier les charges appliquées par les roues à la route au-dessus et en dessous de leurs valeurs statiques.

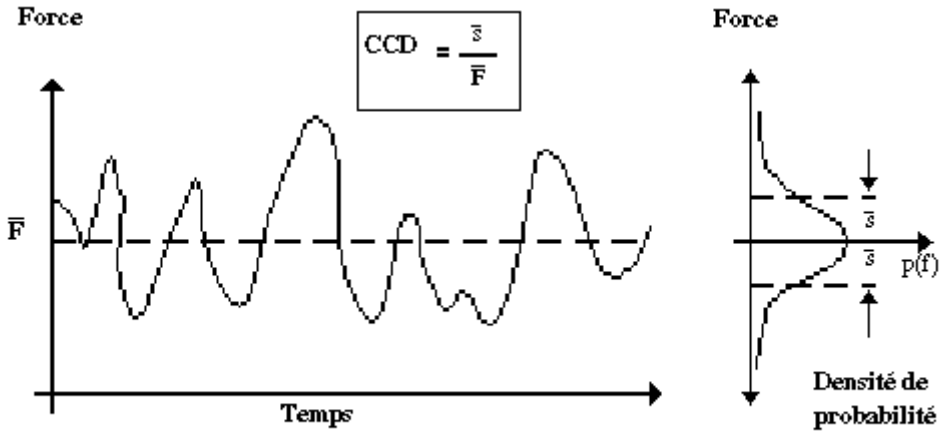
Les amplitudes typiques des charges dynamiques de roue, lorsqu'elles sont exprimées statistiquement comme un écart type, varient entre 5-10% de la charge statique pour des suspensions pneumatiques bien amorties et pour des suspensions mécaniques en acier souples et bien amorties, et entre 20-40% de la charge constante stationnaire pour des systèmes de suspension plus agressifs. L'amplitude de la charge dynamique de roue augmente généralement avec la vitesse et avec les défauts d'uni de la route (OCDE, Recherche en matière de Routes et de Transports Routiers, 1992).

La plupart des véhicules lourds génèrent des charges dynamiques soit dans un intervalle de fréquences de 1.5-4 Hz associées au mouvement de pompage de la caisse ou au tangage du véhicule, et/soit dans un intervalle de fréquences de 8-15 Hz associées aux oscillations d'essieux. Les vibrations d'essieux sont généralement plus importantes si l'uni n'est pas bon et si la vitesse du véhicule est supérieure à 40 km/h environ.

L'amplitude des charges dynamiques et leur fréquence ont toutes deux une importance potentielle sur la dégradation de la chaussée. Le Projet DIVINE a adopté le Coefficient de Chargement Dynamique (CCD) comme la première mesure du chargement dynamique et a examiné à la fois les chargements à basse fréquence (1.5-4 Hz) et à haute fréquence (8-15 Hz). Le CCD est défini (OCDE, 1992) comme le rapport de la Racine Moyenne Quadratique (RMQ) de la force dynamique appliquée par la roue sur la force moyenne appliquée par la roue, où la RMQ de la force dynamique appliquée par la roue est essentiellement l'écart type de la densité de probabilité (voir figure II.1.). Le CCD est, en conséquence, le coefficient de variation de la charge par roue. La valeur moyenne de la densité de probabilité représente la composante constante (statique) de la charge par roue et varie avec la réglementation locale du transport routier et d'autres facteurs.

Le facteur d'impact – autre mesure du chargement dynamique – est également utilisé dans le rapport. Le facteur d'impact pour un essieu est calculé comme le rapport entre la force d'impact mesurée à l'aide d'un capteur et la charge statique à l'essieu. De la même façon, le facteur d'impact d'un véhicule est la somme des forces d'impact d'essieu mesurées à l'aide d'un capteur divisée par le poids total du véhicule.

Figure II.1. **Définition du coefficient de chargement dynamique (CCD)**



Source : OECD (1992).

Dimensionnement des chaussées

Il y a trois principaux types de structures de chaussée, fonction des matériaux utilisés :

- Souple : en béton bitumineux ou enduits superficiels sur des matériaux non traités ou traités avec un liant bitumineux.

- Rigide : en béton de ciment Portland sur des couches de matériaux liés ou non traités.

- Semi-rigide : en béton bitumineux sur des couches de matériaux traités avec un liant hydraulique.

En raison de la prédominance des chaussées de type souple dans les constructions routières récentes et actuelles, le Projet DIVINE met l'accent dans ses essais sur ce type de chaussée. Les matériaux composant les différentes couches sont classés comme élastiques, viscoélastiques ou plastiques en fonction de leur comportement déterminé par des essais en laboratoire.

Les chaussées sont dimensionnées pour résister à l'action répétitive des charges mobiles constantes et dynamiques appliquées par les roues en mouvement qui provoquent inévitablement la fatigue et la fissuration des matériaux liés (béton bitumineux ou matériau traité aux liants hydrauliques) pour tous les types de chaussée et une déformation permanente de toutes les couches (traitées ou non) des chaussées souples. La façon dont les chaussées répondent à cette répétition de charges en mouvement dépend de l'amplitude, de la vitesse, de la fréquence, de la période de relaxation et du nombre de charges appliquées, de l'évolution des propriétés des matériaux dans le temps et des conditions d'environnement telles que la température.

La seule chaussée construite spécifiquement pour le Projet DIVINE est celle testée sur l'installation d'essais accélérés de Canterbury "CAPTIF" qui est un manège circulaire, couvert et appartenant à *Transit New Zealand*, situé à l'Université de Canterbury, Nouvelle-Zélande. Cette chaussée, composée d'un revêtement bitumineux sur une couche de base et de forme en matériaux granulaires, a été dimensionnée avec une probabilité égale de rupture : 1) par fissuration de la couche de surface

bitumineuse, et 2) par déformation permanente, ou orniérage, de la couche de forme. Une instrumentation complète a été utilisée pour mesurer les déflexions verticales des couches et les déformations horizontales en traction à la base du revêtement bitumineux (servant à prédire la fissuration) et les déformations verticales en compression dans la couche de forme (servant à prédire l'orniérage).

Détérioration de la chaussée

Détérioration de la chaussée – utilisée ici comme une expression du taux de progression des différents modes d'endommagements mesurables – est ici d'une importance particulière quand elle se rapporte aux effets de l'interaction véhicule-chaussée. (Le terme de détérioration de la chaussée – en anglais "*pavement wear*" – est parfois appliqué aux caractéristiques de surface telles que l'adhérence, mais dans la suite du rapport il sera utilisé comme défini ci-dessus). Pour les routes subissant de la fissuration par fatigue, la détérioration est liée exponentiellement à la charge par roue et peut-être selon une relation en puissance quatrième. Pour les routes subissant des déformations permanentes, la détérioration de la chaussée suit aussi une loi de "puissance", peut-être avec un exposant aussi petit que 1 (OCDE, Recherche en matière de Routes et de Transports Routiers, 1992).

Le rapport de l'OCDE sur le *Chargement dynamique des chaussées* (1992) conclut qu'il n'y a pas eu d'étude menée soit pour comparer de manière expérimentale les effets des chargements dynamiques par rapport à ceux des chargements statiques, soit pour déterminer de manière expérimentale les effets des caractéristiques des véhicules sur la dégradation de la chaussée. Cette conclusion a eu des répercussions importantes lors du lancement du Projet DIVINE : le Groupe d'experts a décidé — parce qu'il n'était pas possible de comparer les effets des chargements dynamiques par rapport aux chargements statiques — d'utiliser l'installation d'essai accéléré de chargement dynamique CAPTIF pour comparer les effets d'une suspension peu agressive (dont le chargement dynamique est supposé relativement faible) avec les effets d'une suspension agressive (dont le chargement dynamique est supposé relativement élevé).

État fonctionnel, état structurel, niveau de service et performance

Pour mener à bien le Projet DIVINE et faire une interprétation valide des résultats, il était essentiel d'avoir une compréhension commune des termes associés à ***l'état*** général et ***la performance*** d'une route donnée (voir aussi l'Annexe A).

L'état d'une chaussée peut être décrit, à la fois du point de vue de l'usager de la route qui est intéressé par la *qualité (le confort) de conduite* et la *sécurité* de la chaussée (c'est-à-dire par sa fonction en tant que surface de roulement), et du point de vue de l'ingénieur qui s'intéresse non seulement à l'état *fonctionnel* courant de la chaussée mais également à son état *structurel*.

Le niveau de service est une des mesures de *l'état fonctionnel*. Il s'agit de la capacité d'une section de chaussée donnée à fournir un service au trafic dans son état structurel existant (Haung, 1993). Dans ce contexte, le niveau de service est une mesure de l'état fonctionnel prescrit par l'usager pour répondre à des demandes fonctionnelles courantes. Le terme "niveau de service" lui-même comporte, toutefois également, des mesures de l'état structurel de la chaussée. Il y a deux manières de déterminer le niveau de service. Le premier consiste à utiliser l'Indice de Qualité de Service (IQS) (en anglais, PSI — *Present Serviceability Index*), développé lors du test AASHO, qui est fondé sur le défaut d'uni, ainsi que sur la fissuration, l'orniérage et les emplois partiels. La seconde consiste à utiliser l'indice d'uni fondé sur le défaut d'uni uniquement. Ces trois définitions (état *structurel*, état *fonctionnel* et *niveau de service*)

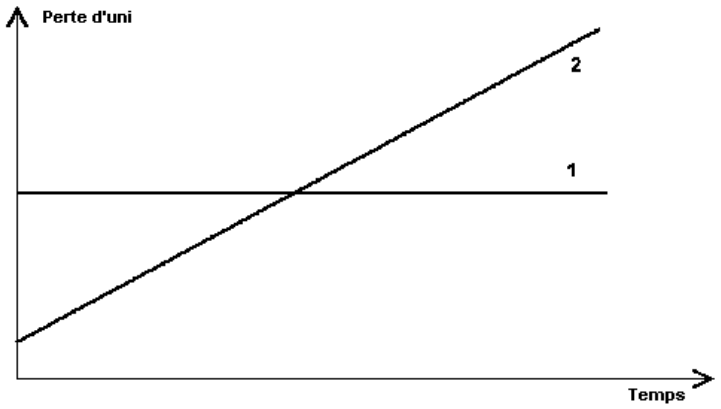
sont, cependant, des descriptions de ces mesures à un moment donné unique dans le temps. La *représentation temporelle* de ces trois mesures est donnée en utilisant le terme ***performance***.

La *qualité (confort) de conduite* d'une route dépend essentiellement de l'uni de la chaussée à un instant donné. Elle a une incidence à la fois sur le confort pour le conducteur et sur les coûts pour l'usager parce qu'au fur et à mesure de la perte d'uni de la chaussée, les coûts d'entretien des véhicules, les coûts en carburant, les temps de parcours augmentent. La sécurité peut également être affectée par une perte d'adhérence, l'aquaplanage dû à une rétention de l'eau à la surface, l'éclaboussement par les autres véhicules, etc. D'autres paramètres concernent le bruit, l'usure des pneus et la résistance au roulement.

L'état structurel est une mesure, à un instant donné, du degré de gravité des défauts ou de la détérioration, visibles ou non, qui se développent dans la chaussée. Il dépend de *l'épaisseur* des diverses couches et du type et de la résistance des matériaux composant la chaussée. Il dépend également de la qualité de la construction routière et, dans ce contexte, du degré de variabilité de l'intégrité structurelle des matériaux des différentes couches sur la longueur de la route. Par exemple, une route présentant un fort degré de *variabilité* des matériaux, même si elle est construite avec un uni parfait sur la couche de roulement, dégénérera rapidement en une route dont la surface aura un mauvais uni. Une chaussée construite avec des matériaux de grande qualité et présentant une forte homogénéité pourrait également, suite au processus de construction, présenter une surface dont l'uni est très mauvais. Dans tous les cas, le défaut d'uni de la route entraînera une mauvaise qualité (confort) de conduite et, finalement, induira des chargements dynamiques élevés qui accéléreront davantage la détérioration de la chaussée.

Ullidtz (1987) explique pourquoi les états *fonctionnel* et *structurel* ne devraient pas être décrits en utilisant un "indice" unique. Comme le montre la figure II.2., la chaussée 1, présentant un mauvais état fonctionnel mais un bon état structurel, peut avoir le même "indice d'état" que la chaussée 2, qui elle présente un bon état fonctionnel mais un mauvais état structurel. Cependant, la *performance* de ces deux chaussées peut être complètement différente. Il faut garder présent à l'esprit que la définition AASHO, donnée par l'équation fondée sur l'essai routier, est une mesure fonctionnelle qui utilise des critères visibles de détérioration de la chaussée et qu'elle ne devrait pas, en général, être utilisée pour décrire le degré de détérioration physique ou l'état structurel de la chaussée.

Figure II.2. **Différence entre "état fonctionnel" et "état structurel"**



Chaussée 1 = mauvais état fonctionnel, bon état structurel
Chaussée 2 = bon état fonctionnel, mauvais état structurel

Source : Ullidtz, 1987.

Répétabilité spatiale

En termes simples, la ***répétabilité spatiale*** est la tendance d'un véhicule à imposer le même chargement au cours de différents passages sur la surface d'une route ayant un profil donné. Il est également possible que les surcharges dynamiques, dans des conditions de trafic mixte, se concentrent sur des points particuliers de la surface de la route, entraînant dans ce cas un excès de dégradation de la chaussée. Si la charge dynamique est supérieure à la charge statique, et si les charges dynamiques s'accumulent à des points donnés de la route, il y a clairement des implications, en termes à la fois de conception des véhicules et de niveau de qualité du profil de la route, qui pourraient être prises en compte lors de la construction afin que les charges dynamiques les plus élevées soient minimisées.

La répétabilité spatiale des charges dynamiques des roues est présumée dépendre à la fois du profil de la surface de la route et du degré d'homogénéité des caractéristiques dynamiques des véhicules composant la flotte des véhicules lourds.

Le Projet DIVINE a examiné la répétabilité spatiale sur des routes à grande circulation, en France et au Royaume-Uni, où l'influence du profil en long de la route et les caractéristiques de véhicules isolés, ainsi que la répétabilité statistique des chargements dynamiques des véhicules lourds en condition de trafic mixte ont été étudiées.

Réponse des ponts au chargement dynamique

Outre les déformations statiques, les ponts routiers présentent également une réponse dynamique au passage de véhicules lourds. Ce fait a été établi il y a environ 150 ans lorsque des recherches ont été menées sur la question dans le cadre d'accidents graves sur des ponts de chemin de fer (Willis, 1851). Les développements ultérieurs entre 1847 à 1990 ont également été décrits (Cantieni, 1983 et 1992). Les recherches sur la réponse dynamique des ponts routiers se sont intensifiées notablement durant les 30 dernières années avec le développement de méthodes modernes de mesure, d'acquisition et de traitement des données (Barbour, 1993, Jacob et Caracilli 1983). Les nouvelles spécifications nationales de dimensionnement des ponts tiennent compte de ces effets dynamiques (Eymard et al., 1990). La partie du Projet DIVINE relative à la réponse des ponts au chargement dynamique est fondée sur les technologies décrites dans ces rapports.

La réponse dynamique des ponts est fonction de nombreux paramètres, dont, entre autres, la fréquence propre du pont et son amortissement, le profil en long de la route, la vitesse du véhicule, sa masse, la configuration des essieux et des suspensions, les pneus et le nombre de véhicules se trouvant simultanément sur le pont. Ces questions se révèlent très complexes en raison des interactions significatives de ces divers éléments.

Le principal résultat précédemment rapporté (Cantieni, 1992) est que les ponts dont la fréquence propre est $f \approx 2.5$ à 4 Hz (portée maximum $L \approx 40$ à 25 m) sont plus sensibles aux actions dynamiques des véhicules lourds (équipés de systèmes de suspension à lames d'acier) que les ponts dont la fréquence propre se situe hors de cette bande de fréquences. Ceci est dû au fait que les charges par roue de tels véhicules lourds présentent une fréquence dominante dans la même bande (Cantieni, 1992). Cet effet est connu sous le nom de "concordance de fréquences" conduisant à une amplification dynamique de la réponse dynamique correspondante du pont, un phénomène dénommé "quasi résonance".

Le rapport de l'OCDE de 1992 démontre que les développements récents dans les systèmes de suspension des véhicules lourds se traduisent par une diminution des bandes de fréquence de

rebondissement de la partie suspendue du véhicule qui passent de f ≈ 2.5-4 Hz à f ≈ 1.4-1.8 Hz. Ceci soulève la question des conséquences de la concordance de fréquences entre les ponts de portée moyenne (f ≈ 1.4 à 1.8 Hz, portée maximum de L = 80 à 60 m) et ces vibrations liées au rebondissement de la caisse à des fréquences plus basses.

Les données présentées dans le rapport de l'OCDE de 1992 soulignent également le fait que les composantes d'oscillation de l'essieu (f ≈ 8 à 15 Hz) des forces dynamiques de la roue peuvent également être importantes, en particulier lorsque le profil de la route présente des défauts d'uni de courte longueur d'onde et que la vitesse du véhicule est supérieure à 40 km/h. La concordance de fréquences entre l'oscillation d'essieu et la vibration des ponts de courte portée (portée maximum L ≈ 15-8 m) était également présumée mais peu d'essais avaient été menés sur des ouvrages de courte portée pour vérifier cette hypothèse. Par exemple, les codes de bonne pratique, qui expriment la tolérance de chargement dynamique pour le dimensionnement des ponts comme une fonction de la fréquence fondamentale, ne traitent pas habituellement des ponts dont les fréquences sont supérieures à 6-10 Hz. Ainsi se pose la question de savoir comment les ponts de courte portée répondent aux suspensions conventionnelles à lames d'acier et aux suspensions pneumatiques.

L'importance des défauts d'uni de la couche de roulement pour la réponse dynamique des ponts était également bien connue avant que ne soit lancé le Projet DIVINE. Les fréquences spatiales (ou leur longueur d'ondes équivalente) évidentes dans le profil génèrent des forces dynamiques de roue dont les fréquences varient en fonction de la vitesse et de la configuration du véhicule. Ainsi, le profil de la route et les effets de filtrage liés à l'empattement du véhicule sont importants pour comprendre l'influence des suspensions des véhicules sur la réponse dynamique des ponts.

Conception et exploitation du véhicule

Une enquête conduite en 1992 auprès des pays Membres de l'OCDE montre qu'environ la moitié de la flotte de véhicules lourds est composée de camions rigides avec un ou deux essieux moteurs. La deuxième catégorie la plus importante dans la plupart des pays est constituée de véhicules articulés, les tracteurs ayant habituellement un ou deux essieux moteurs, et les semi-remorques deux ou trois essieux. Il y a moins de trains routiers, mais ils sont toutefois suffisamment nombreux et ils ont habituellement deux ou trois essieux par remorque, et moins d'autobus, ces derniers ont généralement un ou deux essieux arrière. Certains pays possèdent des trains routiers multi-remorques qui ont jusqu'à cinq essieux par remorque.

Le Projet DIVINE utilise des véhicules d'essais instrumentés qui permettent d'étudier des essieux simples, tandem et tridem, ainsi qu'une semi-remorque et tracteur de cinq essieux. L'essai de chargement dynamique accéléré CAPTIF est seulement représentatif d'un essieu simple.

D'après l'enquête de 1992, la majorité des poids lourds utilisés dans les pays Membres de l'OCDE, y compris les camions rigides, les tracteurs, les semi-remorques et les trains routiers, ont des suspensions à lames d'acier, et la plupart de ces suspensions sont du type à ressorts à lames multiples avec frottement élevé. La même étude a montré que la majorité des autobus est équipée de suspension pneumatique. Dans la plupart des pays, on a noté une forte tendance vers l'utilisation de suspensions pneumatiques, ainsi qu'une plus grande attention accordée à la conception des suspensions mécaniques.

Les véhicules d'essai DIVINE équipés de suspensions mécaniques et de suspensions pneumatiques ont été utilisés pour les essais sur les ponts en Australie et en Suisse et au cours des essais sur la répétabilité spatiale en France. L'essai de chargement dynamique accéléré CAPTIF a permis de

comparer directement une suspension mécanique et une suspension pneumatique pour un essieu simple dans des conditions contrôlées.

Au cours de l'étude de l'OCDE (1992), on a également noté que la plupart des essieux des véhicules lourds étaient équipés de pneus jumelés, la seule exception notable étant l'essieu directeur habituellement équipé de pneus simples de largeur "normale" (moins de 310 mm), et les essieux tridem des semi-remorques habituellement équipés de pneus simples super-larges (plus de 310 mm).

Le Projet DIVINE utilise des véhicules d'essai principalement équipés de pneus jumelés. Cependant, l'essai de chargement dynamique accéléré CAPTIF utilise de pneus simples super-larges sur les deux pistes afin d'accélérer le rythme de dégradation de la chaussée pour les deux suspensions. Une description plus détaillée des installations, des équipements et des véhicules utilisés dans le Projet DIVINE se trouve en Annexe B.

Effets du profil en long

Le Groupe d'experts de l'OCDE de 1992 a trouvé que les longueurs d'onde à la surface de la chaussée qui excitent le rebondissement de la caisse et le tangage à des vitesses de trafic normales sont de l'ordre de 4 à 20 m, alors que les longueurs d'onde qui excitent le débattement de l'essieu sont de l'ordre de 1 à 4 m. La manière dont les longueurs d'onde les plus grandes à la surface de la chaussée excitent les mouvements de rebondissement et de tangage du véhicule dépend d'un effet interactif des dimensions de l'empattement du véhicule et de sa vitesse. Cet effet est dénommé "filtrage lié à l'empattement".

Différents moyens utilisés pour mesurer les profils sont également indiqués dans l'étude de 1992. Des profilomètres à laser à grande vitesse ont été utilisés dans le Projet DIVINE chaque fois que cela était possible. A la fois les courtes et les grandes longueurs d'onde ont été prises en compte dans les analyses des profils en long de la chaussée et des ponts.

Techniques d'essai

L'étude de l'OCDE de 1992 indique que, si les mesures du chargement dynamique de roue, à bord des véhicules, posent quelques problèmes, il existe d'autres moyens précis et fiables pour effectuer ces mesures. Les techniques de mesure à partir de la chaussée sont également disponibles, y compris les systèmes de pesage en marche (WIM - *Weigh-In-Motion*) (COST 323, 1995). Des capteurs WIM à faible coût tels que des barreaux piézocéramiques ou des tapis capacitifs ont été développés et commercialisés au cours de cette décennie. Les logiciels nécessaires pour le traitement et l'analyse des données sont également disponibles, et le concept de pesage en marche avec capteurs multiples (*Multiple-Sensor*, MS-WIM) est apparu (Glover et Newton, 1991). Ceci est devenu un outil de recherche efficace pour étudier les charges dynamiques d'essieu et de véhicule sur les chaussées (Cebon et Winkler, 1991). En outre, de plus en plus de simulateurs routiers sont disponibles et utilisés.

Toutes ces techniques ont été employées dans le Projet DIVINE. Cinq véhicules d'essai instrumentés et étalonnés ont été utilisés : deux camions à deux essieux, exploités par l'Administration fédérale des routes des États-Unis (FHWA) et par le Laboratoire de recherche sur les transports du Royaume-Uni (TRL), un camion à trois essieux utilisé par le VTT (Finlande), un tracteur semi-remorque à cinq essieux exploité par le Conseil National de la Recherche du Canada (NRC) et une semi-remorque à un essieu utilisée par l'Université de Hanovre (Allemagne). Deux chaussées d'essai instrumentées, exploitées par la FHWA et le VTT, ont également été utilisées. Deux grilles de pesage en marche à

capteurs multiples ont été construites et exploitées par le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (France) et le TRL du Royaume-Uni, sur des tronçons appropriés du réseau routier public. Le simulateur routier de NRC, Canada, est également utilisé dans le Projet DIVINE.

Simulation par ordinateur

Le rapport de l'OCDE de 1992 a établi que les techniques pour simuler la dynamique verticale et prédire les charges dynamiques par roue sont relativement précises et bien développées. Toutefois, ces méthodes n'ont pas fait l'objet de comparaison croisée, et n'ont pas été testées dans un environnement suffisamment large, pour permettre la recommandation de critères d'évaluation des véhicules sur une base nationale ou internationale. En outre, il était nécessaire d'assurer une validation adéquate de ces modèles vis-à-vis des données mesurées, obtenues dans des conditions réelles. Un certain nombre de modèles existants ont été évalués dans le Projet DIVINE, pour déterminer les caractéristiques génériques d'un modèle fiable et pour aider au processus de validation de ces modèles.

II.2.3. Procédures de dimensionnement structurel des chaussées

Dimensionnement empirique

Les procédures empiriques de dimensionnement ont été adoptées dans de nombreux pays en se basant sur le CBR (*Californian Bearing Ratio*) et en ajustant les données CBR/circulation/épaisseur de la structure en fonction des conditions environnementales locales, des types de trafic et de chaussée (voir l'annexe A). Les modèles empiriques sont limités par le fait qu'ils ont été développés à partir d'analyses de régression des données expérimentales et d'observations. Pour cette raison, si ces modèles sont utiles lorsque l'on ne comprend pas le mécanisme de la performance des chaussées, ils ne devraient pas être utilisés en dehors de l'éventail de données qui a servi à les développer.

D'autre part, une enquête restreinte sur la fiabilité du dimensionnement, conduite récemment en Australie auprès d'ingénieurs expérimentés (Potter, 1996), a montré que les chaussées dimensionnées à l'aide de l'abaque empirique australien de l'épaisseur de la grave, basée sur les courbes établies antérieurement (1962) par le RRL (Royaume-Uni), présentent une faible probabilité de détérioration prématurée (voir également l'Annexe A). Même si les réponses à l'enquête ne sont pas très homogènes, la réponse moyenne est que les chaussées dimensionnées conformément à l'abaque ont 85% de probabilité de pouvoir supporter un trafic supérieur à celui pour lequel elles sont dimensionnées. En d'autres termes, il existe un conservatisme inhérent à ces procédures de dimensionnement empiriques.

Essai routier AASHO

Pour prendre en compte à la conception l'amplitude et le type de charges qu'une route devra supporter durant sa durée de vie, de nombreuses tentatives ont été faites en vue d'établir des relations d'équivalence entre la performance de la chaussée et l'amplitude des charges à l'essieu. L'essai routier AASHO (*American Association of State Highway Officials*) a constitué une expérience significative à cet égard. Le principal objectif de la recherche consistait à établir les relations entre performance, dimensionnement structurel (c'est-à-dire, épaisseurs des composantes de la structure de chaussée) et chargement (c'est-à-dire, l'amplitude et le taux d'application des charges à l'essieu). Le concept original d'équivalence de charge à l'essieu développé à partir de l'essai routier AASHO a été exprimé sous la

forme d'une "loi de puissance". En raison d'un exposant 4 obtenu à partir des données d'essais, la loi est connue sous le nom "loi de la puissance quatrième" (voir également en Annexe A).

Comme dans le cas des procédures de dimensionnement empiriques qui ne devraient pas être utilisées en dehors de l'éventail des données sur lesquelles le modèle a été développé, l'utilisation de la "loi de la puissance quatrième" risque de ne pas être adaptée à toutes les situations à moins que les conditions d'environnement, de trafic, le type de chaussée et les méthodes de construction soient identiques ou très proches de ceux de l'Essai AASHO. De plus, il se peut que les facteurs d'endommagement par les véhicules tirés de l'essai AASHO ne donnent pas une indication de la performance à long terme de la chaussée, qui dépend d'un ensemble d'autres facteurs.

Dimensionnement mécaniste

Le dimensionnement des chaussées est passé de l'approche empirique à une approche plus fondamentale dans laquelle la chaussée est traitée comme une structure de génie civil. Grâce aux connaissances sur les propriétés des matériaux constitutifs, cette approche est accessible à une analyse, premièrement, de la *réponse* de la chaussée à une charge appliquée (c'est-à-dire, les contraintes, déformations et déplacements développés dans la structure en réponse à l'application d'une charge) et, deuxièmement, de sa *performance* lorsqu'elle est soumise à de nombreuses répétitions de charges appliquées – c'est-à-dire la déformation progressive de tous les matériaux et l'initiation et la progression des fissures dans les matériaux liés (avec des liants bitumineux ou hydrauliques). Divers modèles de performance ont été adoptés pour prévoir le comportement à long terme de la chaussée.

Essais accélérés de chaussée

Les services des routes ont tendance, depuis ces dernières années, à mener des programmes de recherche importants qui combinent le suivi de la performance à long terme de chaussées en service avec les essais accélérés en vraie grandeur (EAVG) et les essais de caractérisation des matériaux en laboratoire, afin de tenter de mieux comprendre la performance des chaussées routières.

La première utilisation des EAVG a porté sur la comparaison empirique des différents matériaux et configurations de chaussée sous des configurations de chargement différentes. Les résultats de ces essais forment la base des procédures actuelles de dimensionnement de chaussées et de sélection des matériaux actuels. Une utilisation secondaire a porté sur l'évaluation des modèles théoriques de réponse de la chaussée et de comportement des matériaux.

En raison de sa nature, l'EAVG n'est pas capable de prendre en compte l'interaction des facteurs environnementaux et des charges, et en particulier la détérioration des matériaux de la chaussée exposés au soleil, à l'eau et au vieillissement. Il est clairement démontré que l'environnement dans lequel une charge est appliquée, en présence d'humidité et de températures extrêmes en particulier, a une influence majeure sur les effets de la charge.

L'EAVG a été adopté pour l'Elément 1 de Recherche du Projet DIVINE parce que l'objectif principal était de comparer la performance d'une chaussée souple bien définie sous deux types de suspension différents et, ainsi, de "noter" les systèmes de suspension. Une telle étude n'aurait pas pu être conduite à l'aide d'un essai à long terme sur le terrain parce que, outre le temps nécessaire pour recueillir les données, le contrôle des conditions de trafic (c'est-à-dire, s'assurer que la même charge est appliquée au même tronçon de chaussée par deux systèmes de suspension différents), le contrôle de l'environnement et le contrôle strict du processus de construction n'auraient pas été faisables. Par ailleurs, il était impératif que l'EAVG soit conduit en association avec d'autres études, non seulement dans le cadre de l'Elément 1

de Recherche (caractérisation en laboratoire, caractérisation des suspensions, etc.), mais également avec les autres Éléments si l'on souhaitait obtenir une meilleure compréhension de l'interaction de la charge dynamique de la roue avec la route.

II.2.4. Coût du cycle de vie

Le coût du cycle de vie d'une chaussée (CCV) permet de comparer l'ensemble des coûts durant la vie d'une chaussée et offre la possibilité d'affecter des coûts de la chaussée économiquement efficaces à l'usager de la route. L'efficacité économique est obtenue si les coûts totaux tout au long de la vie (y compris les coûts pour l'usager et les coûts externes) sont minimisés. En pratique, ceci signifie que les options de dépense existantes ou nouvelles sont examinées par rapport à leurs mérites économiques relatifs. De nombreux coûts, différentiels de coût et avantages potentiels peuvent être pris en compte dans le CCV (Sayers, 1978). De manière générale, toutefois, on considère dans le coût de cycle de vie les éléments suivants :

- Les catégories de coûts, y compris le capital initial investi et les dépenses prévues de réhabilitation et d'entretien courant que l'Administration routière devra encourir sur la période économique de l'analyse pour chaque option de CCV. Les coûts externes des accidents, de la pollution, du bruit devraient également être quantifiés et inclus.
- Les différentiels de coût, y compris les économies en temps de parcours par rapport au temps de parcours existant (pour les nouvelles installations), les économies sur les coûts d'exploitation des véhicules par rapport aux coûts existants (pour les installations nouvelles et existantes) et tout autre avantage ou économie externe quantifiable généré.

En Australie, une étude paramétrique a récemment été conduite (Martin,1996). Elle porte sur l'influence que la performance de la chaussée a sur le coût du cycle de vie de la chaussée (CCV), en examinant les coûts totaux (coûts pour l'usager plus coûts pour les services des routes pour l'entretien et la réhabilitation) dans une analyse du bénéfice actualisé sur une période de 30 ans. L'étude a utilisé un réseau modèle défini, composé de longueurs de routes principales définies, chacune des sections étant dans un état donné d'uni moyen et soumise à des niveaux de trafic moyen. Ceci a montré que les coûts totaux les plus faibles sont obtenus en procédant à une réhabilitation dont la stratégie est de restreindre le défaut d'uni maximal de la chaussée.

Une analyse du coût total dans le cadre d'un budget non restreint montre que, si les coûts pour l'usager étaient inclus dans le processus d'optimisation du coût total, il n'y aurait pas d'avantage global si on permet au réseau de se détériorer au-delà d'une valeur de la mesure d'uni NAASRA[2] de 150. Un faible taux de détérioration de la chaussée conduit à des réductions substantielles des coûts totaux provenant principalement des économies faites par les services routiers sur les coûts de réhabilitation, alors que des taux de détérioration élevés se traduisent par des coûts totaux plus élevés, pour les mêmes causes.

Les coûts annuels pour un service des routes dans une analyse du CCV d'une chaussée dépendent fortement du taux prévu de détérioration de la chaussée. Par exemple, l'étude paramétrique australienne a trouvé que la variation des coûts annuels pour un service des routes, par rapport à un taux de référence donné de détérioration de la chaussée, représentait une augmentation de 45% pour un taux élevé de détérioration de la chaussée et une diminution de 32% pour un taux de détérioration faible.

2. Il existe plusieurs formules de conversion entre la mesure d'uni NAASRA et l'IRI. Généralement, on considère qu'une valeur NAASRA de 150 correspond à un IRI de 4.4 m/km (Prem 1987).

Comme le montrent les résultats ci-dessus, des variations très importantes dans les coûts annuels pour les services des routes au cours du cycle de vie de la chaussée apparaissent en fonction des variations observées de la détérioration de la chaussée. Cette situation est préoccupante parce que la prédiction de la détérioration de la chaussée, étant influencée par les diverses activités d'entretien, n'est pas connue actuellement en termes quantitatifs. Ce résultat renforce le besoin de développer des modèles de performance des chaussées précis qui peuvent prédire la performance de la chaussée telle qu'elle est influencée par les divers niveaux d'activités d'entretien, parce que le CCV de la chaussée et la gestion du patrimoine routier ne disposent pas, à ce jour, de base quantitative sur laquelle on pourrait démontrer que les coûts actuels des services des routes et les niveaux d'intervention sont économiquement rentables.

Il ressort de ces résultats que, si des charges dynamiques plus élevées se traduisent par des taux plus élevés de détérioration de la chaussée, il peut y avoir clairement des coûts importants pour les services des routes et la société dans son ensemble. D'autre part, si les charges dynamiques peuvent être réduites en encourageant l'utilisation de suspensions peu agressives — ce qui conduirait à une réduction du taux de détérioration de la chaussée — les économies pourraient être importantes. Une meilleure compréhension de l'interaction véhicule-infrastructure, en particulier des charges dynamiques et du taux de détérioration de la chaussée, est également nécessaire pour progresser dans les techniques du CCV.

II.2.5. Influence de la non-uniformité de la chaussée – méthodes d'analyse

Il est bien connu que, durant la phase de construction d'une chaussée, des variations dans la qualité des matériaux constitutifs des couches, dans la teneur en eau, et dans les techniques de construction peuvent toutes se traduire par une hétérogénéité et des variations longitudinales et transversales dans la structure de la chaussée. Parfois, cette variation spatiale peut avoir une incidence sur la performance à la fois structurelle et fonctionnelle de la chaussée. Ceci est dû au fait que, lorsque les charges liées aux véhicules sont appliquées à la chaussée, ces variations spatiales peuvent se traduire par le développement d'une répartition spatiale non uniforme de la contrainte, de la déformation et de la déflexion dans la structure de chaussée qui, à son tour, peut entraîner une répartition non uniforme des défauts à l'intérieur de la chaussée. Ces défauts se manifestent finalement par des différences visibles dans la détérioration de la chaussée, par exemple, certaines zones de la surface de la chaussée présenteront une fissuration plus intense que d'autres et/ou l'étendue de la déformation permanente le long des chemins de roulement peut varier. Les influences externes telles que l'infiltration de l'eau dans la chaussée, le séchage des matériaux de chaussée ou les cycles gel/dégel contribueront évidemment aussi à une répartition non uniforme des défauts.

Il était donc essentiel pour le Projet DIVINE, en particulier pour l'Elément 1 de Recherche, d'être capable de distinguer la détérioration de la chaussée due à toute hétérogénéité de la chaussée et celle directement liée à l'application des charges dynamiques sur la chaussée résultant de la dynamique pneu-suspension.

Un effort majeur a donc été fait pour s'assurer, dans toute la mesure du possible, que la qualité des matériaux utilisés dans la chaussée de CAPTIF et la méthode de construction étaient aussi uniformes que possible. Ceci a nécessité la conduite d'un vaste programme d'essai en laboratoire sur les matériaux de la chaussée pour vérifier leur conformité avec les spécifications, ainsi que des essais étendus sur toutes les couches en cours de construction pour s'assurer que la qualité des couches ainsi mises en oeuvre réponde à la fois aux exigences en matière de compactage et d'épaisseur, et que la variation de ces propriétés soit aussi faible que possible.

Après la construction, mais avant que ne commencent les cycles de chargement, des mesures importantes ont été faites en utilisant le déflectomètre à boulet (FWD - *Falling Weight Deflectometer*) dont les résultats (mesures du bassin de déflexion) représentent les effets combinés de la variabilité des matériaux (épaisseur, compactage, teneur en eau, etc.) dans les couches de forme, de fondation et la couche de surface bitumineuse. Il n'était pas seulement primordial de s'assurer du degré de variabilité le long de chaque chemin de roulement, mais également, et de manière encore plus importante, du degré de variabilité entre les deux chemins de roulement. Des mesures au FWD ont également été effectuées sur toutes les couches lors de leur mise en oeuvre.

BIBLIOGRAPHIE

BARBOUR, I.A. (1993), "Multiple-sensor Weigh-in-Motion Trials at Abingdon (A34)", Research Report 375. Transport Research Laboratory, Crowthorne.

CANTIENI, R. (1983), "Dynamic load tests on highway bridges in Switzerland - 60 years experience at EMPA", Report No. 211. Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research (EMPA).

CANTIENI, R. (1992), "Dynamic Behaviour of Highway Bridges under the Passage of Heavy Vehicles", Report No. 220. Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research (EMPA).

CEBON, D. et WINKLER, C.B. (1991), "Multiple-sensor Weigh-in-motion: Theory and Experiments", Transportation Research Record No. 1311, pp. 70-78. TRB, Washington DC.

COST 323 (1995), *Pre- and Post-Proceedings of the first European Conference on Weigh-in-motion of Road Vehicle*, March 8-10, Eds B. Jacob. ETH, Zurich.

EYMARD, R., GUERRIER, F. and JACOB, B. (1990), "Dynamic Behaviour of Bridges under Full Moving Traffic", April-May, US-European Symposium on Bridges, Baltimore.

GLOVER, M.H. et NEWTON, W.H. (1991), "Evaluation of a Multiple-sensor Weigh-in-motion System", Research Report 307. Transport Research Laboratory, Crowthorne.

HAUNG, H. (1993), *Pavement Analysis and Design*, Prentice Hall, New Jersey.

INTERSTATE COMMISSION (1989), *Road User Charges and Vehicle Registration: A National Scheme*, Australian Govt. Printing Service, Canberra.

JACOB, B. et CARRACILLI, J. (1983), "Mesure et Interprétation des Charges Dynamiques dans les Ponts - Etude de la Fatigue", Rapport final de recherche, CECA 7210KD311. Juillet, LCPC, Paris.

MARTIN, T.C. (1996), "A Parametric Study of the Influence of Pavement Performance on Life-cycle Costing", ARRB Transport Research, Working Document WD TI 96/019, Juin, ARRB.

OCDE (1992), RECHERCHE EN MATIERE DE ROUTES ET DE TRANSPORTS ROUTIERS, *Chargement dynamique des chaussées*, OCDE, Paris.

OCDE (1994), RECHERCHE EN MATIERE DE ROUTES ET DE TRANSPORTS ROUTIERS, *Entretien et réhabilitation des routes : financement et stratégies d'affectation*, OCDE, Paris.

POTTER, D.W., JAMESON, G.W., MAKAROV, A., MOFFATT, M.A. et CROPLEY, S.M. (1996), “A Basis for Incorporating Reliability in the AUSTROADS Pavement Design Procedures”, ARRB Transport Research Working Document WD TI96/014, June, ARRB.

PREM, H. (1987), "Road Roughness Influence on Suspension Performance", *Proceedings ARRB Symposium on Heavy Vehicle Suspension Characteristics* 23-25 March. Australian National University, Canberra, A.C.T

SAYERS, C.R. (1978), *Optimisation in the Transport Sector: A Much Neglected Objective*, Proceedings 4th Australian Transport Research Forum, Perth, 24-26 May.

ULLIDTZ, P. (1987), *Pavement Analysis*, Developments in Civil Engineering, 19. Elsevier.

WILLIS, R. (1851), “An Essay on the Effects Produced by Causing Weights to Travel over Elastic Bars”, Addendum to Barlow, P. *A Treatise on the Strength of Timber, Cast and Malleable Iron*, John Weale, London.

CHAPITRE III – LE SYSTÈME VÉHICULE-INFRASTRUCTURE : UNE NOUVELLE APPROCHE

III.1. Introduction

Depuis de nombreuses années, diverses méthodes ont été utilisées pour établir une relation entre la détérioration des éléments de l'infrastructure routière et les effets des véhicules qui l'empruntent. Les méthodes de dimensionnement des chaussées, par exemple, ont reconnu les effets des véhicules lourds de marchandises en incluant des relations entre, d'une part, le poids statique des véhicules et les charges à l'essieu et, d'autre part, "l'endommagement de la chaussée" qu'ils provoquent. Ces relations relativement simples ont été améliorées ces dernières années à travers le développement d'une approche plus mécaniste pour le dimensionnement des chaussées, fondée sur les caractéristiques des matériaux et leur réponse à des charges statiques mobiles imposées plutôt qu'aux charges dynamiques rencontrées dans la pratique. Un manque de connaissance et d'information a empêché le développement de méthodes encore plus avancées de dimensionnement des chaussées, capables de répondre au changement de régime des charges dynamiques susceptible d'intervenir au cours de la durée de service de la route.

La situation a évolué de manière assez différente pour les ponts. Il est devenu évident au milieu du siècle dernier qu'il n'était pas suffisant de prendre seulement en compte les effets des charges statiques dans le cas des ponts ferroviaires. Ainsi, la tolérance de chargement dynamique (DLA - *Dynamic Load Allowance*) pour les charges appliquées aux ponts ferroviaires a été définie comme étant fonction de la portée moyenne du pont. Sur cette base, le chargement des ponts routiers a fait usage de la même philosophie au début du siècle. Au début de la décennie 1970, les méthodes expérimentales et informatisées étaient suffisamment développées pour prouver que la réponse dynamique d'un pont aux actions des véhicules lourds était principalement fonction, d'une part, de la fréquence propre du pont et, d'autre part, de la bande de fréquences et de l'amplitude des chargements dynamiques de roue appliqués par le camion lors de son passage sur le pont. Aujourd'hui, le besoin se fait sentir d'un complément de travail pour conduire à une plus grande compréhension de l'interaction véhicule-pont et pour prendre en compte les types de véhicules, de suspension et le profil en long de la couche de roulement (voir l'annexe A pour plus de détails sur le développement de l'interaction dynamique entre le dimensionnement du pont et le véhicule).

Alors que les nouvelles normes sur le chargement des ponts ont évolué assez lentement, les développements dans la conception et la technologie des véhicules ont, quant à eux, progressé relativement vite pour répondre à la demande du marché. Ceci s'est traduit par des améliorations dans l'efficacité, la sécurité et l'impact sur l'environnement. Le développement des systèmes de suspension pneumatique est principalement dû à la prise en compte des besoins des exploitants, alors que leurs effets potentiels sur la durée de vie des chaussées et des ponts ne sont devenus évidents qu'après. Même si quelques aspects seulement de la conception des véhicules prennent en compte les conséquences sur l'infrastructure, la capacité des essieux, des suspensions et des pneus, et les espacements entre essieux ont été dictés par les réglementations en matière de limitation de poids.

Il est clair que la conception, l'exploitation et l'entretien des composantes du système véhicule-infrastructure sont en fait fortement interdépendants. Il est également clair que les besoins des propriétaires de l'infrastructure, souvent un service gouvernemental local ou national, doivent être équilibrés par rapport aux besoins de l'usager de la route et, en particulier, à ceux de l'industrie des transports routiers. Pour y parvenir, il est nécessaire de recourir à une nouvelle approche qui considère le véhicule et l'infrastructure comme un système dynamique interactif. Afin d'optimiser certaines caractéristiques clés de ce système, ainsi que sa performance globale et son équilibre d'ensemble, il est nécessaire de considérer comment le système peut être effectivement modélisé. Ceci requiert une plus grande compréhension du système que ce n'est le cas aujourd'hui.

Le Projet DIVINE a spécialement été conçu pour traiter le système véhicule-infrastructure de manière plus intégrée et il constitue la première approche de ce genre. Chaque Elément de Recherche du Projet DIVINE a été conçu pour contribuer à cette meilleure compréhension. Dans le but d'offrir une description détaillée du système véhicule-infrastructure, les Sections III.2 et III.3 ci-dessous identifient les principales composantes des chaussées, ponts et véhicules et les principales caractéristiques de leur comportement interactif. La Section III.4. présente les modèles conceptuels des systèmes véhicule-chaussée et véhicule-pont, et la Section III.5. fournit une description résumée des différents éléments de recherche du Projet DIVINE.

III.2. Composantes du système

III.2.1. Chaussées

Comme expliqué dans le Chapitre II, le Projet DIVINE s'est concentré sur les chaussées souples. Les chaussées souples sont communément utilisées dans le cas de trafic dense et sont donc potentiellement plus vulnérables aux cycles de chargement dynamique et aux défauts d'uni. Leur composition — typiquement des matériaux bitumineux viscoélastiques et des matériaux non liés dont le comportement non linéaire est sensible aux contraintes appliquées — fait que leur réponse au chargement dynamique est plus complexe.

Le *revêtement* d'une chaussée souple est généralement constitué d'une couche bitumineuse relativement rigide. Il peut se déformer par orniérage (c'est-à-dire par compression et fluage de cette couche, ou d'une ou plusieurs couches sous ce revêtement) ou en conséquence d'une fissuration (par flexion). Les modes typiques de détérioration du revêtement sont la fissuration longitudinale ou transversale et une accumulation de déformations locales qui conduit à l'orniérage. L'étendue de la fissuration ou le développement de l'orniérage constituent un indicateur important de l'état de la chaussée.

La *couche de base* ou *de fondation* d'une chaussée souple constitue la couche structurellement la plus importante de la construction. Elle peut comporter des matériaux en grave non liée ou des matériaux bitumineux, en fonction du niveau de service requis ou de la disponibilité en matériau. En cours d'exploitation, une détérioration de la couche de base peut être provoquée par une sollicitation excessive par compression ou cisaillement, conduisant au tassement des couches granulaires ou à la déformation des couches bitumineuses. Ici également, l'étendue de cette déformation est un indicateur critique de l'état structurel de la couche. Dans le cas d'une couche de base bitumineuse, les méthodes de dimensionnement considèrent souvent la fatigue (par flexion) du matériau comme un mode principal de dégradation.

La *plate-forme* est la "couche" la moins rigide de la chaussée. Elle correspond au matériau que le reste de la chaussée est conçu pour protéger, en répartissant les charges par roue appliquées de manière à ce que les contraintes en compression et les déformations dans le sol support soient minimisées et

maintenues à un niveau inférieur à la contrainte critique pour la plate-forme concernée. Les plates-formes sont habituellement constituées de matériaux à grains fins, argiles ou sables, l'argile étant souvent sensible à l'humidité. *Stricto sensu*, la plate-forme n'est pas une couche de chaussée ; elle constitue la partie supérieure du terrassement. Cependant, il est essentiel d'inclure la plate-forme dans le système véhicule-chaussée.

III.2.2. Ponts

Même s'il existe une multiplicité de conceptions de ponts, elles peuvent être toutes caractérisées comme étant des systèmes mécaniques dans lesquels les paramètres les plus importants (dans le contexte actuel) sont le système statique [travées, continuité entre travées (joints intermédiaires), et états des joints aux approches], la masse et la rigidité en flexion et en torsion de la superstructure du pont. Ces paramètres déterminent les fréquences propres du pont. Ceci s'applique aux ponts monolithiques et aux composantes structurelles des ponts avec éléments préfabriqués. Ces composantes comprendront le tablier du pont, les poutres (poutre principale et entretoises), et les câbles (dans le cas de ponts à hauban et ponts suspendus). Les éléments de la fondation de la structure (piles et culées) qui ne sont pas clairement séparés de la superstructure du pont influencent également de manière notable les propriétés dynamiques du pont. Outre les fréquences propres du pont, la capacité d'amortissement associée peut avoir une importance en particulier pour les ponts de courte portée. Les superstructures monolithiques qui sont bien séparées des éléments d'appui sont faiblement amorties (jusqu'à 1% du seuil critique) alors que les structures composites étroitement associées aux éléments d'appui ont un amortissement plus élevé (plus de 1% du seuil critique).

La concordance de fréquences et le profil en long du tablier du pont ainsi que celui des approches du pont constituent les principaux paramètres dans le processus d'interaction véhicule-pont. Les approches de nombreux ponts présentent des défauts d'uni en raison de tassements différentiels et, en outre, les joints entre la superstructure et les approches (ou les joints intermédiaires) sont souvent de qualité relativement médiocre. Ceci est très important pour les ponts de courte portée alors que, pour les ponts de moyenne et longue portée, les charges dynamiques de roue excitées par ces caractéristiques du profil en long sont habituellement atténuées par le pont et amorties par le véhicule avant que ce dernier atteigne une section critique du pont.

III.2.3. Véhicules

Le poids total en charge et la charge à l'essieu du véhicule constituent les paramètres de chargement qui sont traditionnellement examinés lors de la conception des routes et des ponts. Même s'il y a une meilleure appréciation des effets d'autres paramètres, il n'est pas encore possible de quantifier ces effets de manière à contribuer au développement d'un modèle général du comportement du système véhicule-route. La situation est un peu meilleure pour le dimensionnement des ponts où des méthodes expérimentales et informatisées sont actuellement à un niveau avancé. Il existe un certain nombre de caractéristiques du véhicule qui affectent l'interaction de celui-ci avec les chaussées et les ponts, et les plus importantes sont décrites dans les développements qui suivent.

Le *pneu* agit, via ses propriétés pneumatiques et mécaniques, pour envelopper et absorber des petites perturbations, répartir la charge par roue sur une surface acceptable de la chaussée et apporter une déformation verticale élastique. Ses performances, vis-à-vis du véhicule et de la chaussée, sont fortement dépendantes de la pression de gonflage et de la charge par roue. La charge sur le pneu et la répartition des contraintes en compression dans la "surface de contact" ou "l'empreinte de contact" sont des indicateurs

importants de la réponse du pneu et de la réponse potentielle de la chaussée. Les performances du pneu dépendent essentiellement du choix de la taille et de la pression de gonflage par rapport à la charge portée. Pour une charge donnée, des pneus jumelés ont en général une surface de contact plus large et appliquent des contraintes en compression moins élevées que ne le font des pneus super-larges. Il a été démontré que le type de pneu est très important pour la performance de la route sur laquelle il est appliqué.

L'*essieu* ajoute une masse relativement importante entre le pneu et la suspension du véhicule, et il contribue aux mouvements d'oscillations qui interviennent à des fréquences relativement élevées.

La *suspension* sert de ressort et d'amortisseur entre les essieux et la caisse du véhicule. Des progrès notables ont été accomplis ces dernières années dans la technologie des systèmes de suspension. Par exemple, des suspensions pneumatiques permettent d'obtenir une rigidité relativement faible et, en conséquence, une fréquence de rebondissement relativement basse pour une charge à l'essieu donnée. Elles offrent également sous charge des caractéristiques de déflexion progressive et souple. L'amortissement des systèmes de suspension pneumatique est assuré par des amortisseurs de choc hydrauliques qui sont sensibles à l'usure et perdent progressivement de leur efficacité.

La plupart des systèmes de suspension mécanique présentent une rigidité et un frottement plus élevés que les suspensions pneumatiques, entraînant des déflexions soudaines sous charge. Le frottement provoque un "blocage" des ressorts à lame d'acier tant que l'uni de la chaussée est bon et/ou que la vitesse du véhicule reste modérée. Dans ces conditions, le véhicule vibre sur les pneus seulement ce qui entraîne une rigidité de ressort relativement élevée et un faible amortissement. Avec un uni moins bon et/ou une vitesse plus élevée, les ressorts à lame d'acier se "débloquent", la rigidité de ressort décroît et la capacité d'amortissement de la suspension augmente notablement. En conséquence, la bande de fréquences de la charge par roue d'un véhicule équipé de suspension en acier peut varier dans une fourchette plus large. La capacité d'amortissement de ces suspensions dépend donc beaucoup de l'amplitude de l'excitation. L'amortissement sera plus élevé dans le cas d'une excitation de forte amplitude.

Les nouvelles conceptions des suspensions à ressort en acier en ont amélioré les caractéristiques par un faible frottement. Avec ce système, les lames d'acier individuelles se touchent aux extrémités seulement. Le cas dans lequel le ressort à lames d'acier est complètement bloqué ne peut pas se produire. En conséquence, la rigidité de ressort de la suspension est plus faible que pour une suspension en acier classique dans son état bloqué. Des amortisseurs de choc doivent être ajoutés parce que la capacité d'amortissement des lames d'acier est bien plus faible que dans le cas des anciens modèles de suspensions en acier mentionnés ci-dessus. Ainsi, la fréquence propre de ce type de suspension varie beaucoup moins que dans le cas des anciens modèles de suspensions en acier. Toutefois, la bande de fréquences de la charge par roue, qui dépend de la bande de fréquences du profil de la route ainsi que des fréquences de la suspension, varie de manière plus notable.

Les *groupes d'essieux* tels que tandem ou tridem sont équipés généralement de dispositifs permettant de répartir et égaliser la charge entre essieux du groupe. Dans le cas des suspensions pneumatiques, une telle répartition et une telle égalisation de la charge sont, en principe, simples et efficaces et elles sont obtenues par l'interconnexion des systèmes pneumatiques sur tous les essieux. Dans le cas de suspensions mécaniques, les liaisons formant le mécanisme de répartition de la charge peuvent être très efficaces pour égaliser la charge entre les essieux, mais elles peuvent entraîner des mouvements de suspension supplémentaires, associés en particulier au débattement de l'essieu. Les essieux équipés de suspensions pneumatiques ont tendance à se comporter de façon indépendante aux fréquences d'oscillation d'essieux parce que, à ces fréquences, la circulation de l'air entre suspensions adjacentes reste limitée.

La *masse suspendue* correspond à la partie du véhicule portée par la suspension. Elle a un effet dominant sur la charge dynamique par roue, en particulier la partie associée au rebond de la masse suspendue sur la suspension et/ou les pneus.

III.3. Principales caractéristiques du système

Malgré la complexité globale du système véhicule-infrastructure, il est clair qu'un certain nombre de caractéristiques sont particulièrement importantes vis-à-vis du comportement du système et de ses composantes. Elles ont donc été prises en considération dans le Projet DIVINE et sont décrites dans les sections ci-après.

III.3.1. Profil en long de la chaussée

Le profil en long de la chaussée a une influence sur l'excitation verticale du véhicule et sur l'amplitude des mouvements ainsi générés de la masse suspendue et de l'essieu qui provoquent un chargement dynamique. Le profil peut être décrit comme les modifications dans le niveau en élévation de la surface de la chaussée en fonction de la distance, ou en termes de longueurs d'ondes dominantes dans le profil et leur amplitude (la densité spectrale de puissance — par exemple, la spécification ISO de densité spectrale de puissance de déplacement). La précision des mesures du profil s'est améliorée considérablement au cours des dernières années. Les profilomètres à laser et les analyseurs de profil en long (APL), qui recourent à des accéléromètres précis et à des méthodes avancées de traitement de signaux, sont maintenant des techniques bien au point pour ce type de mesures. Pour les besoins des comparaisons internationales, des indices tels que l'indice international d'uni (IRI - *International Roughness Index*), qui comportent des indications pour la définition de qualités d'uni, ont été développés. La simple comparaison des densités spectrales qui peuvent être associées à l'IRI est également possible. Les relevés APL donnent davantage d'informations sur l'uni de la chaussée dans chaque plage de longueurs d'ondes (courtes, moyennes et longues).

III.3.2. Forces dynamiques appliquées par la roue

Les forces dynamiques appliquées par la roue sont celles intervenant au niveau de la zone de contact pneu-chaussée. Elles affectent à la fois la chaussée et le véhicule et elles peuvent être représentées par des données temporelles mesurées et calculées, ou encore par leur densité spectrale de puissance qui indique les fréquences dominantes impliquées. Elles peuvent également être résumées statistiquement à l'aide d'une fonction de densité de probabilité montrant les occurrences de valeur élevée, c'est-à-dire le Coefficient de chargement dynamique (CCD). La mesure précise de ces forces constitue un défi et les méthodes disponibles varient dans leur précision. Parmi les méthodes disponibles, les essieux instrumentés de véhicules fournissent une technique de mesure largement acceptable et bien au point sous réserve d'un étalonnage approprié.

Les systèmes de pesage en marche à capteurs multiples (MS-WIM) utilisant un nombre de capteurs suffisant sur une longueur de 25 à 50 mètres donnent un échantillonnage de ces forces dynamiques. Ces systèmes ont été introduits à l'origine au Royaume-Uni (Glover et Newton, 1991 ; Cebon et Winkler, 1991) et utilisés en France dans le cadre de l'Elément 5 du Projet DIVINE (Blab et Jacob, 1997). Le développement de ces systèmes continue (Jacob et O'Brien, 1994). Les valeurs échantillonnées peuvent être utilisées pour estimer les données statistiques de ces forces dynamiques telles que le CCD, les valeurs maxima et moyennes. En outre, certains outils avancés de traitement de signal

(techniques de reconstruction de signaux) pourraient être utilisés pour déduire les données temporelles des forces appliquées par la roue à partir de ces valeurs échantillonnées.

III.3.3. Accélération du véhicule

L'accélération verticale des essieux et de la masse suspendue offre un moyen de quantifier les mouvements de rebond du véhicule et de débattement de l'essieu. Les forces dynamiques appliquées par la roue sont liées, entre autres, à ces accélérations qui peuvent être représentées en tant que densité spectrale de puissance ou traitées plus avant pour estimer les CCD.

III.3.4. Déformations/déflexions des chaussées et des ponts

Les déformations et déflexions générées dans les couches de chaussée et dans les structures de ponts sont une réponse de la chaussée ou du pont aux charges dynamiques appliquées par les roues. Même si des techniques relativement fiables existent pour les chaussées, il est difficile de faire une mesure précise de ces réponses, et leur interprétation correcte nécessite de procéder à des corrections ou à des normalisations. Les déformations en traction et en compression peuvent être mesurées dans le revêtement, à la fois dans les directions longitudinale et transversale par rapport au sens du trafic. Les déformations en compression peuvent également être mesurées dans les couches de base et de fondation et dans la plate-forme.

La mesure de la déflexion et de la déformation dans les ponts utilise actuellement une technologie plus précise que dans le cas des chaussées. La mesure de la déflexion permet de se faire une opinion sur le comportement du pont dans son ensemble et elle constitue de ce fait la technologie préférée lors de l'étude des problèmes de tolérance de chargement dynamique. Les mesures de déformations locales sur des ponts soumis à des charges de trafic sont relativement communes pour les ponts en acier et les ponts en béton armé où il est nécessaire d'étudier les problèmes de fatigue. En outre, les mesures de déformation peuvent apporter des informations utiles sur les charges dynamiques des essieux et des véhicules appliquées sur le tablier du pont. Cette technique est étroitement liée à la technologie du pesage en marche (WIM) et elle a été utilisée aux États-Unis et ailleurs pour des mesures de poids dans le trafic sur routes.

III.3.5. Module de la chaussée et rigidité des ponts

L'application d'une charge statique ou dynamique sur une chaussée ou un pont entraîne une déformation de la structure. Dans le cas des ponts, la déformation provient de la flexion ; comme indiqué précédemment, elle peut être mesurée de manière assez simple et précise et il est possible d'en déduire la rigidité en torsion et en flexion du pont. L'hypothèse selon laquelle les chaussées travaillent en flexion a servi à mettre au point des techniques pour mesurer le bassin de déflexion après application d'une charge. A partir de cette mesure, on peut déterminer le module de la chaussée. Du fait des matériaux de construction utilisés pour la chaussée, le type de flexion ou de déformation de la chaussée est sensible aux facteurs environnementaux. Des mesures périodiques du module ou de la rigidité sous chargement d'une chaussée ou d'un pont peuvent être employées pour indiquer toute faiblesse ou évolution dans la structure. Malgré l'utilisation de techniques sophistiquées, la précision des mesures du module de la chaussée, en particulier, reste limitée. Dans le cas de mesures de module effectuées en laboratoire, une difficulté supplémentaire apparaît du fait de la nécessité de simuler les conditions de chargement réelles (temps de chargement, etc.).

Les équipements de mesure de la déflexion dynamique de la chaussée comme le déflectographe à boulet (FWD - *Falling Weight Deflectometer*) donnent des informations sur la déflexion de la chaussée par point de mesure, à la fois au niveau local sous la charge appliquée et à des distances données du point d'application de la charge. Ces informations peuvent être analysées pour chaque couche de la chaussée prise individuellement ou pour la structure dans son ensemble. La déflexion totale par unité de charge dynamique appliquée par le FWD donne une mesure fondamentale de la complaisance de la chaussée (l'inverse de la rigidité ou de la résistance).

III.3.6. Dégradation de la chaussée

Le terme de dégradation est normalement utilisé pour décrire la détérioration progressive de la chaussée. Celle-ci est souvent caractérisée par la fissuration en surface ou par l'orniérage qui peuvent concerner une ou toutes les couches de la chaussée. L'orniérage est exprimé comme le déplacement par rapport à la position d'origine de la surface de la chaussée, alors que la fissuration est généralement exprimée comme une longueur totale de fissures par unité de surface de la chaussée. Il est possible de faire une distinction entre fissuration longitudinale et transversale.

Le lien entre dégradation de la chaussée et déformations/déflexion n'est pas complètement compris, même s'il existe des modèles qui tentent d'expliquer et de prédire cette relation.

III.3.7. Fréquence propre d'un pont et amortissement associé

La fréquence propre fondamentale et l'amortissement d'un pont indiquent le risque des effets de la concordance de fréquences pour une fréquence dominante de charge par roue donnée agissant lors du passage d'un véhicule lourd. Si, dans tous les cas, la fréquence propre d'un pont est un paramètre important, l'amortissement ne joue un rôle significatif que dans le cas des ponts de courte portée, comme indiqué dans la Section II.2.2. Dans les cas relativement rares où la fréquence propre du pont domine lors du processus naturel d'affaiblissement de la vibration après que le véhicule a quitté le pont, la valeur de la fréquence propre et le coefficient d'amortissement associé peuvent être aisément déterminés à partir de ce processus. Dans les cas plus communs où le processus d'affaiblissement de la vibration est dominé par, non pas une, mais plusieurs fréquences propres du pont, des méthodes plus sophistiquées sont disponibles pour déterminer le comportement propre du pont. Parmi ces méthodes on peut citer l'AVT (*Ambient Vibration Testing* - essai de vibration ambiante) et le FVT (*Forced Vibration Testing* - essai de vibration forcée). Ces deux méthodes produisent un ensemble complet des fréquences propres et de l'amortissement de la structure, ainsi que les formes de modes associés dans la bande de fréquences considérée (par exemple, f = 2 - 20 Hz).

III.4. Modèles conceptuels

Les modèles conceptuels de systèmes véhicule-chaussée et véhicule-pont sont à la base d'une nouvelle approche de l'interaction des véhicules lourds avec l'infrastructure et fournissent également un cadre pour expliquer le champ des recherches conduites dans chaque Elément de Recherche du Projet DIVINE. Une explication plus détaillée, du point de vue des composantes étudiées du système et des aspects de l'interaction traités dans chacun des Eléments du Projet DIVINE, est donnée dans la section III.5.

III.4.1. Interaction véhicule-chaussée

La figure III.1. présente une illustration des composantes en interaction et des caractéristiques clés des performances du système véhicule-chaussée. Cette figure représente un camion circulant sur une chaussée souple présentant certaines caractéristiques d'uni de surface et de résistance structurelle. Une description physique complète de toutes les relations en présence est difficile à faire en raison de la complexité des systèmes dynamiques impliqués, et du fait que certains comportements sont liés à l'espace, d'autres au temps, et certains aux deux eu égard aux passages répétés des véhicules. En termes simples, les défauts d'uni de la chaussée génèrent la dynamique verticale du véhicule en mouvement et les charges dynamiques de roue, en entraînant des réponses de la chaussée qui contribuent à sa dégradation. Les réponses de la chaussée dépendent de la combinaison de la charge dynamique par roue, de la vitesse et de la résistance locale de la chaussée. Cette relation est compliquée par la profondeur à laquelle la réponse de la chaussée est mesurée et par l'influence de la surface de contact du pneu dans la répartition de la charge dynamique par roue appliquée à la structure de la chaussée. Avec le temps et des chargements répétés de véhicules lourds, le profil change en raison des déformations verticales de la surface qui sont partiellement influencées par l'accumulation d'orniérage de la chaussée. Ces modifications du profil à leur tour entraînent une modification des charges dynamiques de roue. Avec le temps également, la résistance structurelle de la chaussée change en raison de l'accumulation des effets de la réponse de la chaussée ainsi que des facteurs environnementaux. L'effet net sur les réponses et la dégradation de la chaussée dépendra de la relation spatiale entre la charge dynamique par roue, la modification du profil de la chaussée et les variations dans la résistance structurelle de la chaussée.

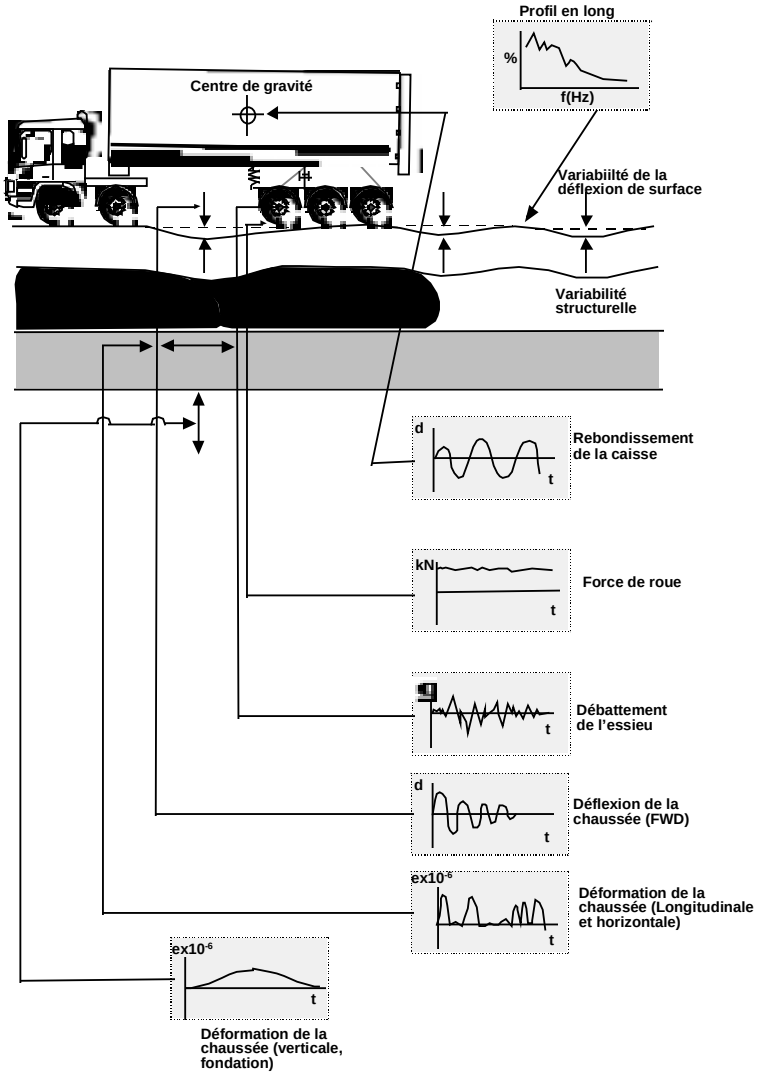
III.4.2. Interaction véhicule-pont

Etant donné que le processus d'interaction véhicule-pont est régi par les propriétés physiques et dynamiques des deux composantes impliquées, il convient de faire une distinction entre les ponts de moyenne à longue portée pour lesquels le composant "véhicule" est considéré dans son ensemble et les ponts de courte portée où le composant "véhicule" peut être réduit à un groupe d'essieu donné.

Ponts de moyenne à longue portée

Il n'y a véritablement interaction que si le pont est notablement plus long que le véhicule. Pour un tel type d'interaction, les deux composantes impliquées — chacune étant modélisée à l'aide d'un système à un seul degré de liberté — se rejoignent dans un système à deux degrés de liberté et montrent la même fréquence naturelle (voir figure III.2.). L'existence de l'interaction est facilement détectée parce que les deux fréquences naturelles du système à deux degrés de liberté diffèrent de celles du système à un seul degré de liberté (Cantieni, 1992). La modélisation des deux systèmes à un seul degré de liberté est relativement simple si la fréquence propre du pont n'est pas trop proche des modes naturels les plus élevés du pont et si les charges dynamiques de roue du véhicule sont dominées par le mode de rebondissement de la caisse. Si les fréquences impliquées sont pratiquement les mêmes, les fréquences naturelles du système couplé (véhicule-pont) dépendent premièrement du rapport entre les masses et deuxièmement des coefficients d'amortissement des deux systèmes. Sur la question du rapport entre les masses, un couplage important a été observé dans le cas où la masse modale du pont est 20 fois supérieure à la masse du véhicule. Ceci implique que l'interaction véhicule-pont peut survenir lorsque la masse du véhicule est de l'ordre de 5% de la masse modale du pont. Ceci est habituellement le cas pour les ponts de moyenne à longue portée.

Figure III.1. **Système véhicule-chaussée**



Dans le cadre des essais de ponts menés en Suisse pour l'Elément 6 de DIVINE, le couplage du système véhicule-pont a été clairement identifié dans le cas où le véhicule d'essai NRC équipé de suspensions acier traversait le pont Deibüel (fréquence propre f_l = 3.03 Hz). La fréquence moyenne du rebondissement de la caisse du véhicule, observée lorsque le véhicule était sur le pont, était de 2.7 Hz, ce qui est plus bas que la fréquence de 2.8 Hz observée lorsque le véhicule était à l'approche du pont. Le couplage du système a donc été démontré expérimentalement lorsque le véhicule était en train de passer le pont.

Ponts de courte portée

La vibration véhicule-pont constitue un problème très différent lorsqu'il s'agit des ponts de courte portée (environ 10 m). Dans ce cas, la longueur du véhicule est généralement supérieure à la portée du pont, le rapport de la masse pont/véhicule est bien plus petit que pour les ponts de moyenne à longue portée et l'interaction concerne les modes d'oscillation de l'essieu plutôt que les modes de rebond de la caisse du véhicule.

Le fait que l'interaction intervienne aux fréquences de débattement de l'essieu change complètement le processus dynamique, et il n'y a plus de véritable interaction. Dans le cas d'oscillation de l'essieu, la caisse du véhicule ne bouge pas de manière significative par rapport au pont et l'essieu vibre entre la caisse du véhicule et la surface "rigide" du pont.

Dans ces conditions, il est raisonnable de modifier la modélisation de la situation en passant du "couplage de systèmes" à deux degrés de liberté illustré dans la figure III.2. à un modèle à un système, à savoir le pont, forcé de vibrer par des forces externes, c'est-à-dire les charges dynamiques de roue, sans tenir compte des masses des véhicules. Ce modèle est présenté dans la figure III.3. Dans ce cas, la réponse dynamique du système à vibration forcée dépend de sa capacité d'amortissement uniquement si la fréquence liée à la force externe est égale à sa fréquence propre. Ceci est illustré dans le rapport de recherche de l'Elément 6 (Cantieni et Heywood, 1998) en particulier lors des essais sur les ponts de courte portée menés en Australie.

Figure III.2. **Modèle d'interaction véhicule-pont pour les ponts de moyenne et longue portée**

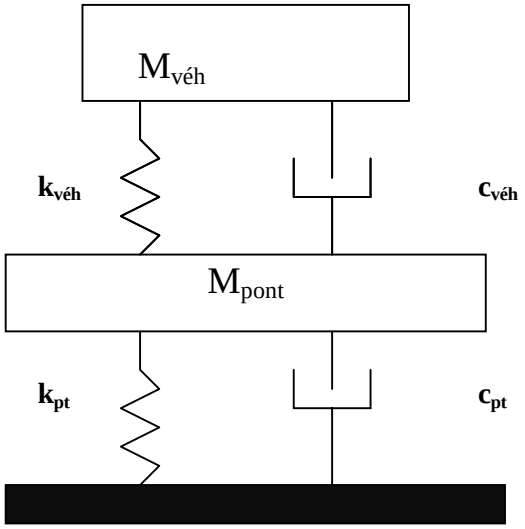
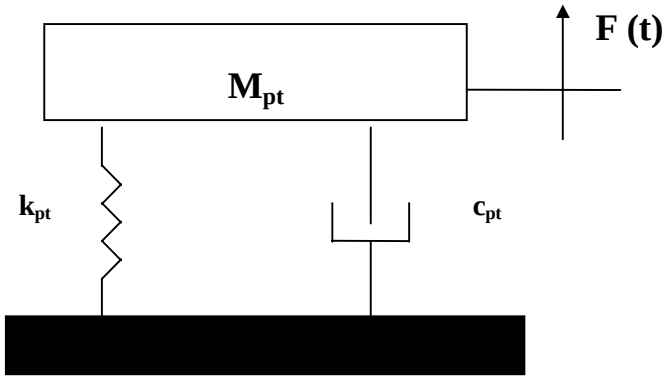


Figure III.3. **Modèle dynamique simplifié véhicule-pont pour les ponts de courte portée**



III.5. Le Projet DIVINE et ses Eléments de recherche

Le Projet DIVINE a comporté six Eléments de recherche différents dans le contexte d'un ensemble d'objectifs, notamment une meilleure compréhension de l'interaction entre les composantes de l'infrastructure routière et le chargement dynamique appliqué par les véhicules lourds de marchandises. Les Eléments du Projet DIVINE font l'objet d'une description plus détaillée ci-dessous. On trouvera des informations sur les installations et les équipements utilisés dans le cadre des différents Eléments dans l'Annexe B de ce rapport.

III.5.1. Elément 1 : essai dynamique accéléré sur chaussée

L'Elément 1 a consisté en un essai accéléré conçu pour provoquer une dégradation et en fin de compte la ruine d'une chaussée routière sous deux différents modes de chargement dynamique. Au cours de l'essai, les modes de chargement ont été appliqués à une chaussée unique par une suspension acier et une suspension pneumatique. Des caractéristiques de chargement dynamique différentes mais connues ont donc été appliquées à la chaussée par les deux suspensions. En complément de la dégradation de la chaussée, la réponse structurelle de la chaussée, son profil en long et son état général ont fait l'objet d'un suivi précis tout au long de l'essai (Kenis et Wang, 1997 ; Steven *et al.*, 1996*a* et 1996*b*).

Après une série complète de mesures "point zéro" pour établir les caractéristiques, préalablement à l'essai, à la fois du chargement et de la construction de la chaussée, l'essai a été poursuivi jusqu'à l'application de 1.7 million de chargements sur la chaussée par les deux suspensions, et une série complète de mesures des variables importantes de l'expérience a été effectuée.

Les deux caractéristiques du système qui ont été étudiées en priorité sont les forces dynamiques de roue et l'accumulation de dégradation de la chaussée dans le temps. Des mesures complètes de chacun de ces paramètres ont été faites tout au long de l'essai. Cependant, en raison d'une relation entre, d'une part l'amplitude et l'étendue des dégradations de la chaussée et, d'autre part, l'amplitude des déformations induites dans la chaussée et le module, ou la rigidité, des matériaux de chaussée, ces caractéristiques secondaires du système ont également été mesurées. En raison des limites des techniques de mesure actuelles, il n'est pas possible de déterminer avec précision et en continu le module d'une chaussée au cours d'un essai accéléré, mais seulement de déduire des valeurs issues d'autres essais indirects, par exemple à travers les données de calculs du module à partir du bassin de déflexion. Toute analyse des effets des caractéristiques de ces systèmes secondaires est donc probablement moins fiable que celle des dégradations de la chaussée mesurées avec plus de précision ou observées, comme l'orniérage ou la fissuration de la structure.

Pendant l'essai, le profil en long de la chaussée a eu une nette influence sur les forces dynamiques de roue appliquées à la surface de la chaussée. En cours d'essai et parallèlement à la détérioration du profil, une interaction avec le système de chargement a produit des changements dans les charges dynamiques de roue, qui à leur tour ont provoqué des modifications du profil en long. Par conséquent, en termes des concepts décrits dans la Section II.4 ci-dessus, l'essai accéléré sur chaussée a permis d'examiner un grand nombre des aspects les plus importants du système véhicule-infrastructure (Sharp et Moffat, 1996).

III.5.2. Elément 2 : essai de réponse initiale de la chaussée

L'objectif de cet Elément, conduit par la *Federal Highway Administration* des États-Unis (FHWA) (Kenis *et al.*, 1997), et le Centre de Recherche Technique de Finlande (VTT) (Huhtala *et al*.,

1997) était de mesurer la réponse structurelle de plusieurs chaussées à des combinaisons connues de charges dynamiques et statiques appliquées à la couche de roulement par des véhicules lourds instrumentés. Le but était de montrer comment le rapport de la réponse initiale de la chaussée aux charges dynamiques appliquées varie en relation avec la fréquence du chargement dynamique. Dans ce contexte, la réponse structurelle est définie comme la contrainte ou la déformation générée à un point clé dans la chaussée par le passage d'une charge par roue dynamique. La recherche a été menée sur des chaussées d'essai instrumentées en Finlande et aux États-Unis, en utilisant les mêmes véhicules d'essai instrumentés dans chaque cas.

Le plan d'expériences a été conçu spécifiquement pour mesurer les effets des modifications dans la fréquence et l'amplitude des efforts dynamiques de roue amenés par de fortes modifications du profil en long. L'hypothèse avait été faite depuis longtemps d'une dépendance entre la réponse des matériaux bitumineux viscoélastiques et la fréquence de la charge dynamique par roue appliquée, et aussi d'une absence de réponse de la chaussée aux chargements dynamiques de fréquence élevée.

III.5.3. Elément 3 : essais avec le simulateur routier

L'Elément 3 a été conduit par le Conseil National de Recherches Canada (CNRC), en deux étapes (Woodrooffe, 1997). Au cours de la première étape, les charges dynamiques de roue générées par plusieurs véhicules ont été mesurées sur des routes présentant des qualités d'uni différentes. Les profils en long ont ensuite été reproduits sur un simulateur routier de laboratoire afin de vérifier si de tels essais reproduisaient les mouvements dynamiques et les charges dynamiques de roue mesurées sur route. Après la première étape de validation, le simulateur a été utilisé pour explorer les possibilités d'exploitation d'un tel équipement pour évaluer la moindre agressivité de la suspension d'un véhicule.

Etant donné que les véhicules se déplacent sur un profil longitudinal, ils produisent des accélérations qui provoquent l'application de charges dynamiques de roue sur la surface de la chaussée. La reproduction de ce système en laboratoire demande donc la simulation du profil en long de la chaussée par la création de déplacements verticaux relatifs, en utilisant des actionneurs appliqués aux pneus du véhicule, lui-même par ailleurs immobile. La mesure des forces dynamiques de roue résultantes est nécessaire en tant que vérification de la validité de la simulation. Dans l'Elément 3, la simulation a consisté à mesurer les accélérations du véhicule induites par le profil réel puis en ajustant le profil en laboratoire afin de correspondre à ces accélérations du véhicule.

Dans la seconde partie de l'Elément 3, une recherche a été menée en vue d'une investigation des méthodes permettant d'évaluer la moindre agressivité des véhicules. L'intensité des forces dynamiques de roue appliquées par un véhicule donné constitue une mesure importante de la moindre agressivité, c'est pourquoi le travail réalisé a comporté la mesure de ces forces dans des conditions connues. Le simulateur routier a été utilisé pour créer un classement des scénarios d'essais des suspensions de véhicules, y compris l'essai de lâcher de la Commission Européenne, et pour évaluer les différents moyens de caractériser et de mesurer la performance dynamique des suspensions en termes de moindre agressivité.

III.5.4. Elément 4 : simulation informatique de la dynamique des véhicules lourds

Actuellement, les moyens empiriques permettant d'obtenir des informations sur le chargement dynamique des chaussées, bien que coûteux et consommateurs de temps, constituent une étape obligée dans la compréhension de l'interaction véhicule/infrastructure. Cependant, une fois que les caractéristiques de base du chargement dynamique ont été bien établies et que les données des essais empiriques sont disponibles, un usage plus large de la modélisation informatique est possible.

L'Elément 4 (Hoogvelt et Ruijs, 1997) a donc eu pour objectif de démarrer ce processus en utilisant les données des autres Eléments et en employant les modèles existants de comportement des véhicules et des chaussées. Un modèle qui convient doit comporter des modules de prédiction du comportement du véhicule dans des circonstances données de profil de la route, de vitesse et de paramètres du véhicule -- tels que la suspension, les dimensions, la configuration d'essieux -- ainsi que d'autres modules de prédiction de la réponse de la chaussée -- quelle que soit la nature de sa structure -- aux chargements dynamiques imposés.

A ce jour, des modèles séparés de comportement du véhicule et de réponse de la chaussée existent dans des formes diverses et ont des degrés divers de limitation et de validation. L'objectif principal de l'Elément 4, en conséquence, a été de déterminer les étapes à présent possibles pour développer une simulation informatique plus globale et mieux adaptée des charges dynamiques de roue.

III.5.5. Elément 5 : répétabilité spatiale des chargements dynamiques

L'objectif principal de l'Elément 5, conduit par le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC), France, avec l'aide du *Transport Research Laboratory* (TRL), Royaume-Uni, a été de déterminer dans quelle mesure les chargements dynamiques se concentrent spatialement sur des routes réelles sous un trafic mixte (Jacob et Dolcemascolo, 1997). Bien que les enregistrements de chargements dynamiques, mesurés pour différents véhicules d'essai circulant à différentes vitesses sur différents profils routiers, puissent mettre en évidence la répétabilité spatiale, il était néanmoins utile d'en quantifier l'effet dans des conditions contrôlées et de comprendre l'influence des différents paramètres. Plus généralement, on a étudié les charges dynamiques appliquées par différents véhicules et suivant les conditions du trafic, afin d'identifier les majorations dynamiques qui s'appliquent aux charges statiques dues aux défauts d'uni de la chaussée. Les effets de tels chargements dynamiques ont été pris en compte pour estimer l'augmentation de la fatigue de la chaussée. Il n'en reste pas moins que les charges dynamiques affectées de répétabilité spatiale ne sont pas seules à influer sur la durée de vie de la chaussée. L'approche de l'Elément 5 était de mesurer la concentration des chargements dynamiques, sous un trafic mixte, sur une route dont les caractéristiques de profil en long étaient connues et dans des conditions expérimentales contrôlées.

Une différence importante entre l'Elément 5 et les autres Eléments du Projet est donc l'implication d'un large éventail de types de véhicules dans l'étude, représentatifs des véhicules en circulation. En ce qui concerne l'effet de la chaussée, seul le profil en long a été mesuré. Cependant, les charges dynamiques de roue d'un large éventail de types de véhicules ont été mesurées et les variations (d'un véhicule à l'autre) du type de suspension et des autres paramètres affectant les forces dynamiques de roue ont ainsi été prises en compte dans l'observation de la répétabilité.

La confirmation de la concentration spatiale des charges dynamiques impliquerait la nécessité de prendre des mesures pour réduire leurs effets, soit par des modifications des véhicules ou par une plus grande attention portée au profil de la chaussée lors de sa construction et de son entretien.

III.5.6. Elément 6 : chargement dynamique des ponts

Il est clair que les ponts constituent une composante importante du réseau routier, et la nature des interactions véhicule-pont est très différente de celle des interactions véhicule-chaussée. Le Projet DIVINE s'est intéressé à la possibilité d'un couplage entre les forces dynamiques de roue et les fréquences propres des ponts, ayant pour résultat des vibrations indésirables dans les ponts. Le but de

l'Elément 6, mené par l'EMPA, Suisse, et l'Université de Technologie de Queensland, Australie, a été de rechercher si les suspensions de moindre agressivité pour les routes le sont aussi pour les ponts (Cantieni et Heywood, 1998).

Des ponts de moyenne portée ont fait l'objet d'investigations, eu égard aux effets de la concordance de fréquence associés aux fréquences plus basses de rebond de la caisse des suspensions modernes souples, alors que les ponts de courte portée l'ont été vis-à-vis des effets dans la bande de fréquence de débattement d'essieu. L'objectif de la recherche a été de déterminer les risques potentiels pour les ponts, associés à l'introduction des suspensions modernes souples. Un travail préalable a consisté à identifier les groupes de ponts pour lesquels on pouvait s'attendre à une augmentation de la réponse dynamique.

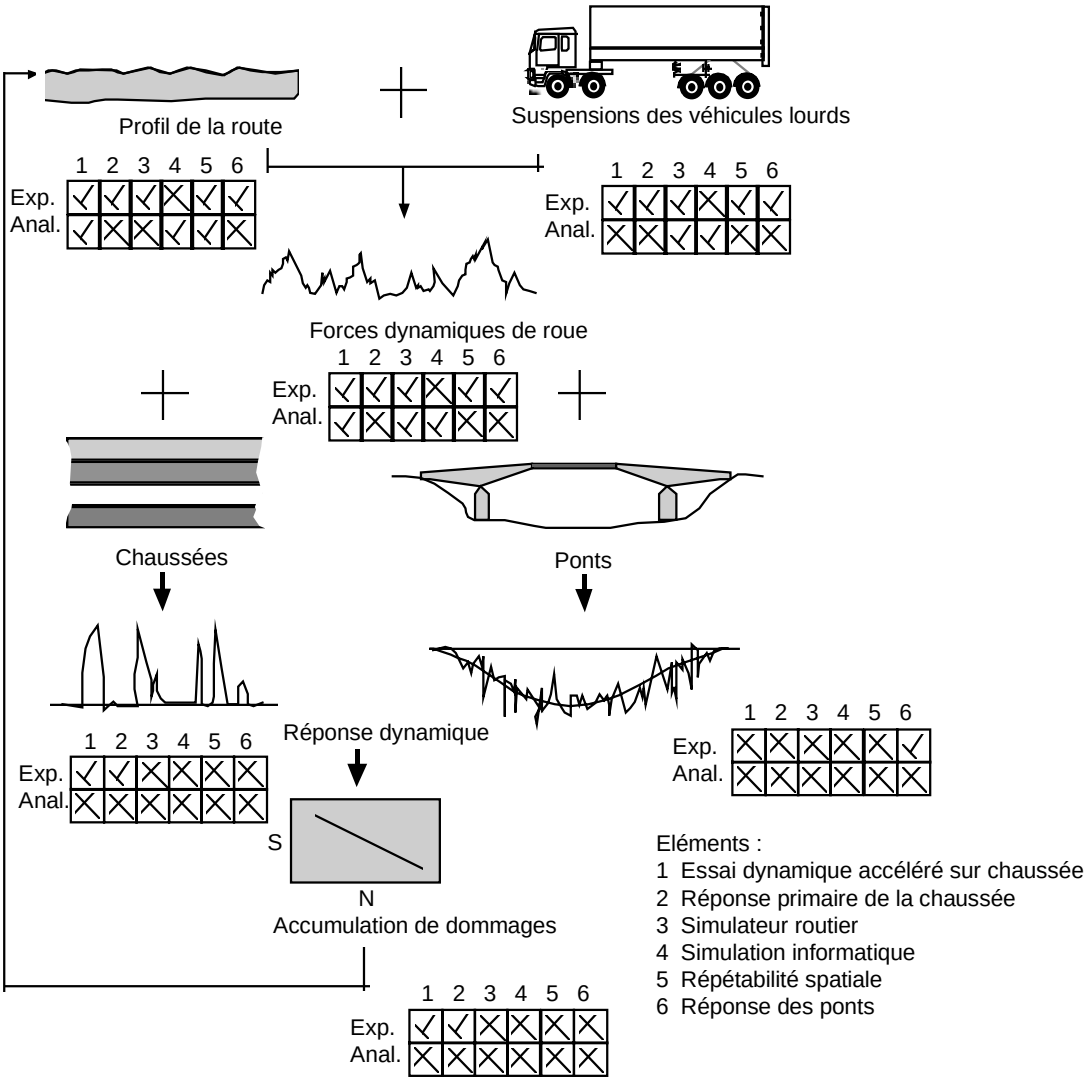
Dans les expérimentations liées à l'Elément 6, le système véhicule-route-pont a été observé. Les forces dynamiques de roue et les réponses primaires (en termes de déflexion) du pont ont été mesurées simultanément, et les profils de la route et du pont ont été enregistrés en utilisant des profilomètres laser.

III.5.7. Résumé du Projet DIVINE

DIVINE a été conçu comme un projet global utilisant des techniques expérimentales, théoriques et analytiques. Nombreux des domaines critiques du problème lié aux interactions véhicule-infrastructure ont fait l'objet d'investigations utilisant une combinaison judicieuse d'expérimentation et d'analyse.

La nature complémentaire des sujets traités dans DIVINE est illustrée dans la figure III.4. qui montre la démarche expérimentale et analytique dans chaque Elément du Projet, en référence à chacun des composants les plus importants du système qui ont été étudiés.

Figure III.4. **Le système véhicule-infrastructure et DIVINE**



BIBLIOGRAPHIE

BLAB, R. et B. JACOB (1997), *Test of a multiple-sensor and four portable WIM systems*, Rapport non publié.

CANTIENI, R. (1992), *Dynamic Behaviour of Highway Bridges under the Passage of Heavy Vehicles*, Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research (EMPA), Report No. 220, Switzerland.

CANTIENI, R. et R. HEYWOOD (1998), *DIVINE Element 6, Bridge Research -- Report on the Tests Performed in Switzerland and Australia*, Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research (EMPA), Dübendorf, Switzerland et Queensland University of Technology, Brisbane, Australia.

CEBON, D. et C. B. WINKLER (1991*), Multiple-sensor Weigh-in-motion: Theory and Experiments*, Transportation Research Record 1311, TRB, Washington DC, United States.

GLOVER, M. H et W. NEWTON (1991), *Evaluation of a Multiple-sensor Weigh-in-motion System*, Research Report 307, TRL, Crowthorne, England.

HOOGVELT, R. B. J. et P. A. J. RUIJS (1997*), "DIVINE Element 4: Computer simulation of heavy vehicle dynamic wheel loads*", TNO report 97.OR.VD.016.1/RH/PR Delft, Pays-Bas.

HUHTALA, M., PIHLAJAMÄKI, J. et P. HALONEN (1997*), Pavement Response due to Dynamic Loads*, Technical Research Centre of Finland, Espoo.

HUHTALA, M., PIHLAJAMÄKI, J. et P. HALONEN (1997), "*Pavement Response due to Dynamic Axle Loads*", Proceedings of the Eighth International Conference on Asphalt Pavements, Volume I pp 471-485, University of Washington, Seattle.

JACOB, B. et V. DOLCEMASCOLO (1997), *Répétabilité Spatiale des Forces d'Impact sur une Chaussée*, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris.

JACOB, B et E. O'BRIEN (1996), "WAVE -- A European Research Project on Weigh-in-motion", National Traffic Data Acquisition Conference, Alliance for Transportation Research, Albuquerque.

KENIS, W., GEORGE, D. et J. HAMMOUDA (1997), *Pavement Primary Response to Dynamic Loading*, Report no. FHWA-RD-073, Federal Highways Administration, Washington, DC.

KENIS, W. et W. WANG (1997), *Analysis of Pavement Structural Variability*, Report No. FHWA-RD-072, Federal Highways Administration, Washington, DC.

SHARP, K. G. et M. A. MOFFATT (1996), *Analysis of Performance Data Collected during Trafficking of Test Pavement by CAPTIF: Element 1 of OECD IR6 Project*, ARRB Transport Research Contract Report CR RI905/3, April.

STEVEN, B. D., FUSSELL, A. W. et B. D. PIDWERBESKY (1996*a*), *DIVINE Element 1 Construction Report*, Civil Engineering Research Report 96-8, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand.

STEVEN, B. D., FUSSELL, A. W. et B. D. PIDWERBESKY (1996*b*), *DIVINE Element 1 Pavement Post-mortem Report*", Civil Engineering Research Report 96-9, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand.

WOODROOFFE, J. H. F. (1997*)*, *Heavy Truck Suspensions: Methods for Evaluating Road-friendliness*, NRC & Roaduser Research, Ottawa.

CHAPITRE IV – PERFORMANCE DU SYSTEME VEHICULE-INFRASTRUCTURE : RESULTATS DU PROJET DIVINE

Les recherches menées dans le cadre des six Eléments du Projet DIVINE ont fourni un ensemble de “vues en coupe” de la nature des interactions entre l’infrastructure et les véhicules lourds. Bien qu’un effort important ait été fait pour maintenir des liens étroits entre les caractéristiques de la route et du véhicule dans les divers Eléments de Recherche, il n’a pas été possible, en raison des limites pratiques du Projet DIVINE, de fournir une représentation exhaustive et applicable à un niveau global de l’interaction véhicule-infrastructure.

La plupart des Eléments ont porté sur la mesure, ou la simulation, des *réponses* de composants particuliers du système véhicule-infrastructure, et le Projet DIVINE apporte l’information la plus large à ce niveau. Seul l’Élément 1 a eu pour objet de mesurer la détérioration de l’infrastructure, ou “son endommagement”, et la démarche s’est limitée à un seul essai accéléré de chargement dynamique d’une chaussée.

La mise en oeuvre des résultats de la recherche DIVINE nécessitera des actions spécifiques à chacun des principaux secteurs opérationnels concernés – c’est-à-dire, les gestionnaires de chaussées et d’ouvrages d’art, et les industriels du transport routier. Les résultats du projet sont par conséquent présentés dans les trois sections énumérées ci-dessous :

- La réponse de l’infrastructure aux véhicules lourds (en considérant à la fois les chaussées et les ponts). Les conclusions de la recherche sont tirées des résultats de l’Elément 2 (réponse initiale de la chaussée), de l’Elément 5 (influence de la répétabilité spatiale du chargement dynamique) et de l’Elément 6 (réponse initiale des ponts).

- Les effets des suspensions des véhicules lourds sur l’état et la performance de la chaussée. Les conclusions de la recherche sont tirées des résultats de l’Elément 1 (essai accéléré de chargement dynamique d’une chaussée).

- L’évaluation de la moindre agressivité des véhicules lourds vis-à-vis de la chaussée. Les résultats de la recherche sont tirés de l’Elément 3 (évaluation des véhicules) et de l’Elément 4 (modèle de simulation des véhicules lourds).

Comme indiqué ci-dessus, chaque Elément de recherche correspond à l’un ou l’autre des secteurs opérationnels. En raison de cette relation, les sections suivantes ne présentent pas les Eléments de manière séquentielle, mais en fonction du secteur opérationnel auquel ils appartiennent. Les résultats complets de chaque Elément de Recherche sont disponibles dans une série séparée de rapports de recherche et la Section III.5 de ce présent rapport présente une description résumée de chacun d’entre eux.

IV.1. Réponse de l'infrastructure aux sollicitations des véhicules

L'application d'un chargement à une chaussée souple, comprenant généralement des matériaux au comportement non linéaire et viscoélastique, aboutit à un système, à la fois transitoire et permanent, de contraintes, de déformations et de déflexion de la chaussée. Ce système est fréquemment appelé la réponse de la chaussée au chargement. Depuis de nombreuses années, le dimensionnement des chaussées a pris en considération les évolutions du système, comme celles de l'amplitude et de la fréquence des charges appliquées, en raison de l'influence des paramètres de réponse sur la nature et le niveau de dégradation de la chaussée sous trafic. C'est pourquoi la connaissance de la réponse de la chaussée non seulement fournit un guide pour les critères de dimensionnement d'une structure de chaussée, mais peut aussi constituer un indicateur important de l'état d'une chaussée. Les équations constitutives décrivant la réponse de la chaussée au chargement sont complexes et beaucoup d'efforts ont été consacrés à leur perfectionnement et à leur validation pour une utilisation dans les modèles de performance et de réponse des chaussées.

Il est bien connu que, lors du déplacement d'un poids lourd le long d'une chaussée, la charge dynamique induite n'est pas constante mais peut varier dans une proportion de 10 à 40% au-dessus ou en-dessous de la charge statique, en fonction du type de suspension, de la charge statique à l'essieu, de la vitesse de déplacement et du profil en long de la chaussée. En raison des mouvements de rebond et de tangage, la plupart des véhicules génèrent des charges dynamiques au niveau des roues dans la gamme de fréquences de 1.5 à 4 Hz, mais certaines suspensions mal amorties de groupes d'essieux génèrent aussi des charges prédominantes à des fréquences généralement comprises entre 8 et 15 Hz, à cause du débattement de l'essieu. Bien que le Projet DIVINE ait permis d'avancer sur le sujet, on connaît très peu de choses des effets des charges dynamiques sur les chaussées, bien que l'Union Européenne, par exemple, autorise une charge à l'essieu plus élevée (c'est-à-dire 115 kN au lieu de 100 kN) dans certains cas si une suspension pneumatique ou un autre système de suspension "peu agressive" est utilisé. Cependant, cette décision est fondée sur un jugement technique plutôt que sur une recherche exhaustive.

La plupart des modèles de réponse des chaussées calculent la réponse à une charge statique ou quasi-statique et ne permettent pas une modélisation complète des conditions en cours d'exploitation, c'est-à-dire pour le chargement dynamique de la chaussée. Le développement et le perfectionnement de tels modèles doivent être fondés sur une connaissance de la réponse — ou de l'absence de réponse — d'une chaussée souple aux charges dynamiques qu'elle rencontre vraisemblablement en pratique. Les progrès dans les techniques de mesure simultanée des déformations et de la déflexion, ainsi que des charges appliquées par un véhicule d'essai, ont fourni les outils pour mesurer les réponses réelles des chaussées et des véhicules. Le Projet DIVINE s'est servi de ces techniques pour fournir des informations utiles sur le sujet.

L'objectif de l'Elément 2 du Projet DIVINE était en conséquence de déterminer, dans des conditions d'essai contrôlées, si le rapport entre la charge dynamique et la déformation mesurée dans la chaussée variait en fonction des variations de la fréquence et de l'amplitude de la charge dynamique. Pour y parvenir, il a été nécessaire de mesurer simultanément puis de comparer les forces dynamiques appliquées par les roues des véhicules et les déformations dans la chaussée. Ainsi, en montrant que les déformations sont dépendantes des variations dynamiques des charges, on peut démontrer les avantages des suspensions peu agressives, en termes d'une moindre dégradation de la chaussée.

La répétabilité spatiale est la tendance pour un véhicule, ou un ensemble de véhicules, à imposer les mêmes caractéristiques de charge au cours de différents passages sur une même portion de la chaussée. Ce qui est particulièrement important est la possibilité pour les charges dynamiques de se concentrer en des points spécifiques de la couche de roulement ou à proximité de ces points. Si la répétabilité spatiale

est importante, alors la réponse de la chaussée à cette concentration de charges aura une influence très nette sur la détérioration de la chaussée dans cette zone. En outre, si les concentrations de charges sont liées à des caractéristiques reconnaissables du profil en long, l'ingénieur pourra, dans ce cas-là, prendre des mesures correctives vis-à-vis du profil de la chaussée afin d'éviter des dégradations localisées.

C'est pourquoi l'objectif de l'Elément 5 du Projet DIVINE a consisté à étudier la répétabilité spatiale et à constater sa sensibilité à un certain nombre de paramètres.

Les réponses des ponts au chargement dynamique ont été étudiées dans le cadre de l'Elément 6 du Projet DIVINE.

IV.1.1. Réponse initiale de la chaussée et chargement dynamique - Détails de la recherche consacrée à l'Elément 2

Les travaux conduits dans le cadre de l'Elément 2 ont impliqué l'utilisation de trois chaussées souples instrumentées, l'une étant une chaussée expérimentale de la FHWA (Etats-Unis) (Kenis et al., 1997), et les deux autres étant situées sur le site d'essai du VTT (Finlande) (Huhtala et al., 1997). L'épaisseur de la chaussée bitumineuse testée par la FHWA était de 150 mm. Deux chaussées bitumineuses ont été testées par le VTT : une structure "épaisse" de 150 mm et une structure "mince" de 80 mm d'épaisseur. Toutes les chaussées ont été instrumentées avec des jauges de déformation placées à intervalles rapprochés, au sommet et à la base de la couche bitumineuse, et positionnées le long de la ligne de passage d'un véhicule d'essai circulant sur la couche de roulement. Ceci a permis de mesurer simultanément les déformations de la chaussée et les charges dynamiques appliquées.

La chaussée de la FHWA a été testée avec le véhicule articulé à 5 essieux du NRC, alors que les chaussées du VTT l'ont été avec les camions à 2 essieux du VTT et du TRL, et avec le véhicule du NRC. Pour mesurer les forces dynamiques de roues appliquées à la chaussée, tous les véhicules d'essai disposaient au moins d'un essieu instrumenté avec des jauges de déformation et des accéléromètres. Le positionnement latéral et longitudinal des pneus par rapport aux jauges a par ailleurs été enregistré au passage des véhicules. La plupart des essais ont été réalisés à 45 km/h, de façon à se caler sur la vitesse nominale du dispositif d'essai accéléré CAPTIF utilisé dans l'Elément 1. Cependant, des essais ont aussi été effectués par la FHWA à très faible vitesse et à 15.25 et 35 km/h, et certains autres par le VTT à 10, 30, 50 et 70 km/h.

Pour tenir compte du fait que le chargement dynamique résulte de la combinaison du rebond de la caisse du véhicule (fréquences comprises entre 1.5 et 3 Hz) et du débattement de l'essieu (fréquences comprises entre 10 et 16 Hz), il a été jugé très utile de relier les deux modes de chargement à la réponse de la chaussée. Deux "bosses" différentes ont été utilisées au cours des essais : une "bosse" longue en contre-plaqué de 4 mètres de longueur et de 50 mm d'épaisseur, conçue pour générer un rebond de la caisse du véhicule, et une "bosse courte" de 0.3 mètre de longueur et 25 mm d'épaisseur, conçue pour générer un débattement de l'essieu. L'expérimentation de la FHWA n'a utilisé que la "bosse" longue, alors que celle du VTT a utilisé les deux types de "bosses". Dans chaque cas, des essais ont également été réalisés sur des chaussées sans "bosses".

Les deux expérimentations ont été positives, dans le sens où il a été possible de mesurer simultanément et de façon précise les chargements dynamiques et la réponse de la chaussée, et de générer, grâce à l'utilisation des "bosses", d'une part les fréquences hautes (dues au débattement de l'essieu) et d'autre part les fréquences basses (dues au rebond de la caisse du véhicule). Toutefois, il est apparu essentiel d'étalonner de manière précise les capteurs pour les mesures de réponse de la chaussée. Afin de

mesurer les réponses dynamiques de la chaussée sous charge mobile, tous les capteurs de la rangée ont été étalonnés de manière à s'assurer qu'ils donnaient les mêmes résultats pour une charge donnée, et ce afin de prendre en compte les différences entre capteurs dues, par exemple, à la fabrication et à l'emplacement des jauges, à l'épaisseur de la couche de roulement ou à la variabilité du matériau. Ces étalonnages ont été effectués sur les deux sites en utilisant une charge mobile. Des étalonnages de température ont également été faits afin de ramener toutes les mesures à une température standard en raison de la forte sensibilité du type de jauges de déformation utilisé aux variations de température, même si celles-ci sont de l'ordre de 1°C.

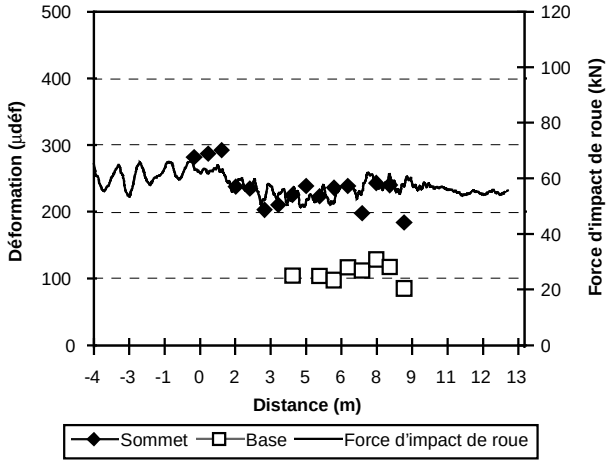
Les résultats des études ont montré que les déformations horizontales longitudinales, aussi bien au sommet qu'à la base de la couche bitumineuse de 150 mm d'épaisseur, étaient directement proportionnelles à la charge instantanée appliquée, indépendamment du type de suspension testée (figures IV.1. à IV.7.), et qu'elles augmentaient linéairement avec les charges dynamiques à l'essieu.

Etant donné le caractère viscoélastique du système constitué par une chaussée souple, sa réponse sera plus forte en cas de sollicitation par une charge se déplaçant à vitesse lente. Bien que la chaussée de la FHWA ait eu une réponse linéaire dans le cas d'une vitesse élevée, le comportement viscoélastique a entraîné une augmentation importante de la déformation moyenne à vitesse lente ou très lente. Dans des conditions d'uni correct, on a constaté que la déformation moyenne nominale augmentait de 50 à 70% à la surface de la chaussée, et de 40 à 55% à l'interface couche de base/couche de fondation, lorsqu'on réduisait la vitesse du véhicule, en passant de vitesses élevées du test (25-45 km/h) à des vitesses très faibles.

Sans l'utilisation de "bosses", la charge maximum, au passage du 4ème essieu, dépassait la charge moyenne de 7.9%, alors que la déformation maximum correspondante en surface de la chaussée était plus importante de 12% par rapport à la moyenne. En utilisant les "bosses", ces valeurs passaient respectivement à 32.6% pour la charge et 32.9% pour la déformation.

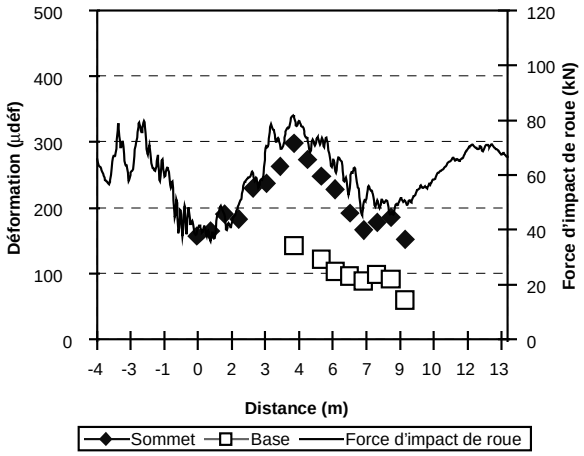
Dans le cas de la chaussée mince testée par le VTT, les résultats ont été moins nets. Les déformations en fonction de la charge appliquée, mesurées à la cote inférieure de la couche d'enrobé bitumineux, étaient plus dispersées et la proportionnalité directe moins évidente. Ceci peut avoir pour explication une sensibilité plus grande de la déformation mesurée, qui dépendrait de la position transversale des charges au droit des capteurs. Mais il est également possible que d'autres facteurs aient joué, y compris l'éventualité que des contraintes de contact non uniformes à l'interface pneu-chaussée aient un effet plus important sur les déformations dans le cas d'une chaussée mince, et que l'interaction de la charge appliquée avec la forme de l'impulsion de déformation soit plus grande pour ce type de chaussée.

Figure IV.1. **Force d'impact des roues et déformation de la couche d'enrobé en fonction de la distance parcourue 45 km/h, charge de 5.45 tonnes, sans bosses**



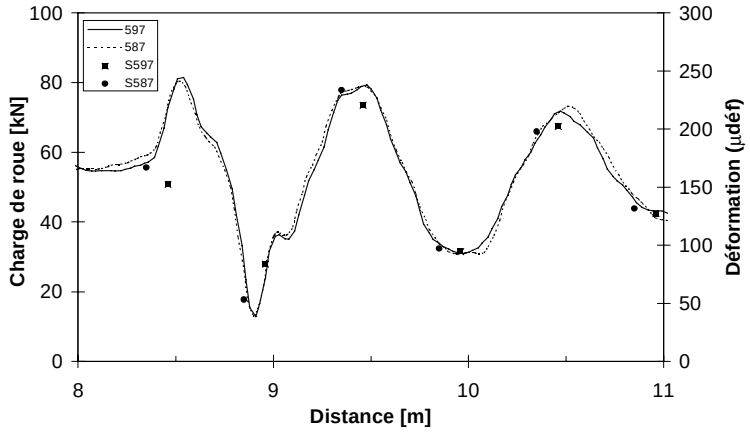
Source : Kenis *et al.*, 1997.

Figure IV.2. **Force d'impact des roues et déformation de la couche d'enrobé en fonction de la distance parcourue, 45 km/h, charge de 5.45 tonnes, avec bosses**



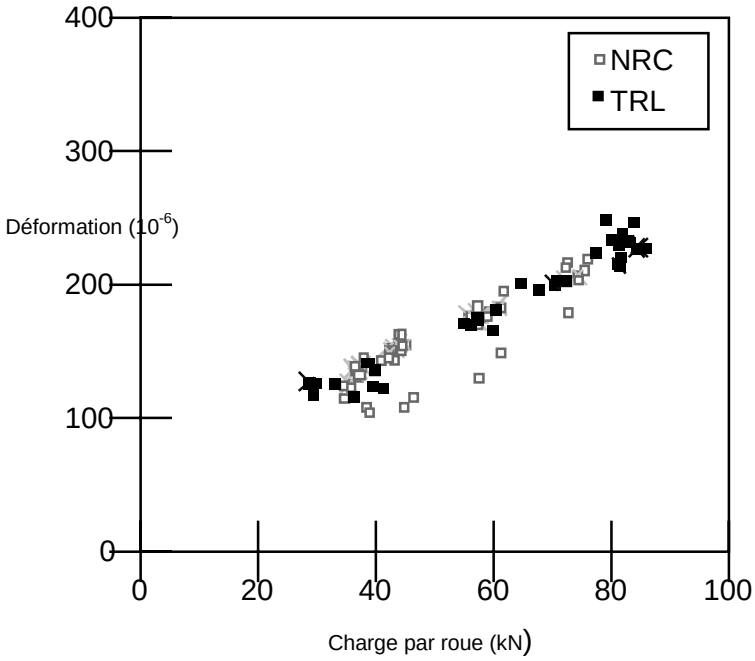
Source : Kenis *et al.*, 1997.

Figure IV.3. **Charge dynamique de roue (597, 587) et déformations correspondantes de la couche d'enrobé (S597, S587), bosse courte, véhicule canadien**



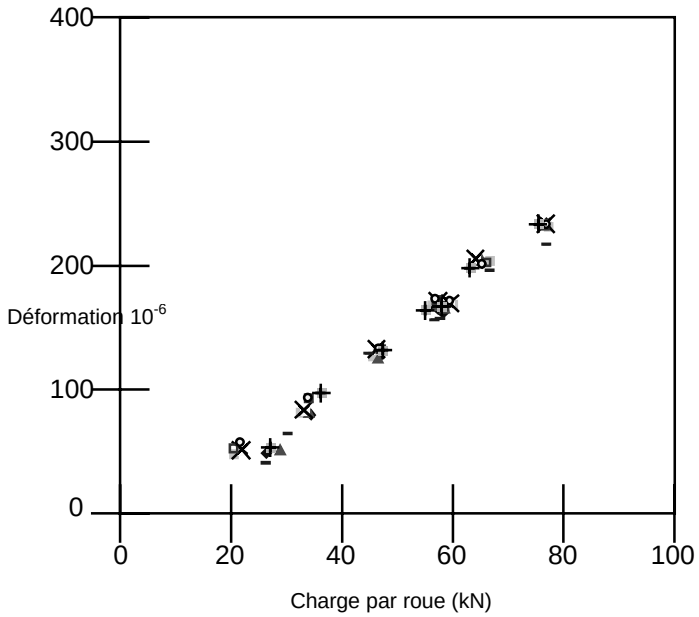
Source : Huhtala *et al.*, 1997.

Figure IV.4. **Déformation de la couche d'enrobé en fonction de la charge par roue, chaussée épaisse, bosse longue, véhicules du Canada (NRC) et du Royaume Uni (TRL)**



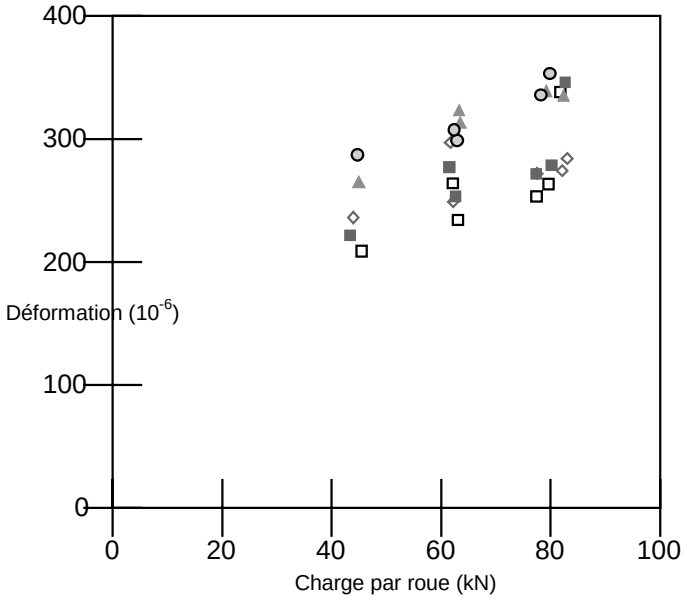
Source : Huhtala *et al.*, 1997.

Figure IV.5. **Déformation de la couche d'enrobé en fonction de la charge par roue, chaussée épaisse, bosse courte**



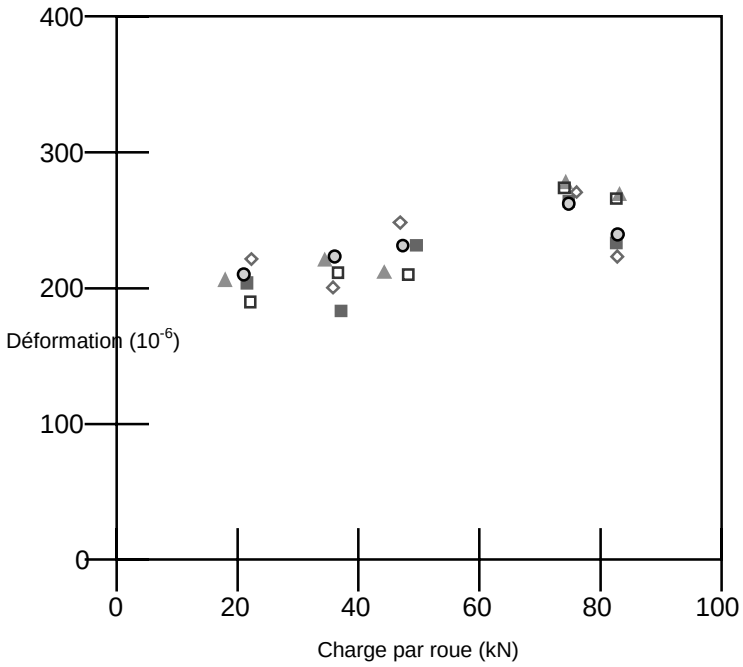
Note : Chaque type de point correspond à un passage du véhicule (véhicule canadien).
Source : Huhtala *et al.*, 1997.

Figure IV.6. **Déformation de la couche d'enrobé en fonction de la charge par roue, chaussée mince, bosse longue**



Note : Chaque type de point correspond à un passage du véhicule (véhicule canadien).
Source : Huhtala *et al.* 1997.

Figure IV.7. **Déformation de la couche d'enrobé en fonction de la charge par roue, chaussée mince, bosse courte**



Note : Chaque type de point correspond à un passage du véhicule (véhicule canadien).
Source : Huhtala *et al.* 1997.

Etant donné que seules deux épaisseurs d'enrobés ont été testées par le VTT, il n'a pas été possible de déterminer l'épaisseur d'enrobés pour laquelle la nature de la relation proportionnelle (entre déformation et charge appliquée) changeait. La relation est probablement aussi affectée par le module de la couche de surface bitumineuse et des couches de base et de fondation non liées.

Le VTT a toutefois noté que, pour les chaussées minces, la fréquence de débattement de l'essieu interagissait avec l'impulsion de déformation à la vitesse d'expérience de 45 km/h, pour produire une amplification de la déformation, suggérant ainsi qu'il était nécessaire d'interpréter ces résultats avec précaution.

En résumé, les résultats ont montré que, pour des chaussées bitumineuses ayant une épaisseur d'environ 150 mm, il existait une relation directe et proportionnelle entre la réponse initiale de la chaussée et la charge instantanée appliquée. Ceci signifie que les chaussées en service de ce type subissent des pics de déformation à la base des matériaux bitumineux qui reflètent directement le niveau du chargement dynamique auquel elles sont soumises. Concernant les expériences sur les chaussées plus minces, la relation est beaucoup moins nette en raison peut-être de l'intervention d'un certain nombre d'autres facteurs affectant l'interface pneu-chaussée et la répartition de la charge. De telles chaussées subiront en cours d'exploitation un éventail plus large de pics de déformation pour une charge dynamique donnée. En outre, et en particulier pour les chaussées épaisses, la diminution de la vitesse du véhicule entraîne une augmentation du niveau du pic de déformation bien plus importante en surface de la chaussée qu'à la base de la couche bitumineuse.

IV.1.2. Chargement dynamique de la chaussée et répétabilité spatiale -- Détails de la recherche consacrée à l'Elément 5

Les sites d'essai

Dans le cadre du Projet DIVINE, une expérience a été menée sur une route nationale (RN10) en bon état structurel et dont l'uni était relativement lisse (avec un indice international d'uni – IRI – de 1.73 m/km). La route, située près de Trappes, France, était à 2 x 2 voies ; la voie instrumentée, voie de droite vers Paris, supportait un trafic de 3 500 poids lourds par jour. Un ensemble de 24 capteurs piézocéramiques de pesage en marche, répartis sur une section de route de 36 mètres, a été utilisé pour mesurer les variations de la charge dynamique appliquée par les essieux et pour détecter les maxima et les minima de ces charges.

On a également tenu compte des mesures effectuées par le TRL (*Transport Research Laboratory*) en 1992-93 sur l'autoroute A34 à Abingdon (Royaume-Uni). L'état de la chaussée était relativement dégradé avec un uni médiocre (la valeur de l'indice IRI n'est pas connue), de l'orniérage et de la fissuration. Un ensemble de 48 capteurs (24 lignes), de type "ruban capacitif", uniformément répartis, a été utilisé. En raison de problèmes avec les capteurs, de nombreuses mesures ont été considérées comme peu fiables, et seuls quelques résultats sont mentionnés dans ce rapport.

Instrumentation du site d'essai en France (Trappes, RN10)

La conception d'une grille multicapteur était fondée sur une expérience préalable et des considérations théoriques liées au traitement et à l'échantillonnage du signal. L'objectif consistait à réaliser une analyse la plus poussée possible des signaux de forces d'impact à différentes longueurs d'onde ou fréquences. On a pris en compte les fréquences dans les fourchettes de 1.5 à 2.5 Hz (mouvements de la caisse du véhicule, rebond des roues, lacet, tangage et roulis), 3.5 à 5 Hz (vibrations des suspensions, première harmonique de la vibration de la masse suspendue) et 10 à 15 Hz (vibration des masses non suspendues).

Les vitesses sur le site se situaient entre un minimum (Vmin) de 14 m/s (50 km/h) et un maximum (Vmax) de 25 m/s (90 km/h). Pour chacun des trois niveaux de fréquence, la longueur minimale L de la grille de capteurs et l'espacement maximum d entre ceux-ci étaient respectivement de l'ordre de : L = 2.5 mètres, 7.1 mètres et 16.7 mètres ; et d = 0.375 mètres, 1.12 mètres et 2.25 mètres. A l'origine, 18 capteurs ont été installés, couvrant une longueur de 22.5 m, puis 6 capteurs ont été ajoutés l'année suivante en vue d'une meilleure analyse des grandes longueurs d'onde. Finalement, l'ensemble des 24 capteurs a été disposé comme suit :

- 7 capteurs à un espacement $d_1 = 0.375$ m,
- 4 capteurs à un espacement $d_2 = 1.125$ m, avec $d_2 = 3\ d_1$,
- 13 capteurs à un espacement $d_3 = 2.25$ m, avec $d_3 = 2\ d_2 = 6\ d_1$.

Parmi l'ensemble de ces capteurs il était ainsi possible de considérer 3 sous-grilles de capteurs uniformément répartis, certains d'entre eux appartenant à plusieurs grilles :

- 7 capteurs à d_1 = 0.375 m,
- 7 capteurs à d_2 = 1.125 m,
- 17 capteurs à d_3 = 2.25 m.

Profil en long de la chaussée de la RN10

Le profil en long de la section de route comprenant les capteurs de pesage en marche a été mesuré à l'aide d'un APL 72 (Analyseur de Profil en Long). Cet appareil quantifie l'uni par bande de longueurs d'onde, par sections de 200 mètres, donnant trois notes dans trois gammes de longueurs d'onde. Les mesures ont été effectuées à la vitesse de 20 m/s (72 km/h). Deux remorques suivaient longitudinalement les traces de roues d'un véhicule léger. Les longueurs d'onde conventionnellement reconnues pour la mesure de l'uni sont comprises entre 0.5 mètres et 50 mètres, avec des amplitudes variant entre quelques dixièmes de millimètres pour les plus petites longueurs d'onde détectées jusqu'à plusieurs dizaines de millimètres pour les grandes longueurs d'onde.

Les mesures ont été réalisées une première fois en décembre 1993 puis de nouveau en décembre 1995, avec des résultats identiques. Pour les trois gammes de longueurs d'onde on a mesuré le coefficient APL suivant :

- courtes longueurs d'onde : 8 (très bon)
- moyennes longueurs d'onde : 7 (bon)
- grandes longueurs d'onde : 6 (passable).

Ces valeurs correspondent à un bon niveau d'uni pour une route principale à grande circulation. La section de 200 mètres qui inclut la grille de capteurs piézo-électriques avait un coefficient IRI de 1.73 m/km, qui correspond à un uni de bonne qualité.

Mesures effectuées avec des véhicules lourds circulant sur la RN10

Au départ de l'expérimentation, des mesures ont été effectuées pour des véhicules dont la masse statique et la configuration des essieux étaient connus (véhicules d'essai) et qui passaient plusieurs fois à des vitesses différentes. Ensuite, les mêmes mesures ont été effectuées pour quelques dizaines de véhicules du trafic pré-pesés au préalable en statique et puis pour l'ensemble des véhicules lourds circulant sur cette portion de route. On a enregistré les valeurs des charges statiques par essieu, du poids total et le type de suspension des camions prépesés, ainsi que la configuration de tous les véhicules mesurés dans le flux de circulation. Pour cette dernière population, les charges statiques à l'essieu et le poids total roulant ont été estimés en calculant la moyenne des forces d'impact mesurées par 13 capteurs uniformément répartis. On a montré que la précision de ces estimations satisfaisait aux exigences de la classe B+ (7) des spécifications européennes du pesage en marche (COST 323, 1997) – c'est-à-dire que, par référence à la charge statique, environ 90 à 95% des charges mesurées se situaient dans une fourchette de ± 7% (pour le poids total), ± 11% (pour le groupe d'essieux) et ± 14% (pour un essieu dans un groupe).

Durant six journées, entre juin 1994 et mai 1995, on a mesuré 76 camions prépesés, y compris 11 passages répétés d'un camion rigide à deux essieux (déflectographe). Durant la semaine du 3 au 9

avril 1995, 2 976 camions (de plus de 6 tonnes) ont ainsi été enregistrés dans le flux de trafic. Le tableau IV.1. décrit la composition de ces populations et démontre que l'échantillon de véhicules prépesés était représentatif de l'ensemble du flux de circulation. 80 à 90% des vitesses étaient comprises entre 70 et 90 km/h.

Tableau IV.1. **Comparaison des échantillons des véhicules pré-pesés et de ceux mesurés dans le flux de circulation**

Population	**Durée cumulée**	**Taille de l'échantillon N**	**Vitesse moyenne (km/h)**	**% de camions rigides à deux ou trois essieux (types 1 et 2)**	**% de semi-remorques de types 4-5[1]**
Prépesés	6 jours	65 + 11	73.4	21	74
Flux de circulation	7 jours	2 976	79.1	20	67

[1]Type 4 : tracteur à deux essieux avec une semi-remorque équipée d'un tandem.
Type 5 : tracteur à deux essieux avec une semi-remorque équipée d'un tridem.
Source : LCPC.

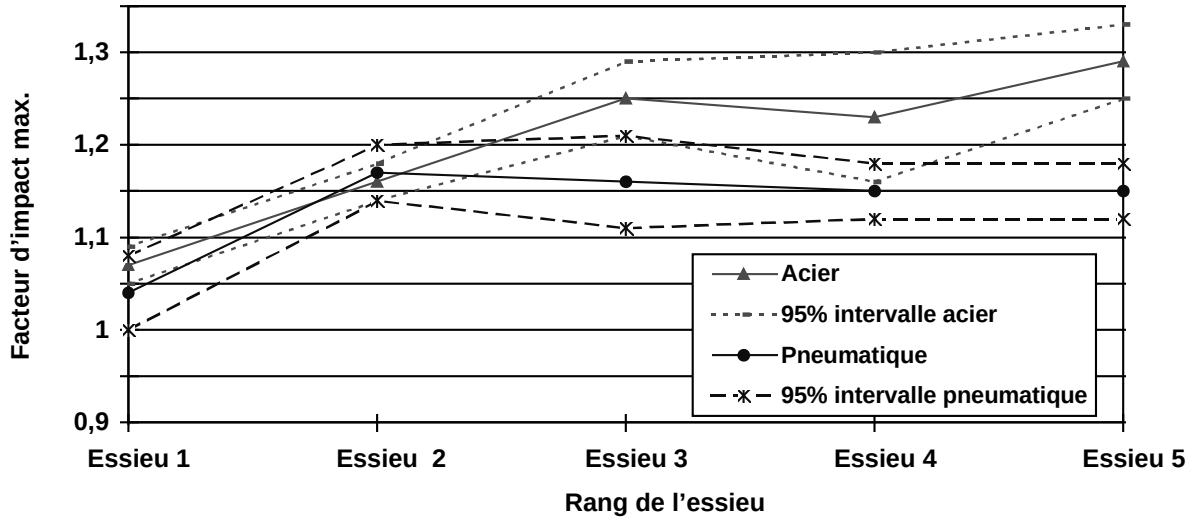
Facteurs d'impact

Le facteur d'impact de chaque essieu, sur chaque capteur, a été calculé comme le rapport entre la force d'impact mesurée et la charge statique par essieu. De la même manière, on a calculé le facteur d'impact de chaque véhicule, sur chaque capteur, comme la somme des forces d'impact mesurées sur les essieux divisée par la masse statique du véhicule. Les résultats ont été analysés soigneusement afin de déterminer l'amplitude des facteurs d'impact en fonction de la vitesse, du type de suspension, de la configuration du camion, et d'autres critères. Les résultats ont également été utilisés pour déterminer si on constatait, ou non, une répétabilité spatiale statistique. La figure IV.8. montre que les suspensions pneumatiques "peu agressives" ne réduisent les facteurs d'impact maxima que pour les essieux tandem et tridem arrières des semi-remorques (de 1.25 à 1.15), mais n'ont pas d'effets significatifs sur les essieux moteurs ou les camions non articulés. Dans l'échantillon analysé, on a trouvé que 30% des essieux de rang 1 et 2 et 60% des essieux de rang 3 à 5 étaient équipés de suspensions pneumatiques.

Répétabilité spatiale

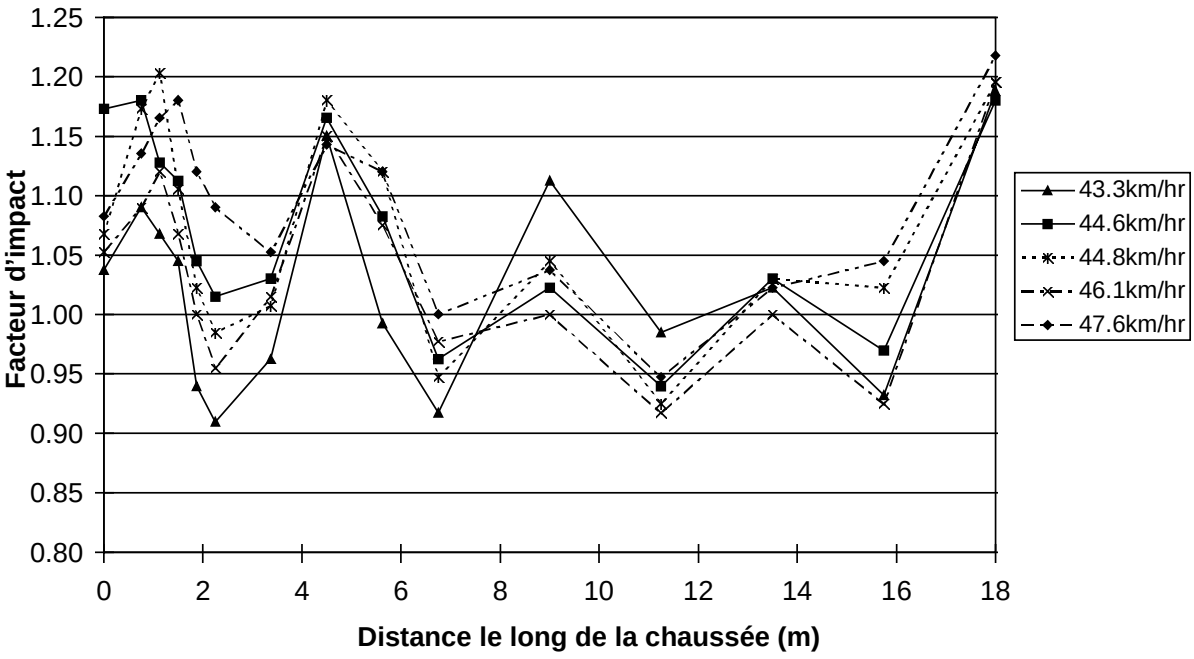
On a évalué la répétabilité spatiale en analysant les amplitudes des facteurs d'impact le long de la chaussée, et en particulier la tendance pour les maxima et minima à se reproduire au même endroit. Toutefois, ce phénomène est fortement dépendant des conditions de circulation et de l'état de la chaussée. Pour un véhicule isolé, dans des conditions bien précises (de vitesse et de charge), la répétabilité spatiale des trajectoires de forces d'impact se constate pour un certain nombre de passages, même sur une chaussée présentant un bon uni, comme on l'a vu avec le camion rigide à deux essieux (déflectographe) utilisé à Trappes (figure IV.9.). Pour chaque niveau de vitesse (45 à 60 km/h), on a évalué la répétabilité spatiale. On a constaté que les longueurs d'onde des facteurs d'impact étaient pratiquement proportionnelles à la vitesse ; ceci signifie que la fréquence propre du véhicule constitue l'élément dominant. Ainsi, la répétabilité spatiale était fortement diminuée pour des vitesses non constantes. On a également remarqué que la répétabilité spatiale était plus importante dans le cas de charges à l'essieu élevées.

Figure IV.8. **Facteur d'impact maximum en fonction du rang de l'essieu et du type de suspension**



Note : Les essieux 1 et 2 sont soit ceux des camions rigides à deux essieux soit ceux du tracteur des camions articulés. Les essieux 3 à 5 appartiennent au tandem ou au tridem des semi-remorques.
Source : LCPC.

Figure IV.9. **Facteurs d'impact pour l'essieu de rang 2 du déflectographe**



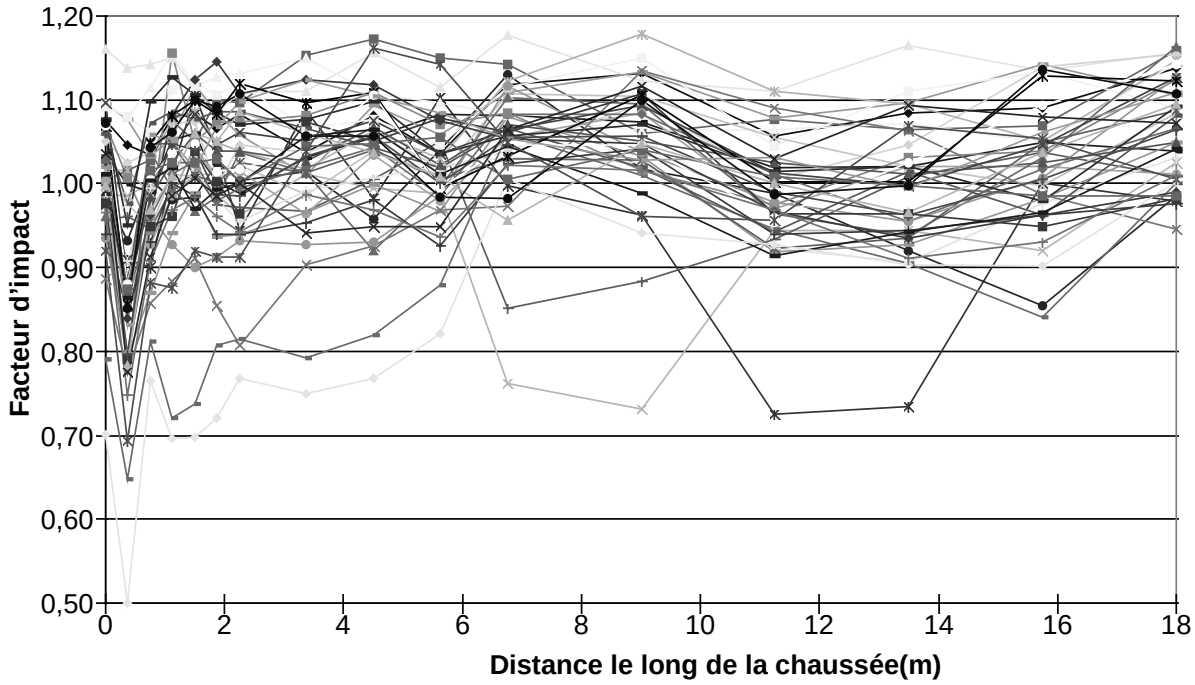
Source : Jacob et Dolcesmascolo, 1997.

Si les véhicules du trafic sont considérés individuellement — mais en ne prenant que des véhicules de même configuration circulant chacun avec sa vitesse propre, sa charge, ses suspensions et ses caractéristiques dynamiques — on ne constate pas de répétabilité spatiale en raison de la variation aléatoire des vitesses et des chargements dynamiques dans l'échantillon ; un exemple est donné à la figure IV.10. pour le poids total de camions articulés à 5 essieux.

Si par contre, on fait la moyenne des facteurs d'impact d'un ensemble de véhicules, celle-ci étant calculée à différentes abscisses le long de la chaussée – c'est à dire pour chaque point le long de la chaussée –, on constate que pour un échantillon réduit de véhicules (5 à 10) d'un type donné, on observe encore la répétabilité spatiale, mais avec une intensité beaucoup plus faible que lors des passages répétés d'un même véhicule dans des conditions identiques. La figure IV.11. illustre les résultats pour les véhicules de marchandises de type 5, chaque échantillon comprenant de 4 à 12 camions.

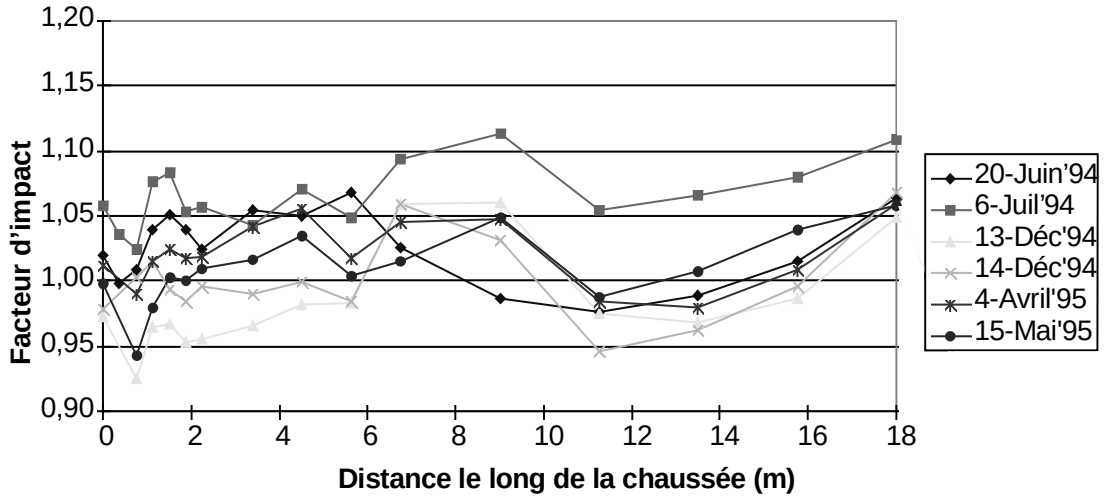
Cependant, pour un échantillon plus grand (de 40 à quelques centaines de véhicules), la répétabilité spatiale est plus marquée pour un type donné de véhicules (figure IV.12.) aussi bien que pour l'ensemble des véhicules (figure IV.13.). Ceci est attribué au fait que, dans un échantillon plus grand, les effets des variations aléatoires de la vitesse et du chargement dynamique sont réduits par moyennage. Ce phénomène, mis en évidence dans ce projet, est appelé "répétabilité spatiale statistique".

Figure IV.10. **Facteurs d'impact pour les véhicules de marchandises (type 5)**



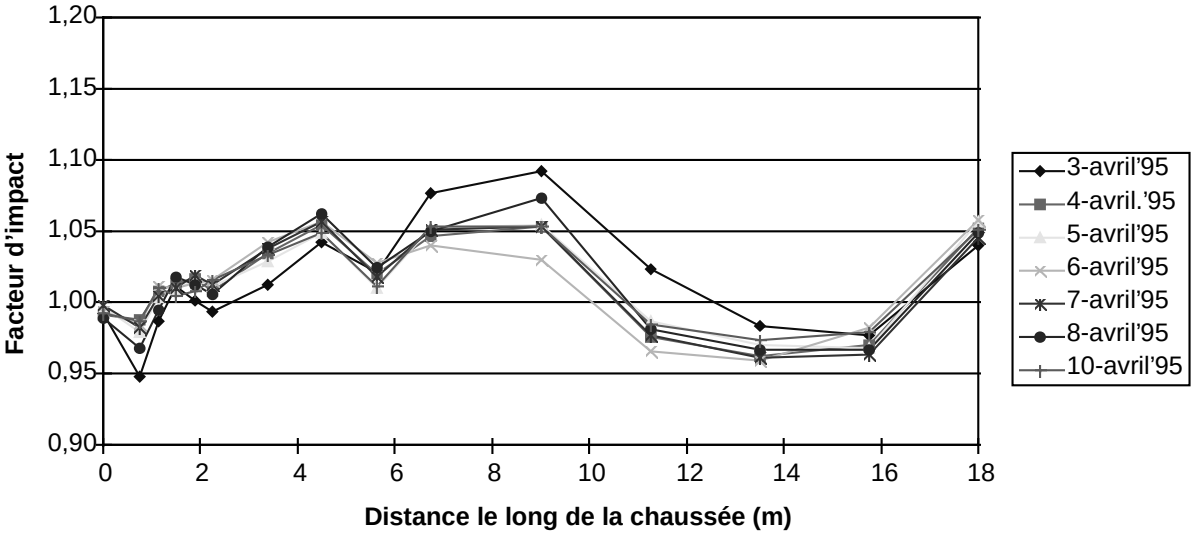
Source : Jacob et Dolcemascolo, 1997.

Figure IV.11. **Facteurs d'impact moyens pour les véhicules de marchandises (type 5) - petit échantillon (Jacob et Dolcemascolo, 1997)**



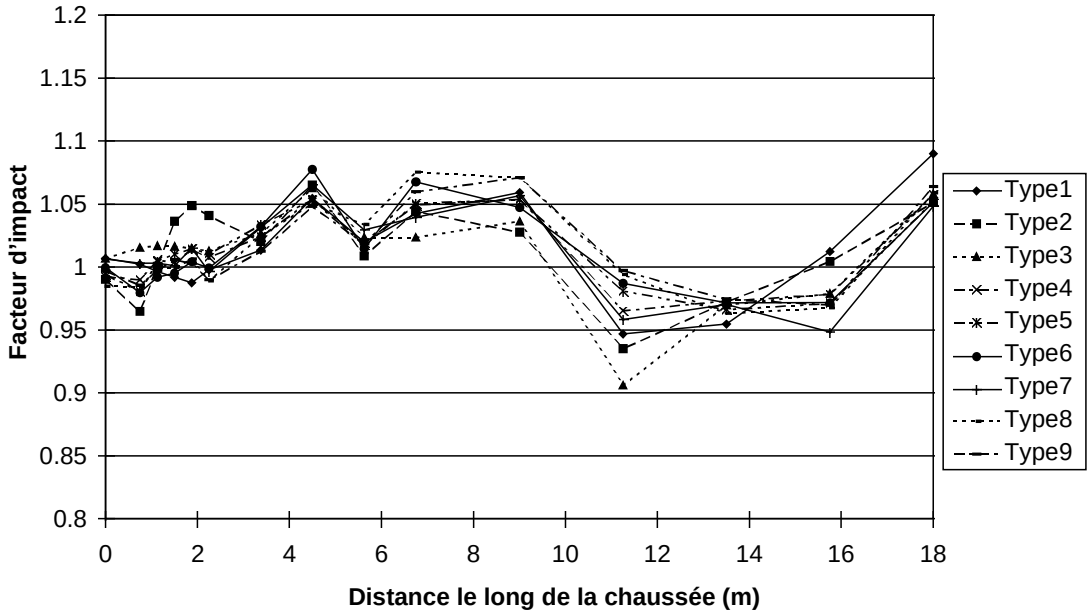
Source : Jacob et Dolcemascolo, 1997.

Figure IV.12. **Facteurs d'impact moyens pour les véhicules de marchandises (type 5) - grand échantillon (Jacob et Dolcemascolo, 1997)**



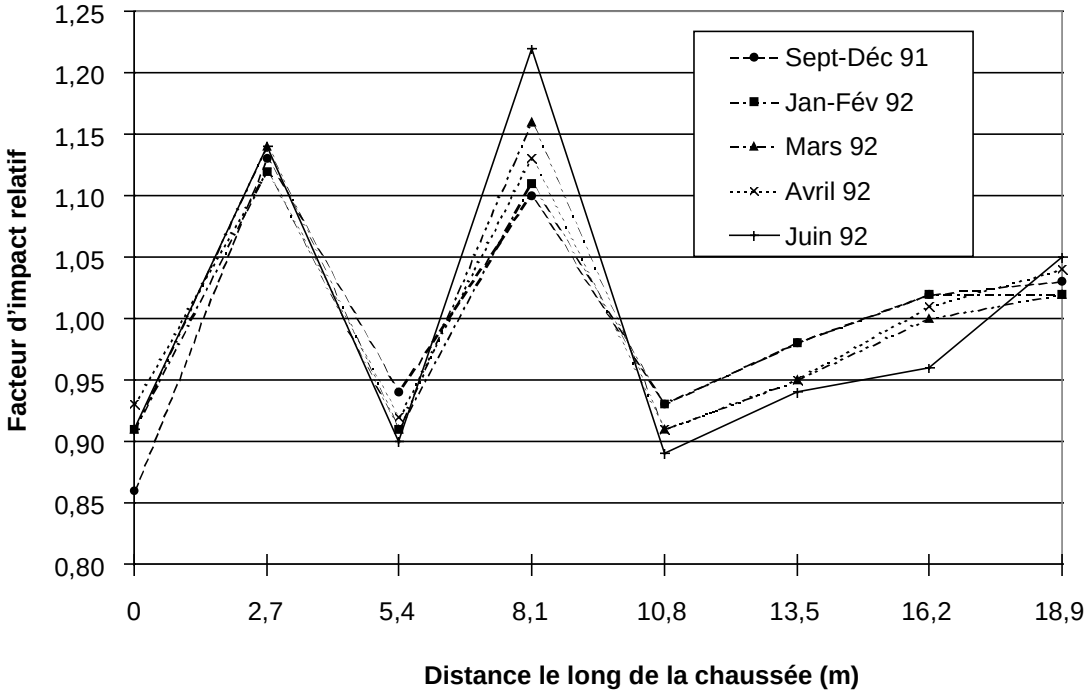
Source : Jacob et Dolcemascolo, 1997.

Figure IV.13. **Facteurs d'impact moyens pour des véhicules de marchandises de types 1 à 9**



Source : Jacob et Dolcemascolo, 1997.

Figure IV.14. **Facteurs d'impacts moyens pour les véhicules de marchandises – A34 Abingdon, voie lente**



Source : TRL.

Les mesures effectuées sur l'A34 (figure IV.14.) à Abingdon, au Royaume-Uni, montrent une augmentation du facteur d'impact moyen avec la dégradation de l'uni. Les facteurs d'impact moyens sont de l'ordre de 0.87 à 1.22, au lieu de 0.90 à 1.10 comme sur la RN10. Dans un tel contexte de défauts d'uni, la répétabilité spatiale est également plus marquée.

Détérioration de la chaussée

Les conséquences des résultats de l'Elément 5 sur le dimensionnement et l'entretien des chaussées sont examinées dans le chapitre suivant. Cependant, en utilisant les lois conventionnelles de détérioration et de fatigue des chaussées, les résultats décrits ci-dessus indiquent que le chargement dynamique induit une augmentation de 30 à 50% de la dégradation des chaussées par rapport à celle due au chargement statique. L'extension de ce résultat au cas d'une route dont l'uni serait moins bon indique une augmentation encore plus importante. Compte tenu que les modes de détérioration et de rupture des chaussées rigides sont différents de ceux des chaussées souples, l'effet de la répétabilité spatiale sur de telles routes peut être étudié de manière théorique. Sur cette base, une augmentation des dommages atteignant jusqu'à 200% pourrait apparaître sur des sections de route rigides dont l'uni est relativement bon.

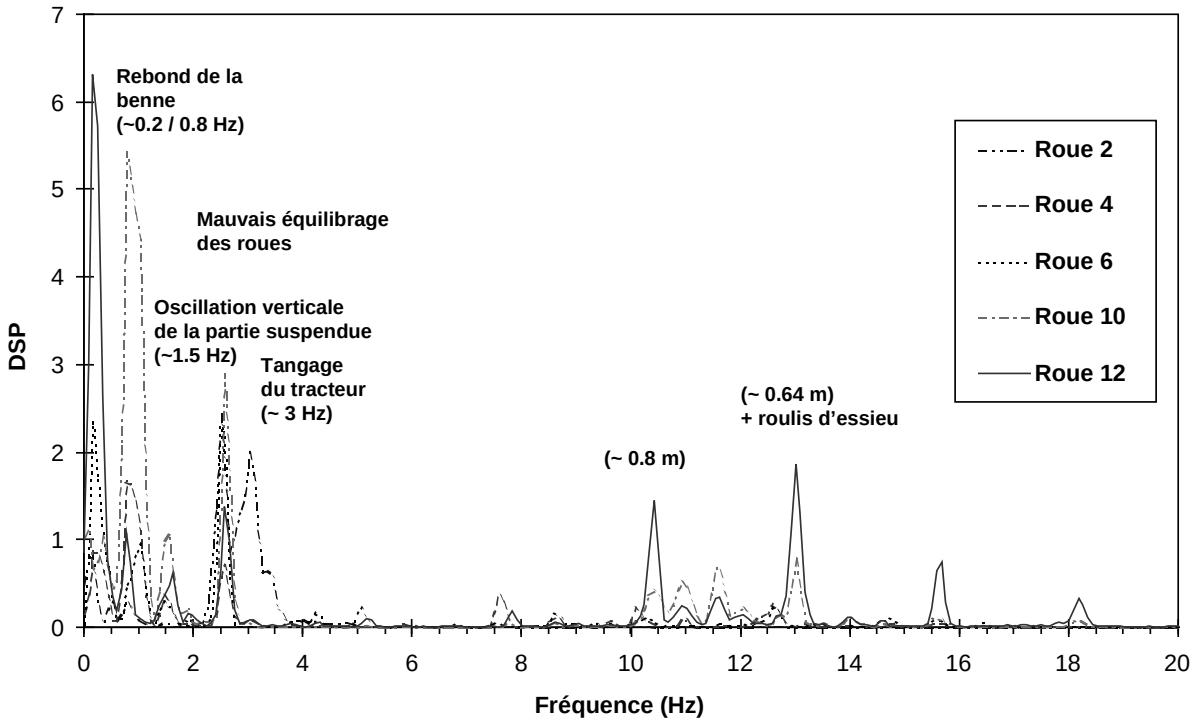
En analysant les différents effets d'un même type de véhicule équipé, soit d'une suspension pneumatique, soit d'une suspension à ressorts d'acier, les travaux ont permis de conclure que le recours à une suspension pneumatique, tout particulièrement pour la classe de véhicule à l'origine du plus gros des dégradations (les semi-remorques à 5 essieux) est susceptible de réduire les charges dynamiques de l'ordre de 10 à 12%. Ce type de suspension peut ainsi contribuer à une réduction significative de la dégradation des chaussées.

Analyse spectrale et effets dynamiques des véhicules

Une étude approfondie des variations des forces d'impact des roues et des essieux, dans le domaine fréquentiel et de longueur d'onde, a été menée par analyse spectrale. La Densité Spectrale de Puissance (DSP) a été calculée informatiquement pour le véhicule instrumenté NRC à suspension pneumatique et la remorque allemande à suspension pneumatique et acier, à différentes vitesses et pour différentes charges. A faible vitesse (30 km/h), les variations de la force d'impact de la roue proviennent principalement d'un défaut d'équilibrage de la roue elle-même, qui conduit à un pic centré autour de 2.6 Hz dans le domaine fréquentiel (c'est-à-dire une longueur d'onde de 3.2 mètres, correspondant au périmètre de la roue – figure IV.15.). Avec une longueur d'onde constante, ce pic de fréquence varie proportionnellement à la vitesse. Il reste visible à 80 km/h (6.93 Hz, figure IV.16.). Cet effet apparaît de façon plus caractéristique avec la remorque allemande. Les deux ou trois premières harmoniques de cette vibration sont aussi importantes, en particulier si une résonance se produit avec les fréquences propres du véhicule. A vitesse élevée (80 km/h), les variations principales de la force d'impact de l'essieu sont la résultante du mode de rebond de la partie suspendue du poids lourd dans le cas de suspension pneumatique (environ 1.6 Hz) et du mode d'oscillation de l'essieu (environ 11.5 Hz), comme le montre la figure IV.16.

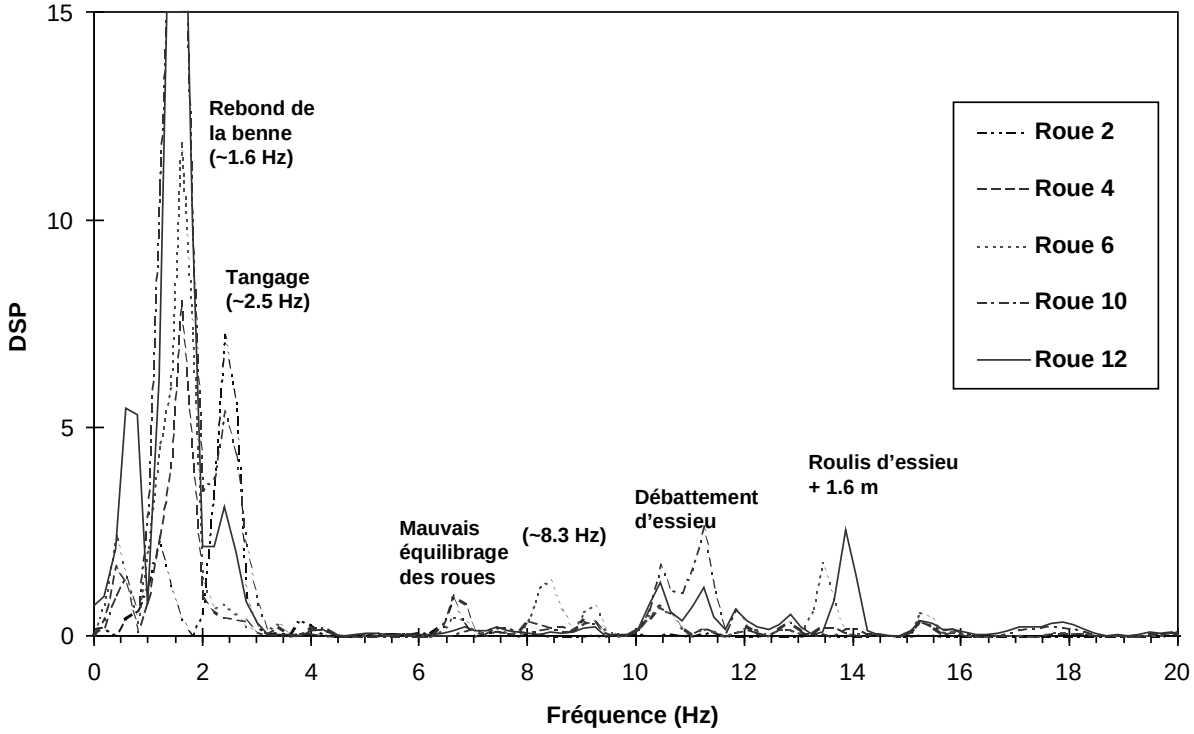
Ces effets dynamiques liés au véhicule sont assez sensibles au type de suspension, en raison de leurs caractéristiques de fréquence. Toutefois, ils ne sont pas en phase avec le profil en long de la chaussée et, en conséquence, n'augmentent pas la répétabilité spatiale. Néanmoins, il convient de prêter attention au risque de résonance entre les ondes moyennes du profil en long de la chaussée et le périmètre de la roue, ou entre les ondes moyennes ou courtes du profil de chaussée et les fréquences propres des véhicules ou des essieux à certaines vitesses, qui pourraient augmenter significativement la valeur du facteur d'impact.

Figure IV.15. **Densité spectrale de puissance de la force d'impact d'une roue, véhicule instrumenté NRC, 30 km/h, GW = 359 kN**



Source : NRC.

Figure IV.16. **Densité spectrale de puissance de la force d'impact d'une roue, véhicule instrumenté NRC, 80 km/h, GW = 359 kN**



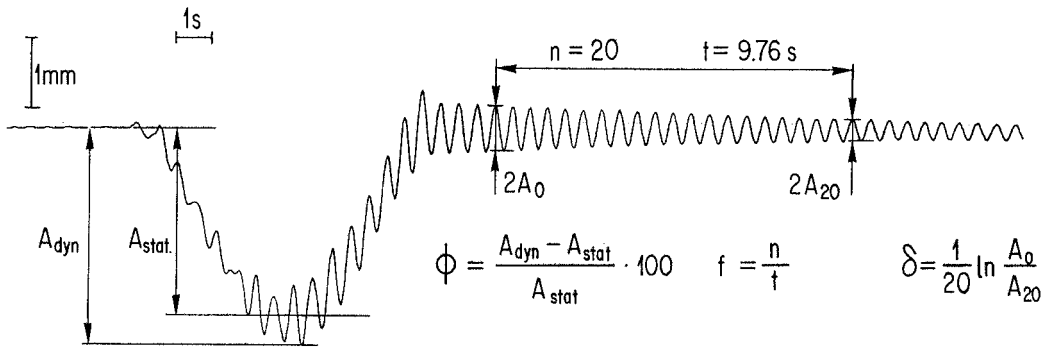
Source : NRC.

IV.1.3. Réponses des ponts -- détails de la recherche consacrée à l'Elément 6

Incréments dynamiques maxima mesurés

L'incrément dynamique ϕ compare la déflexion dynamique maximale du pont A_{dyn} et la déflexion maximale statique A_{stat}. La définition de l'incrément dynamique ϕ tel que décrit dans la figure IV.17. est utilisée tout au long de ce rapport.

Figure IV.17. **Relevé d'un chargement dynamique en fonction du temps et définitions de l'incrément dynamique ϕ (%), de la fréquence fondamentale f(Hz) et du décrément d'amortissement associé ζ (ou coefficient d'amortissement ζ en pourcentage de la valeur limite $\zeta = \delta/(2\pi)$**



Source : Cantieni et Heywood, 1983.

L'incrément dynamique maximum pour la déflexion verticale d'un pont et pour chacun des paramètres de configuration pont/véhicule testés en l'absence de "bosse" courte (voir la section IV.1.1) est donné dans le tableau IV.2. avec d'autres paramètres importants de l'essai.

En résumé, la réponse des ponts au passage des véhicules d'essai s'est montrée conforme aux lois de la physique, puisque les réponses dynamiques les plus fortes se sont produites quand la fréquence soit du rebond de la partie suspendue du véhicule, soit de débattement de l'essieu du véhicule test, correspondait aux fréquences propres, plus spécialement à la fréquence propre fondamentale du pont en flexion. Cet effet est appelé "concordance de fréquence". Les profils en long du pont et de ses accès (sur une longueur jusqu'à 50 mètres) ont constitué un élément essentiel de la réponse de la suspension du véhicule et, en retour, de la réponse dynamique du pont. Les essais discutés ici n'ont pas permis de considérer le cas de ponts de faible portée dont la couche de roulement et le profil en long de ses approches présentaient un bon uni.

Tableau IV.2. **Incrément dynamique maximum ϕ_{max} pour la déflexion maximale du pont mesurée sur un ouvrage caractéristique sans bosses**

Pont	Fréquence (Hz)	Amortis-sement (%)	Etat du revêtement[1]	Concordance de fréquences	ϕ_{MAX} acier (%)	ϕ_{MAX} air (%)
Sort	1.62	1.0	A	rebond du véhicule, air	10	26
Deibüel	3.01	0.8	A	rebond du véhicule, acier	21	5
Föss	4.44	1.6	B	non significatif	15	22
Lawsons	5.1	1.0	A	non significatif	6	3
Coxs	10.2	4.5	A	débattement de l'essieu	28	18
Camerons **Creek**	11.3	1.5	B...C	débattement de l'essieu	110 -	75 (véhicule 1) 137 (véhicule 2)
Cromarty	9.5	2.6	B...C	débattement de l'essieu	109	50

[1] D'après ISO (1995).

Source : Cantieni et Heywood, 1998.

Ponts de portée moyenne à grande

Dans le cas d'un bon uni sur le pont et ses accès et pour des ponts de portée moyenne à grande, on n'a pas relevé une influence majeure de la suspension des véhicules sur les charges dynamiques par roue et sur les amplitudes de réponse du pont. Dans un tel contexte, les vibrations de la partie suspendue du véhicule étaient excitées presque exclusivement, à fréquence constante et à toutes les vitesses, avec pour effet une concordance de fréquences se produisant aux seules basses fréquences correspondantes. Les résultats suivants ont été observés :

- Le véhicule d'essai à suspension pneumatique a induit des réponses dynamiques plus grandes sur un pont de fréquence fondamentale propre (f) de l'ordre de 1.6 Hz (pour une portée maximum d'environ 70 mètres) que sur des ponts dont les fréquences propres sortaient de ce niveau de valeur. Les augmentations de l'incrément dynamique observé étaient insuffisantes pour justifier une majoration des effets dynamiques autorisés dans la conception des ponts.

- Le véhicule d'essai à suspension à lames d'acier a, pour sa part, induit des réponses dynamiques plus grandes sur un pont de fréquence propre (f) de l'ordre de 3.0 Hz (portée d'environ 40 mètres) que sur des ponts dont les fréquences propres étaient d'un autre niveau. Les incréments dynamiques étaient du même ordre d'amplitude non critique que dans le cas ci-dessus.

- Ni les véhicules à suspension acier, ni ceux à suspension pneumatique n'ont induit de réponse dynamique significative du pont aux fréquences propres comprises entre les fréquences de rebond de la partie suspendue du véhicule et celle du débattement de l'essieu, c'est-à-dire f = 4.4 Hz (L ≈≈ 31 m) et f = 5.1 Hz (L ≈ 23 m).

Le cas d'un pont de moyenne à longue portée dont la couche de roulement et celle de ses accès présentaient un mauvais uni n'entrait pas dans le cadre de la présente expérimentation. De même on n'a pas étudié le cas d'un pont présentant un mauvais uni mais avec des approches ayant un bon uni. Par contre, le cas d'un pont de bon uni dont les approches présentaient un mauvais uni a été étudié.

Ponts de courte portée

Les essais ont couvert le cas d'un pont de courte portée dont la couche de roulement et ses accès présentaient un mauvais uni (portée d'environ 10 m, fréquence d'environ 10 Hz). Les résultats des essais sont décrits ci-dessous :

- Lors du déplacement de véhicules à suspension pneumatique à vitesse critique, induisant des caractéristiques de sur-oscillations d'essieux, on a observé des réponses dynamiques importantes et des cycles de fatigue multiples. Ces réponses dépassaient de 4.5 fois les spécifications de chargement dynamiques autorisées à la conception du pont. Quand il n'y avait pas induction de vibrations d'essieu, la réponse dynamique était beaucoup plus petite.
- Une explication probable de ceci réside dans le fait que la répartition entre essieux très limitée de la charge dynamique dans les suspensions pneumatiques permet aux essieux d'un groupe de vibrer en phase avec la fréquence d'oscillation. Des dispositifs spécifiques limitent cette possibilité sur les suspensions conventionnelles à lames d'acier. La différence de comportement a été fondamentale dans les effets dynamiques associés au couple suspension pneumatique et pont de courte portée.
- On a constaté que l'amortissement, à la fois du pont et de la suspension du véhicule, jouait un rôle fondamental dans la maîtrise des effets dynamiques sur les ponts de courte portée.
- Un amortissement élevé du pont réduit la capacité respective de la structure à amplifier les effets des charges dynamiques de roue, même dans le cas d'une concordance de fréquences (dans la fourchette de fréquences du débattement des essieux).
- Les suspensions pneumatiques équipées d'un amortissement inadéquat sont potentiellement très dommageables pour les ponts de courte portée.

Il a été démontré que le degré d'amortissement du pont est très important pour des ponts de courte portée, ce qui n'est pas le cas pour des ponts de portée moyenne ou grande. Ceci peut être dû au fait que les coefficients d'amortissement sont plus faibles et dans une fourchette beaucoup plus resserrée pour les ponts de moyenne et grande portée par rapport aux ponts de courte portée. Le coefficient d'amortissement (ξ) des ponts de moyenne et grande portée est compris entre 0.8 et 2%, alors que celui des ponts de courte portée varie entre 1 et 5%.

Comparaison avec les résultats des essais standards en Suisse

L'incrément dynamique maximum pour chaque configuration de pont/véhicule de DIVINE a été comparé aux résultats des essais similaires réalisés en Suisse, portant sur des poids lourds à deux essieux équipés de suspensions à lames d'acier. Cette comparaison, illustrée dans la figure IV.18., permet de faire les commentaires suivants :

- Dans la fourchette de fréquence du rebond de la partie suspendue du véhicule (f) (1.5 à 3 Hz), les incréments dynamiques sont les plus forts pour le véhicule (la suspension) dont la fréquence propre concorde avec la fréquence propre fondamentale du pont.

- Dans le cas de fréquences concordant à une valeur voisine de 1.5 Hz, l'incrément dynamique maximum mesuré croise la ligne en trait plein de la figure IV.18., qui indique la limite supérieure des incréments dynamiques observés dans le cadre d'expérimentations antérieures.

- Dans la fourchette de fréquences de débattement de l'essieu, entre 8 et 15 Hz, des incréments dynamiques dépassant nettement la limite supérieure de l'expérimentation suisse ont été observés, à l'exception des résultats obtenus pour un pont fortement amorti.

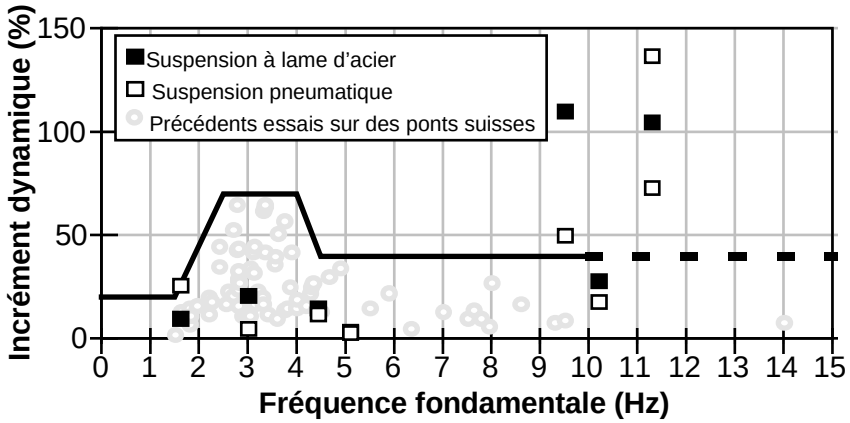
- Pour les fréquences comprises entre celles du rebond de la partie suspendue du véhicule et celle de l'oscillation de l'essieu, la réponse dynamique du pont est relativement faible et le type de suspension a moins d'importance.

- Les véhicules lourds peuvent entrer en couplage dynamique avec des ponts de grande et de courte portée.

- La qualité du profil en long de la route est un paramètre très important dans la détermination de la réponse dynamique d'un pont.

- Jusqu'à maintenant, seules des expérimentations très limitées ont été consacrées à la réponse des ponts aux fréquences de débattement des essieux.

Figure IV.18. **Incrément dynamique en fonction de la fréquence fondamentale d'un pont, y compris les données de l'essai DIVINE**



Source : Cantieni et Heywood, 1998.

Discussion générale sur les résultats de l'Elément 6

Les paramètres principaux qui régissent la réponse dynamique des ponts sollicités par le passage d'un poids lourd isolé ont été identifiés comme suit :

- Les caractéristiques propres de l'ouvrage (fréquence, amortissement, forme).
- Les fréquences et amplitudes des charges dynamiques des roues du véhicule.
- La capacité d'amortissement du système de suspension du véhicule.
- Les défauts d'uni sur le profil en long du pont et de ses accès.
- La vitesse du véhicule.

L'un des paramètres, à savoir les caractéristiques propres de l'ouvrage, est constant et indépendant de toute influence externe ce qui signifie qu'il ne peut varier que par le choix de différents ponts.

Les défauts d'uni sont aussi plus ou moins constants. Cependant, des dégradations dues au vieillissement et la présence possible d'obstacles artificiels doivent être prises en considération. La variation de l'uni sur l'ensemble d'une section d'essai donnée est un problème trop complexe pour être traité en raison de sa longueur limitée.

Les fréquences et les amplitudes des charges dynamiques des roues du véhicule sont étroitement corrélées à trois autres ensembles de paramètres : les défauts d'uni de la chaussée, la vitesse (très variable) des véhicules et la capacité (incertaine) d'amortissement de la suspension du véhicule. Cette corrélation très complexe constitue la raison de la difficulté de traiter de façon isolée le problème de la réponse dynamique d'un pont au passage de véhicules lourds. Cependant, un certain nombre d'éléments de base apparaissent clairement :

- Aucune amplification dynamique (quasi résonance) ne se produit en dehors d'une concordance de fréquences. Le modèle d'un couplage du système s'applique aux ponts de moyenne et grande portée. Pour les ponts de courte portée, le modèle d'un processus à vibration forcée est plus approprié (voir Chapitre III).

- Des charges dynamiques de roue élevées provoquées par des défauts d'uni sur la chaussée et/ou un manque de capacité d'amortissement de la suspension du véhicule produisent une réponse dynamique élevée du pont.

- Dans le cas d'une concordance de fréquences, des charges dynamiques de roue élevées produisent une réponse dynamique très élevée du pont. Ce cas n'est en général pas couvert dans les codes de dimensionnement des ponts.

Les essais DIVINE n'ont permis de répondre qu'à une partie seulement des questions formulées au début du projet. Ceci est dû au fait que ni le cas d'un pont de courte portée dont le revêtement et celui de ses approches présentent un bon uni, ni celui d'un pont de moyenne et longue portée dont le revêtement et celui de ses approches présentent un mauvais uni, n'ont été traités par les essais DIVINE. En outre, il n'était pas possible d'étudier le problème de la présence de multiples véhicules sur les ponts.

Malgré ces limitations, les expérimentations DIVINE ont permis de tirer les conclusions suivantes :

- Dans le cas de concordance de fréquences entre 1.5 et 1.8 Hz, des vibrations excessives du pont ne devraient pas se produire pour des véhicules à suspension pneumatique et sur des ponts dont la couche de roulement présente un bon uni.

- Dans le cas de concordance de fréquences à environ 10 Hz, des vibrations excessives du pont peuvent apparaître, à la fois pour des véhicules à suspensions mécaniques et pneumatiques circulant sur des ponts dont l'uni du revêtement est de mauvais à moyen. Cette situation est particulièrement préoccupante dans le cas où les absorbeurs de chocs des véhicules à suspension pneumatique sont défectueux.

Les questions qui demeurent ouvertes sont les suivantes :

- Dans des conditions de concordance de fréquences vers 1.5 à 1.8 Hz, que pourrait être l'incrément dynamique maximum dans le cas d'un revêtement d'uni moyen à mauvais ?

- Dans des conditions de concordance de fréquences vers 10 Hz, quelle qualité d'uni et quelle qualité d'amortissement de la suspension sont nécessaires pour éviter des vibrations excessives du pont ?

Pour répondre à ces questions, il sera nécessaire d'entreprendre d'autres essais ou études analytiques.

IV.2. Effets des suspensions des véhicules sur les performances et les dégradations des chaussées

L'Elément 1 du projet DIVINE a fourni la première comparaison jamais faite des différences d'évolution d'une chaussée sous des chargements dynamiques produits par deux systèmes différents de suspension. Dans le cadre de cet essai, une chaussée sous abri construite spécialement et instrumentée, présentant une circonférence moyenne de 58 mètres, a été soumise à 1.7 million de cycles de chargement par deux roues d'essai diamétralement opposées et se déplaçant à une vitesse d'environ 45 km/h sur des chemins de roulement séparés. La roue d'essai circulant sur le chemin extérieur a été équipée d'une suspension en acier et l'autre, circulant sur le chemin intérieur, d'une suspension pneumatique. Les deux roues simples, équipées de pneus super larges, ont été lestées pour obtenir une charge statique de 49 kN. Le test étant conduit sous abri, les influences des variations de température ont été atténuées.

Toutes les caractéristiques clés du système dynamique véhicule-chaussée décrites au Chapitre III ont été mesurées au cours de cette expérimentation. Etant donné que l'objectif spécifique de l'essai était de comparer les effets sur la dégradation de la chaussée de deux types de chargement dynamique produit par deux types de suspension différents, des efforts importants ont été déployés pour s'assurer que les deux types de suspensions étaient étudiés dans des conditions les plus identiques possibles.

IV.2.1. Détails des conditions de l'essai

Tous les détails de l'essai sont décrits dans le rapport final (Kenis et Wang, 1997). Un résumé des résultats est présenté ci-dessous.

Chaussée expérimentale

La chaussée utilisée pour l'essai était constituée d'une couche de roulement bitumineuse d'une épaisseur moyenne de 88 mm, reposant sur une couche de base en grave non traitée d'épaisseur moyenne de 199 mm, elle-même sur une fondation dont le CBR (*California Bearing Ratio* – indice portant californien) était de 12. Selon les spécifications européennes, elle peut être considérée comme une

chaussée “mince” – une épaisseur de 150 à 200 mm étant typique pour les couches bitumineuses de routes supportant des trafics lourds. Une étude approfondie des propriétés des matériaux de chaussée et de leurs caractéristiques structurelles et environnementales a été menée avant et après la construction, de même qu’avant et après la mise sous circulation (Kennis et Wang, 1997), (Steven et al., 1996a).

Les essais sur la chaussée ont confirmé que les caractéristiques structurelles des deux chemins de roulement ne présentaient pas, à la construction, de différence majeure (Steven et al., 1996b), bien que le chemin extérieur se soit avéré légèrement plus résistant à certains égards. Sur la circonférence, la variabilité des propriétés mécaniques et structurelles de la chaussée a également été considérée comme relativement faible. Les défauts d’uni sur le profil en long de la circonférence sont apparus plus importants que prévu, et on a constaté que le chemin de roulement intérieur avait un uni légèrement moins bon que le chemin de roulement extérieur.

Suspensions

Les deux suspensions montées sur les roues d’essai, bien que n’étant pas des systèmes commercialisés, ont été fabriquées à partir de composants typiques de la suspension des véhicules lourds et ont montré un comportement dynamique semblable à celui des suspensions pneumatiques et à lames d’acier dont sont équipés les véhicules lourds.

Les essais dynamiques préliminaires (Sharp et Moffat, 1996) réalisés sur les deux suspensions ont mis en évidence que le système pneumatique réagissait avec une fréquence et un amortissement très semblables aux suspensions pneumatiques en service sur les véhicules, alors que la suspension mécanique avait une fréquence un peu plus basse et un amortissement plus fort que ce qu’on pouvait attendre des suspensions classiques à lames d’acier. Ces essais ont également montré que la différence d’agressivité, vis-à-vis de la chaussée, des deux types génériques de suspension était probablement plus faible que ce qui se passe en réalité sur le terrain. Cependant, l’essai a montré une nette différence entre les efforts dynamiques réellement mesurés (par le CCD) pour les deux types de suspension, et il apparaît que le comportement dynamique des suspensions à lames d’acier dans le cadre de l’essai, c’est-à-dire reliées au bras rotatif du système CAPTIF, ont produit des forces d’impact des roues semblables à celles d’une suspension du même type montée sur un camion.

IV.2.2. Comparaison résumée des effets des deux types de suspension

Le tableau IV.3. résume les différences entre les caractéristiques mesurées de l’interaction véhicule-chaussée dans le cadre de l’essai accéléré de chargement dynamique en fonction du type de suspension, pneumatique ou acier. Il apparaît à travers la plupart des mesures que l’effet du chargement sur la chaussée augmente significativement dans le cas de la suspension acier. Cependant, l’analyse a aussi montré que des facteurs liés à la chaussée, notamment la variabilité de la capacité structurelle, ont également eu une incidence sur les résultats de l’essai.

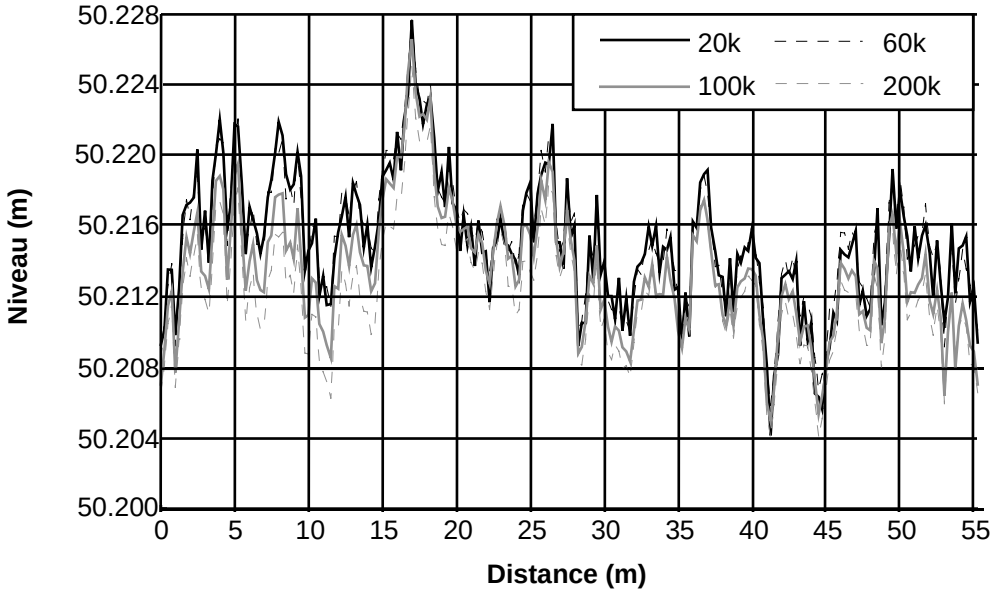
Si on compare les effets des suspensions sur des chaussées très semblables et présentant des caractéristiques structurelles particulièrement uniformes (avec un coefficient de variation inférieur à 10%), la différence la plus sensible se situe au niveau du profil en long de la chaussée (voir figures IV.19. et IV.20.). La suspension acier a produit une augmentation de 15% des défauts d’uni (mesurés par l’IRI) et une fissuration localisée également plus importante de 10% approximativement.

Tableau IV.3. **Comparaison des effets des deux systèmes de suspension sur la chaussée**

Caractéristique mesurée	Roue équipée d'une suspension pneumatique (chemin de roulement intérieur)	Roue équipée d'une suspension acier (chemin de roulement extérieur)	Comparaison des effets sur la chaussée
Profil en long (selon la circonférence) de la chaussée			
– Défauts d'uni (IRI)	Initialement relativement élevés (4.8) ; légère évolution au cours de l'essai sans dépasser 4.8	Initialement à 4.1 ; a augmenté jusqu'à 4.8 au cours de l'essai	Augmentation des défauts d'uni de 15 % dans le cas de la suspension acier
– Ondulations (longueur d'onde d'environ 10 m)	Très peu d'évolution	Evolution significative au cours de l'essai	Effet de la suspension acier 80 fois plus élevé
Indice de qualité de service (PSI)	En diminution au cours de l'essai	En dégradation légèrement plus forte au cours de l'essai	Des signes de dégradation plus forte sous la suspension acier
Orniérage (sauf l'ornière isolée)			
– profondeur moyenne d'ornière	8.94 mm	8.44 mm	Profondeur moyenne d'ornière inférieure de 6 % pour la suspension acier
– écart type	1.74 mm	1.95 mm	Variabilité supérieure de 12 à 18 % pour la suspension acier
– coefficient de variation	0.195 mm	0.231 mm	
– profondeur maxi d'ornière	12.4 mm	14 mm	Supérieure de 12 % pour la suspension acier
Orniérage (y compris l'ornière isolée)			
– profondeur moyenne d'ornière	8.75 mm	10.5 mm	Profondeur moyenne d'ornière supérieure de 20 % pour la suspension acier
– profondeur maxi d'ornière	12.4 mm	36.9 mm	Une faiblesse structurelle de 30 % et un facteur d'impact de 1.13 à 1.4 sous la suspension acier ont produit une profondeur d'ornière supérieure de 200 % sous la suspension acier
Fissuration			
– étendue totale	64 m	87 m	La suspension acier a généré une longueur de fissures supérieure de 36 % (y compris l'ornière isolée)
– intensité (au 29ème point de mesure le plus affecté)	0.99 m par point de mesure	1.10 m par point de mesure	En moyenne, la suspension acier a généré une fissuration localisée supérieure de 10 %

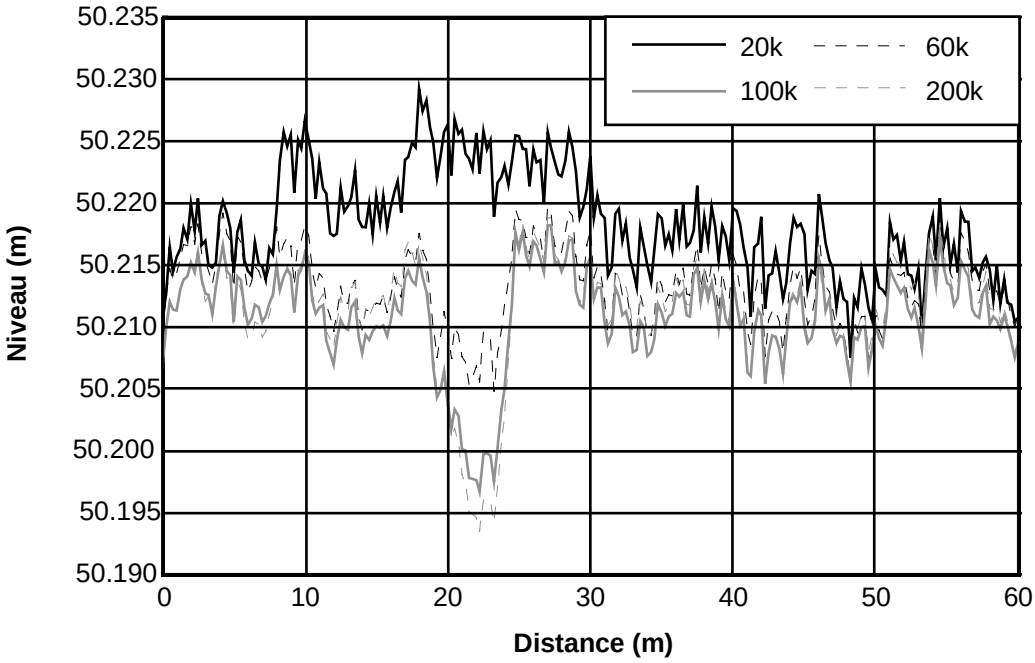
Source : CAPTIF.

Figure IV.19. **Variation du profil en long du chemin de roulement intérieur sous l'effet de chargements répétés (suspension pneumatique)**



Source : CAPTIF.

Figure IV.20. **Variation du profil en long du chemin de roulement extérieur sous l'effet de chargements répétés (suspension acier)**



Source : CAPTIF.

Ces différences dans les effets des suspensions sont considérées comme des valeurs minimales car :

- Par rapport à la suspension pneumatique, la roue équipée d'une suspension acier se déplaçait à une vitesse supérieure de 9%, ce qui aurait dû limiter les déformations dans le chemin de roulement extérieur ; et

- Par rapport au chemin de roulement de la suspension acier, les défauts d'uni sur le chemin de roulement intérieur, circulé par la roue à suspension pneumatique, étaient supérieurs de 17% à la construction de la piste, augmentant ainsi le niveau du chargement dynamique.

- Il est possible que les roues utilisées pour l'essai CAPTIF aient également produit des forces importantes de "frottement" latérales et que ces forces aient été plus grandes pour le chemin de roulement intérieur que pour le chemin de roulement extérieur.

L'essai a également démontré que le chargement dynamique sous la suspension acier interagissait avec la variabilité structurelle de la chaussée pour produire des déformations et de l'orniérage. Ceci a été particulièrement net quand on a intégré dans l'analyse les effets de la faiblesse structurelle à proximité du point de mesure 21 du chemin de roulement extérieur. Une baisse de 30% de la capacité portante combinée à une augmentation de 13 à 41% (en hausse au cours de l'essai) du chargement dynamique a produit une ornière localisée de grande taille, dont la profondeur a été dans un facteur trois par rapport à celle des autres ornières induites sous la charge. Cette interaction entre la suspension acier et la structure de la chaussée a également produit 36% de dégradations supplémentaires de fissuration.

Bien entendu, l'interaction entre la suspension acier et la structure de chaussée ne peut pas être directement comparée à un effet du même type produit par la suspension pneumatique, parce que la faiblesse structurelle de 30% est apparue uniquement sur le chemin de roulement extérieur (utilisé pour la suspension acier). Toutefois, il est peu probable que le chargement dynamique généré par la suspension pneumatique – qui est resté relativement faible et a produit un incrément dynamique maximum de 10% - ait eu une quelconque influence mesurable sur l'orniérage ou la déformation de la chaussée.

IV.2.3. Implications pour l'effet des suspensions sur les chaussées

Les résultats de l'essai accéléré de chargement dynamique apportent des éclaircissements important sur les effets des suspensions et du chargement dynamique vis-à-vis de la performance des chaussées. Cependant, l'application de ces résultats à des poids lourds et à des chaussées dans des conditions réelles est difficile et requiert des précautions à un certain nombre d'égards.

Amplitude du chargement dynamique

A la fois les chargements statiques sur les roues d'essai et, dans le cas de la suspension acier, les chargements dynamiques étaient relativement élevés dans le cadre de l'essai accéléré. Sur ce point, ils ont été représentatifs du niveau de charge par des poids lourds en service.

Pressions de contact pneu-chaussée

Des recherches précédentes (Bonaquist, 1992) avaient confirmé que l'utilisation de roues simples à pneus super larges dans l'essai CAPTIF, par comparaison à des jumelages, allait provoquer un chargement plus localisé de la chaussée, et donc augmenter les réponses de la chaussée. Cependant, les résultats issus de l'Elément 2 montrent que, dans le cas de chaussées plus minces, telles que celle utilisée pour l'essai CAPTIF, l'influence du chargement dynamique sur les déformations en surface de la chaussée est atténuée par des modifications dans la forme même de la section de contact.

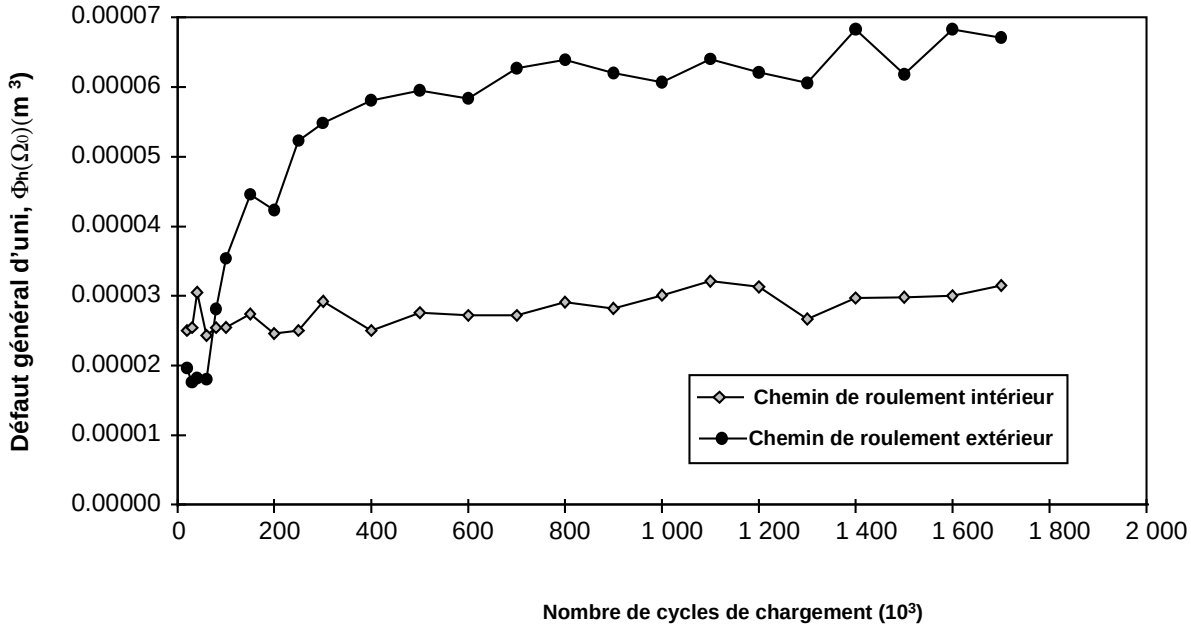
Signification des évolutions du profil en long

L'un des problèmes majeurs posé par l'application des résultats de l'essai CAPTIF à des chaussées sous conditions réelles est de représenter le profil en long d'une façon qui soit significative, à la fois pour un essai sur une piste d'échelle relativement réduite et pour une chaussée en vraie grandeur. Il a été montré que l'IRI (*International Roughness Index*) et le PSI (Indice de Qualité de Service) étaient d'un intérêt limité pour la piste d'essai circulaire. Toutefois, la suspension acier a augmenté les défauts d'uni (d'une chaussée présentant déjà un mauvais uni) d'environ 15%, alors que l'IRI de la chaussée sous suspension pneumatique n'a pas été affecté même dans des conditions très intenses de circulation.

On a trouvé que l'index ISO de densité comparative des défauts d'uni, également dénommé défaut général d'uni, donnait des bons résultats et pouvait être appliqué pour des chaussées en vraie grandeur. A nouveau, la piste CAPTIF est beaucoup plus courte que ce qui est recommandé pour ce type d'analyse, et peu de données sont actuellement disponibles pour ce format de routes. La figure IV.21. montre les modifications de la densité comparative au cours de l'essai pour les deux chemins de roulement. Il apparaît que l'augmentation des défauts d'uni du chemin de roulement intérieur est faible alors que, dans la trace extérieure, elle est beaucoup plus importante. L'augmentation s'est produite, non seulement pendant la formation de l'ornière isolée, mais également après sa stabilisation. En associant une droite de régression à la fonction de densité comparative à partir de 400 000 chargements, on montre que la valeur des défauts d'uni sur la trace de roue extérieure a augmenté dans une proportion 80 fois plus importante que sur la trace intérieure.

Une telle analyse suggère que le nombre de cycles amenant à une augmentation donnée des défauts d'uni est beaucoup plus faible pour la suspension acier que pour la suspension pneumatique (dans un facteur d'environ 80). Les déformations de la chaussée sous la suspension pneumatique sont à relier principalement à la variabilité de la capacité portante de la structure, alors que les déformations sous la suspension acier ont été affectées de façon interactive à la fois par la variabilité structurelle et par le chargement dynamique. Etant donné le degré élevé de concentration du chargement dynamique dans l'essai CAPTIF et le rôle interactif de la variabilité structurelle de la chaussée, il est difficile de faire un lien entre les effets de la suspension sur l'uni — sans parler de l'effet sur le chargement dynamique — obtenus dans l'essai CAPTIF et ceux obtenus dans des conditions réelles. Cependant, le fait que la suspension pneumatique n'ait qu'une influence très faible sur les défauts d'uni, contrairement à la suspension acier, montre qu'il est fort probable qu'en pratique le type de suspension ait une influence importante sur l'uni de la chaussée.

Figure IV.21. **Progression des défauts d'uni (densité comparative)**



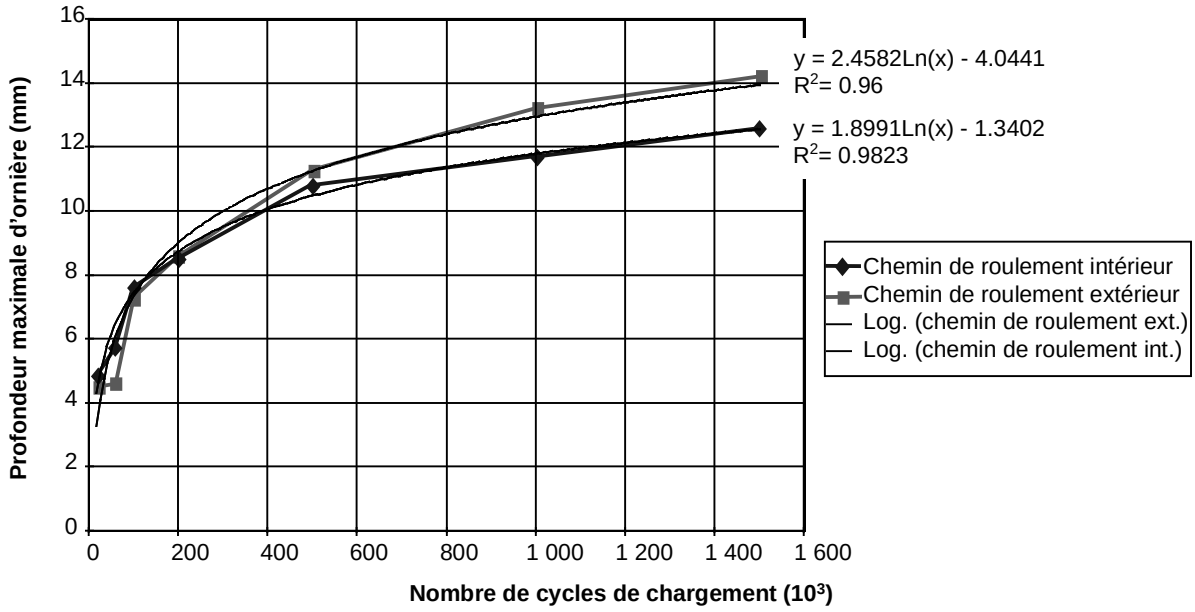
Source : CAPTIF.

Signification de l'orniérage

La charge statique relativement élevée dans l'essai CAPTIF, combinée à l'utilisation d'une roue simple à pneu super large et à la relative canalisation du trafic dans les chemins de roulement, aurait dû accélérer le développement de l'orniérage. Cependant, ce dernier est resté relativement faible à l'exception de l'ornière isolée sur la trace extérieure près du point de mesure 21, où la couche de base moins résistante a été déformée de façon importante en coïncidence avec l'application d'un pic de chargement dynamique.

Malgré le degré d'orniérage généralement peu élevé constaté sur la chaussée de l'essai CAPTIF située sous abri et le fait que les profondeurs moyennes d'ornière étaient similaires pour les deux chemins de roulement, on a constaté des différences dans la profondeur maximale d'ornière entre les deux traces de roues. En outre, la profondeur maximale d'ornière pour le chemin sous suspension acier était influencée par le chargement dynamique. La progression de la profondeur maximale d'ornière dans les deux traces de roue, telle qu'indiquée dans la figure IV.22., ne montre pas de signe d'une tendance à l'accélération du dommage qui pourrait être extrapolée jusqu'à un certain niveau de ruine de la chaussée pour déterminer la durée de vie relative de celle-ci sous les deux types de suspensions. Cependant, en considérant comme critique une profondeur maximale d'ornière de l'ordre de 11 à 12 mm, l'analyse des courbes d'orniérage de la figure IV.22. montre que la suspension pneumatique peut autoriser de 45 à 65% de cycles supplémentaires par rapport à la suspension acier, avant de produire le même dommage en termes d'orniérage. Une analyse semblable de l'écart type montre que la suspension pneumatique peut autoriser de 35 à 55% de cycles supplémentaires. La signification de ces résultats doit être tempérée par la faible quantité globale des dégradations d'orniérage apparues, la précision des mesures de la profondeur d'ornière et le fait que l'on a utilisé la variabilité de la profondeur d'ornière plutôt que sa valeur moyenne.

Figure IV.22. **Profondeur maximale d'ornière en fonction du nombre de cycles de chargement**



Source : CAPTIF.

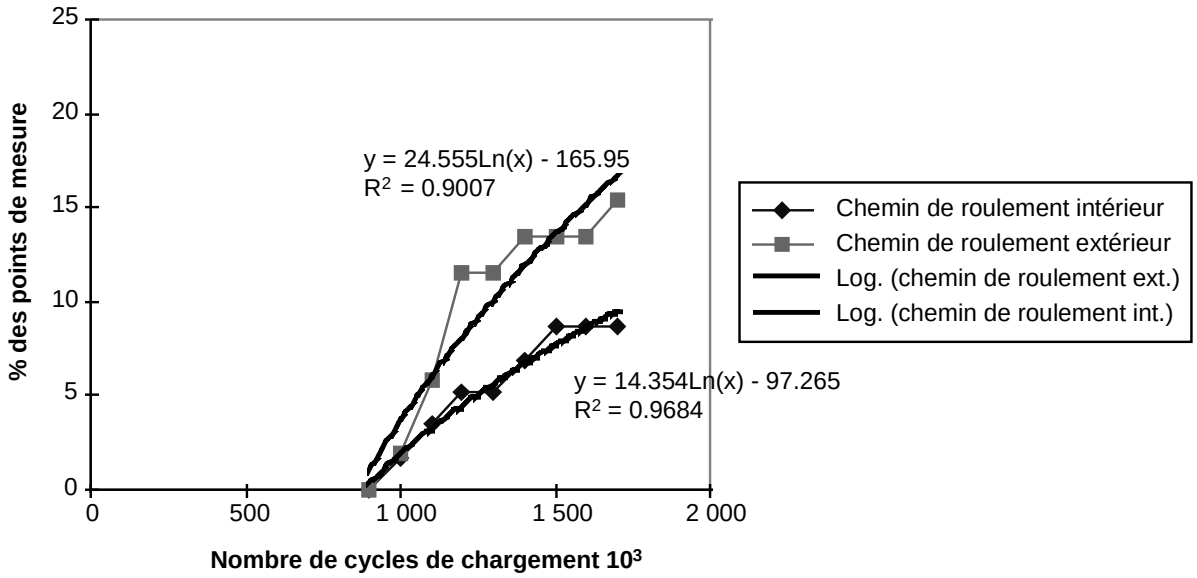
Signification de la fissuration

La fissuration de la couche de roulement n'est pas apparue avant 840 000 cycles de chargement. La nature de la fissuration était inattendue dans le sens qu'il s'agissait d'une fissuration par le haut qui n'a pas traversé toute la couche. La nature inhabituelle de la fissuration a pu être causée par les importantes forces latérales de pneu générées par le dispositif d'essai CAPTIF. On a trouvé que l'intensité de la fissuration était reliée à la capacité structurelle de la chaussée, et comme on l'a déjà dit, la fissuration apparaît n'avoir qu'une faible corrélation avec la localisation des pics de chargement dynamique.

Afin de disposer d'informations concernant la durée de vie de la chaussée respectivement sous les suspensions pneumatique et acier, on a conduit une analyse, pour la chaussée sous suspension acier, sur le nombre de points de mesure – ou stations – où la fissuration atteignait un certain niveau d'intensité.

La figure IV.23. montre la progression, en pourcentage, du nombre de points de mesure à proximité desquels la fissuration a dépassé un niveau de 2.5 mètres linéaires, niveau retenu pour montrer l'évolution plus rapide du nombre de points de mesure présentant des dégradations par fissuration significatives provoquées sous la suspension acier. L'analyse de ces courbes montre que le nombre de cycles de chargement nécessaire pour produire une longueur de fissures de 2.5 mètres linéaires pour 10% des points de mesure était inférieur d'environ 30% pour la suspension acier (voir aussi le tableau IV.3.).

Figure IV.23. **Progression des dégradations par fissuration**



Source : CAPTIF.

Signification de la répétabilité spatiale

Le chargement dynamique appliqué dans l'essai CAPTIF présentait une répétabilité élevée. Après le premier cycle de la roue d'essai sur la circonférence de la piste CAPTIF, le chargement dynamique a rapidement pris des caractéristiques qui n'ont été modifiées que par les évolutions du profil en long. Les modifications les plus significatives du profil en long se sont produites dans le chemin de roulement de la suspension acier, particulièrement dans les premières phases de l'essai.

La répétabilité spatiale du chargement dynamique sera beaucoup plus faible sur une route réelle que dans le cadre de l'essai CAPTIF.

Implications globales pour la "moindre agressivité"

Il est très difficile d'extrapoler les résultats de l'essai de chargement accéléré à une chaussée en service sous un trafic "réel" de véhicules lourds. Certains éléments tendent à exagérer la sévérité de l'essai par rapport au contexte d'une route en vraie grandeur, alors que pour d'autres éléments la tendance s'inverse.

Le degré d'accumulation des dommages a vraisemblablement été exagéré par :

- Le choix d'une chaussée bitumineuse relativement mince dans le cadre de l'essai.
- La canalisation du trafic dans le même chemin de roulement.
- Le niveau élevé de répétabilité spatiale du chargement dynamique le long de la circonférence des deux chemins de roulement ; et
- Les forces latérales importantes générées par les roues de l'essai.

D'un autre côté, les dommages potentiels ont été atténués en raison de l'absence des influences liées à l'environnement telles que les variations plus fortes de température et la présence d'eau dans la couche de base et la plate-forme.

Etant donné le niveau de dégradation relativement faible de la chaussée malgré l'intensité du trafic, il semblerait que les facteurs minorant les dommages aient tendance à prévaloir dans le cadre de l'essai.

Sur la base des dégradations apparues en termes d'orniérage, fissuration et modifications du profil en long, l'essai a mis en évidence une durée de vie plus longue de la chaussée sous la suspension pneumatique par rapport à celle sous la suspension acier. Certains résultats, relatifs aux défauts d'uni, ont montré que, pour une dégradation donnée de l'uni, la chaussée sous suspension pneumatique peut supporter un trafic 80 fois plus important. De même pour un niveau donné de fissuration, la chaussée sous suspension pneumatique peut supporter un nombre de cycles de chargement 30% supérieur par rapport à la chaussée sous suspension acier. En ce qui concerne la variabilité de la profondeur de l'orniérage et ses valeurs pics, la chaussée sous suspension pneumatique peut supporter un nombre de cycles supérieur de 35 à 65% avant d'aboutir au même niveau de détérioration. D'autres indicateurs plus conventionnels de dégradation des chaussées, tels que la profondeur moyenne d'ornière et la longueur totale des fissures, montrent une influence faible du type de suspension.

L'influence plus forte de la suspension acier sur les défauts d'uni démontre l'importance des suspensions et des chargements dynamiques dans l'agressivité des véhicules vis-à-vis de la chaussée, en particulier si on considère le poids croissant de l'uni dans les systèmes de gestion de chaussée. Sur un plan général, une estimation des bénéfices attendus de l'utilisation des suspensions pneumatiques, sur la base des résultats de l'essai CAPTIF, devrait être pondérée par :

- La répétabilité spatiale plus faible dans le cas de poids lourds circulant sur des chaussées en vraie grandeur.
- La présence de structures plus épaisses pour les chaussées supportant un trafic lourd dans de nombreux pays.
- L'incidence des facteurs d'environnement sur les chaussées en vraie grandeur.

Le Projet DIVINE ne fournit pas d'informations scientifiques suffisantes pour faire une évaluation fiable et quantitative. Cependant, la progression d'aspects significatifs des défauts d'uni sous trafic est vraisemblablement plusieurs fois plus rapide dans le cas de suspensions acier, par rapport aux suspensions pneumatiques, particulièrement sur les chaussées souples les moins épaisses.

Implications pour l'analyse des chaussées

- Le Projet DIVINE ne visait pas à examiner les modèles existants de prévision de durée de vie des chaussées, ni les modèles d'évaluation de la performance des chaussées, mais plutôt à mesurer les performances relatives d'une chaussée unique, uniforme, sous des chargements dynamiques différents générés par deux types de suspension. Les modèles existants de prévision de la durée de vie n'ont été utilisés que pour aider à dimensionner une chaussée qui, sous la charge statique spécifiée, aurait certainement atteint un niveau inacceptable, en termes de déformation de surface et de fissuration, pour une période de chargement sensiblement équivalente.

- Les modèles de prévision de la durée de vie dérivent généralement de la réponse aux paramètres de chargement, particulièrement l'allongement à la base de la couche bitumineuse et la déformation verticale à la surface du sol support. Les modes de dégradation observés – fissuration par le haut de la couche bitumineuse et déformation de la couche de base – n'étaient pas représentatifs des résultats obtenus par les modèles de durée de vie en usage, peut-être en raison des caractéristiques du dispositif d'essai CAPTIF. Cependant, les modes de dégradation observés avec CAPTIF ont également été observés ailleurs.

- Sur la base de l'essai CAPTIF, il est essentiel d'inclure la variabilité de la portance de la chaussée et le chargement dynamique dans les modèles de performance.

- Dans le cadre des essais accélérés sur chaussées, il faudrait mettre davantage l'accent sur le suivi des profils de la couche de roulement à la construction, et de leur évolution dans le temps ainsi que de celle de l'uni. Naturellement, la difficulté se situe au niveau de la longueur relativement courte des chaussées testées dans ce type d'installation, et de la non-adéquation des technologies actuelles pour fournir dans de telles conditions des données qui aient un sens et puissent être appliquées en pratique.

- Par définition, tout essai accéléré sur chaussée devrait être conduit parallèlement à des études de performance à long terme et à des essais sur les caractérisations de laboratoire des matériaux, parce que les essais accélérés constituent un lien entre ces deux activités. Le manque de données fiables et contrôlées, mesurées sur les réseaux routiers, constitue un obstacle majeur au développement de modèles de performance des chaussées ayant un sens et pouvant être utilisés en confiance par le praticien.

- Bien que l'IRI soit une mesure utile de l'état de la chaussée, il ne convient pas aux installations de chargement accéléré. Les mesures de profil fondées sur la densité spectrale de puissance (DSP) fournissent une meilleure mesure pour les pistes courtes et permettent une meilleure comparaison entre les essais accélérés et les essais sur le réseau routier.

V.3. Evaluation de la "moindre agressivité" des véhicules vis-à-vis de la chaussée

Pour mériter la qualification "peu agressive", la suspension doit, dans la mesure du possible, isoler le véhicule par rapport aux défauts d'uni de la route, de façon à minimiser les forces d'impact des roues pour des charges statiques données. La suspension doit être efficace sur l'ensemble des caractéristiques d'uni. En particulier, il est utile que les suspensions des véhicules lourds soient performantes sur des routes relativement neuves et en bon état, ainsi que sur des routes en moins bon état, proches de la fin de leur durée de vie.

Il existe de nombreux arguments (Woodrooffe, 1997, Magnusson et al., 1984, Cole et Cebon, 1994, Rakheja et Woodrooffe, 1994) selon lesquels une basse fréquence de rebond de la masse suspendue du véhicule, une réduction de l'accélération de la masse non suspendue, un amortissement visqueux adéquat et un amortissement de Coulomb (frottement) réduit contribuent de façon majeure à limiter l'agressivité d'une suspension. La relation entre les caractéristiques de l'amortissement hydraulique et l'agressivité de la suspension est d'un grand intérêt parce que l'utilisation du protocole d'essai de la Directive 92/7/EEC de la Communauté Européenne a montré que l'amortissement était le paramètre le plus difficile à mesurer (Sweatman, 1994, OCDE, 1992, Aurell, 1991). Les raisons de la difficulté de la mesure de l'amortissement sont liées à l'influence de variables telles que le mode de réponse du véhicule,

la longueur active sur laquelle travaille l'amortisseur, l'amplitude de la sollicitation, la température du fluide d'amortissement et le degré d'usure de l'amortisseur au cours de sa durée de vie en service.

Une précédente étude de l'OCDE (1992) a montré des difficultés liées aux essais des suspensions. Les difficultés comprenaient la normalisation de la déflexion et de la température du ressort, et l'application simultanée d'une excitation à tous les essieux dans un groupe d'essieux. L'étude a également souligné que les analyses des résultats souffraient d'un manque de précision dans l'interprétation de la caractéristique de décroissance de la force avec le temps, et a par conséquent recommandé de prendre en compte les contributions relatives de l'amortissement par frottement et visqueux.

Il est également essentiel de s'assurer que les modifications apportées au système de suspension pour le rendre moins agressif n'ont pas un effet négatif sur la sécurité du véhicule. De fait, si possible, tous les développements visant à rendre les suspensions moins agressives devraient avoir pour but d'améliorer la sécurité à travers des améliorations du freinage des véhicules, ainsi que du contrôle de la dynamique du roulis et de la trajectoire.

IV.3.1. L'essai de lâcher de la Communauté Européenne (CE)

La Directive du Conseil de la Communauté Européenne (1992) donne une définition d'une suspension peu agressive et des essais qui s'y rapportent. Cette Directive suppose que les suspensions pneumatiques – pour lesquelles environ 75% de l'effet de ressort est assuré par un système pneumatique – peuvent être qualifiées de peu agressives. Le protocole d'essai s'applique aux essieux moteurs non suspendus pneumatiquement et définit une suspension comme "équivalente à une suspension pneumatique" si elle correspond aux caractéristiques et performances demandées suivantes :

- L'essieu doit être équipé de pneus jumelés.

- La suspension doit utiliser des amortisseurs hydrauliques. La fréquence de rebondissement de la masse suspendue du véhicule doit être inférieure ou égale à 2.0 Hz.

- Le coefficient d'amortissement de la masse suspendue doit être supérieur à 20% de l'amortissement critique (avec amortisseurs en place).

- Quand tous les amortisseurs sont démontés, le coefficient d'amortissement ne doit pas dépasser de plus de 50% la valeur obtenue avec les amortisseurs en service.

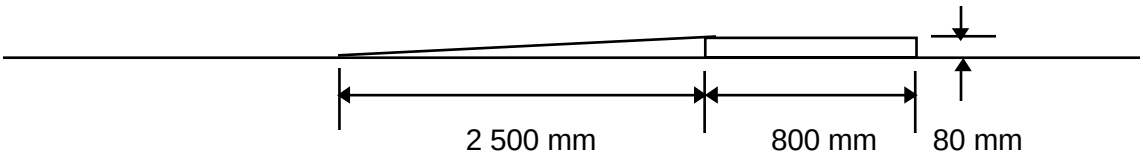
Afin de démontrer la conformité aux spécifications d'essais requises, les méthodes suivantes peuvent être utilisées :

- Faire passer le véhicule sur une marche spécifiée de 80 mm de hauteur (voir figure IV.24.) à 5 km/h, et analyser la fréquence de la suspension et l'amortissement à partir de la phase transitoire débutant après la rampe.

- Tirer le châssis du véhicule vers le bas, de façon à charger l'essieu moteur dans un facteur de 1.5 fois la valeur maximale de la charge statique ; puis libérer le véhicule et analyser l'oscillation consécutive.

– Tirer le châssis vers le haut, de façon à soulever la masse suspendue de 80 mm au-dessus de sa position en statique ; puis de même libérer le véhicule et analyser l'oscillation consécutive.

Figure IV.24. **Rampe de la CE pour l'essai des suspensions**



Source : Commission Européenne.

Sur la base des recherches menées jusqu'à présent, le bien-fondé des paramètres examinés dans le cadre de la Directive 92/7/EEC est fortement confirmé. Il est clair que les caractéristiques de fréquence et d'amortissement sont les attributs essentiels à retenir dans la définition de la moindre agressivité d'une suspension. Toutefois, les méthodes d'essai décrites par la Directive ne sont pas nécessairement les seules, ni les meilleures, méthodes pour démontrer la moindre agressivité. En outre, il conviendrait d'ajuster les valeurs cibles de fréquence et d'amortissement. Ceci est examiné plus loin dans la section IV.3.3.

IV.3.2. Essais sur les véhicules

Les essais sur les véhicules ont fait l'objet de deux tâches distinctes :

– Des expériences sur un simulateur de routes ; et

– Des essais sur les suspensions.

Les expériences sur le simulateur de routes

Le premier objectif de l'expérimentation sur le simulateur de routes était de déterminer, dans le cas de camions à deux essieux, la précision avec laquelle un simulateur équipé de quatre excitateurs pouvait reproduire les charges dynamiques des roues mesurées préalablement au cours d'essais sur chaussée. En relation avec un ensemble à cinq essieux tracteur et semi-remorque, le second objectif était d'examiner la différence de performance d'une suspension en termes de chargement sur les roues, selon que cette performance était évaluée isolément ou incorporée dans un système formé par le véhicule.

La procédure d'essai avec le simulateur de routes a consisté à :

1. Sélectionner des sections de routes présentant des qualités d'uni différentes (de "bon" à "mauvais") et mesurer leur profil en long dans les traces de roues.

2. Mener des essais sur les sections sélectionnées avec des véhicules équipés pour la recherche et instrumentés afin de mesurer les chargements dynamiques et la vitesse du véhicule.

3. Construire numériquement les signaux de déplacement vertical désirés pour les actionneurs du simulateur routier, en se basant sur les profils en long, les vitesses et les espacements entre essieux.

4. Reproduire les déplacements verticaux désirés en utilisant un simulateur routier à quatre actionneurs (figures IV.25. et IV.26.) pour solliciter les roues de deux essieux adjacents sur le véhicule de recherche et mesurer les chargements dynamiques au niveau des roues.

La procédure d'essai a fourni des mesures de forces d'impact des roues à partir des essais sur chaussées, pour une comparaison avec les mesures provenant du simulateur sur des profils en long identiques.

Figure IV.25. **Véhicule instrumenté du TRL sur le simulateur NRC**

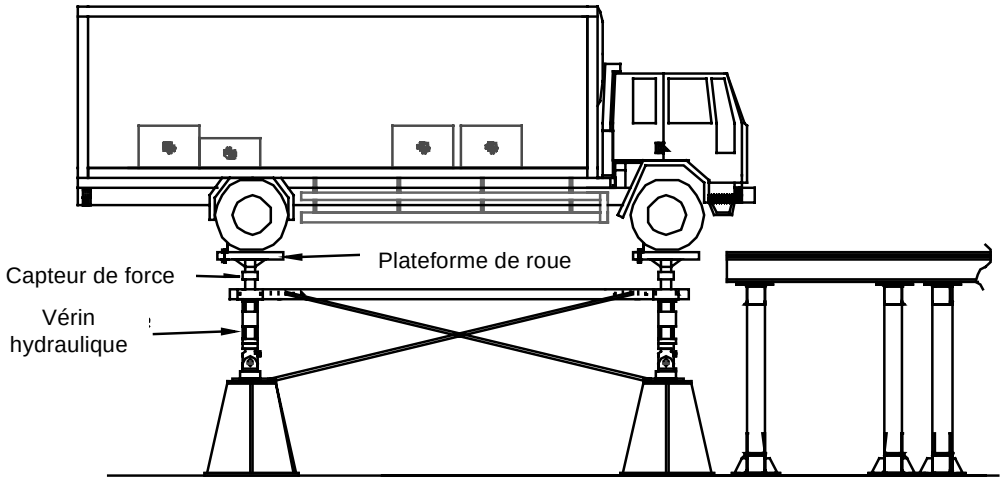
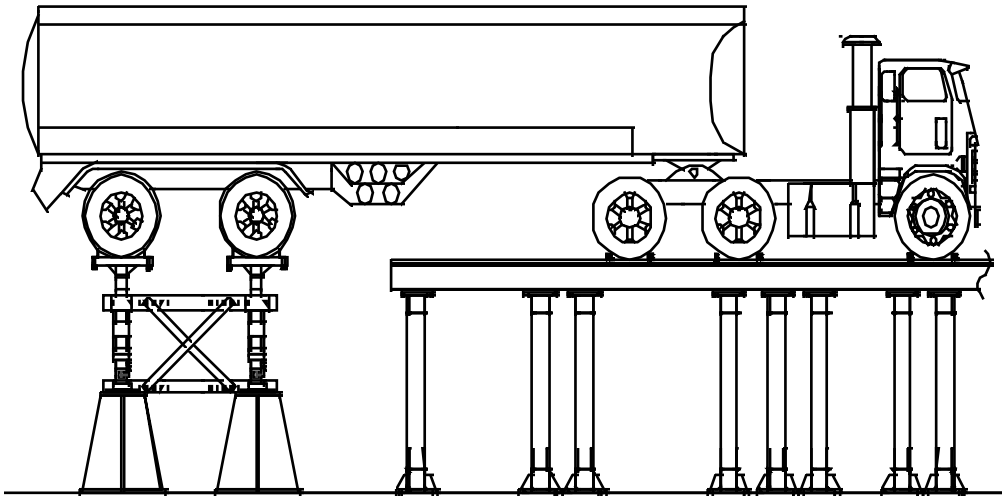


Figure IV.26. **Véhicule instrumenté du NRC sur le simulateur NRC**

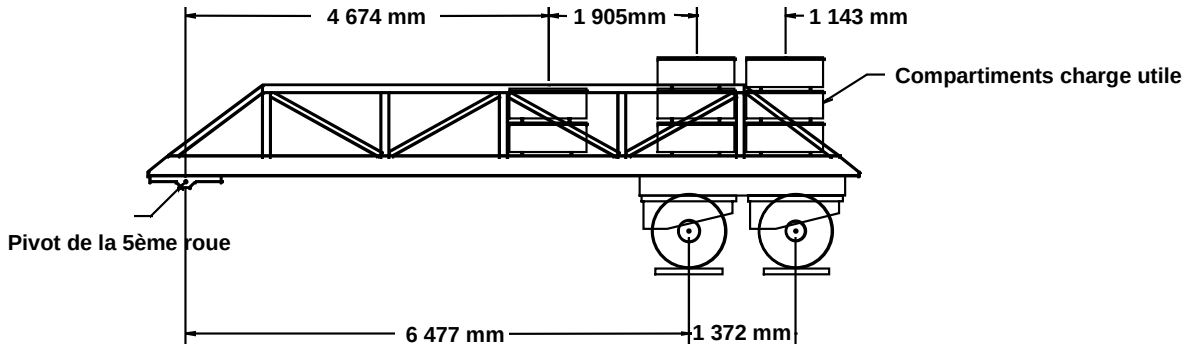


Le banc de vibration a été capable de se rapprocher de la réponse sur route d'un véhicule simple à deux essieux, avec toutefois un certain nombre de défauts concernant le roulis dynamique. Les expérimentations ont montré que chaque essieu d'un véhicule multi-essieux doit être excité si on veut se rapprocher de la réponse réelle du véhicule. Les essais ont montré qu'il n'était pas possible de caractériser une suspension en excitant seulement des essieux sélectionnés d'un véhicule. Cependant, les essais au banc de vibration ont confirmé que les véhicules instrumentés pouvaient fournir des mesures très précises des forces d'impact des roues (à moins de 3% d'erreur sur le coefficient de chargement dynamique) à condition que des procédures correctes soient utilisées dans l'instrumentation et l'étalonnage des dispositifs de mesure de la charge à l'essieu.

Essais des suspensions

Une série d'expériences a été menée sur trois suspensions différentes d'essieux tandem, en utilisant une remorque à balancier construite spécialement, qui fonctionnait comme un système pesant à un seul degré de liberté, fixé à une extrémité et supporté à l'autre par la suspension à essayer, comme le montre la figure IV.27. La suspension était portée à chaque roue par un actionneur hydraulique (simulateur NRC) piloté par ordinateur pour reproduire des profils en long réels et virtuels d'une route ainsi que des entrées correspondant à un déplacement sinusoïdal constant et des événements discrets comme des essais de lâcher.

Figure IV.27. **Schéma de la remorque à balancier utilisée pour les essais**



Source : NRC.

L'objectif de ce travail était d'explorer les moyens permettant d'évaluer la moindre agressivité des suspensions vis-à-vis de la chaussée. Trois suspensions génériques ont été examinées :

- Une suspension pneumatique à bras porteur.
- Une suspension à lames d'acier à quatre ressorts avec frottement entre lames.
- Une suspension à balancier avec ressorts en caoutchouc.

Tous les essais ont été réalisés avec des pneus gonflés à 7 bars (103 psi) et une charge à l'essieu de 90 kN. Chaque roue de la suspension était supportée par un actionneur et les deux roues droite et gauche d'un même essieu étaient excitées avec des signaux identiques de façon à éliminer le roulis. Afin

d'examiner la répartition et la compensation de la charge, les deux essieux ont été déplacés verticalement dans des conditions quasi-statiques l'un par rapport à l'autre.

Les essais de lâcher d'essieux ont été réalisés à partir d'une simulation de l'essai avec rampe et marche de la Directive européenne, sur deux essieux à une vitesse du véhicule de 5 km/h. Les essais de lâcher ont été conduits en lâchant les essieux séquentiellement puis simultanément.

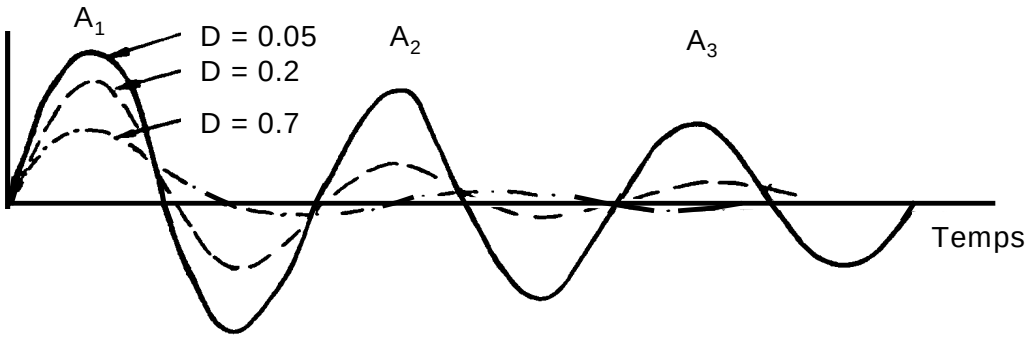
Les suspensions ont été excitées selon les profils en long DIVINE et des profils virtuels représentant des routes avec un uni "bon", "moyen" et "mauvais". Des essais à amplitude sinusoïdale constante ont été réalisés à des niveaux de fréquence de coefficient dynamique allant jusqu'à 20 Hz. Les essais sinusoïdaux ont été conduits sur les deux essieux de la suspension tandem (i) excités en phase, et (ii) déphasés de 180 degrés.

Essai de lâcher

L'essai de lâcher a été mis au point pour reproduire l'essai de conformité décrit par la Directive européenne 92/7/EEC, qui définit un équivalent pneumatique pour les suspensions non-pneumatiques. Les essais ont été menés sur les suspensions de l'essieu tandem en utilisant la technique du lâcher séquentiel puis simultané. L'essai séquentiel n'a pas donné de résultats intéressants et s'est révélé inadéquat pour des suspensions multi-essieux. Par contre, les essais de lâcher simultané ont pour leur part donné des résultats satisfaisants. Ils ont été réalisés pour étudier la sensibilité du paramètre d'amortissement à des hauteurs de lâcher de 40, 60, 80, 100 et 120 mm. La Directive 92/7/EEC préconise que, lors du lâcher d'un véhicule sur une hauteur de 80 mm, la fréquence de rebond de la masse suspendue ne soit pas supérieure à 2Hz et que le coefficient d'amortissement $D_{1,2}$ dépasse 20% de la valeur critique (la hauteur de lâcher de 80 mm a été choisie pour la Directive de façon à générer des chargements dynamiques de ± 50%, correspondant à ce qu'on peut attendre sur des routes d'uni mauvais). Le coefficient d'amortissement est calculé en mesurant les pics successifs de réponse de la roue du véhicule ou du déplacement de la masse suspendue (figure IV.28.) immédiatement après le lâcher, puis en appliquant les valeurs à l'équation standard de coefficient d'amortissement ci-dessous.

Figure IV.28. **Pics successifs d'une réponse transitoire amortie**

$$D_{1,2} = \frac{1}{2\pi} \bullet \ln\left(\frac{A_1}{A_2}\right)$$



L'essai de lâcher a eu pour résultat l'excitation de la masse suspendue, mais parfois le premier cycle a comporté une part importante des effets dynamiques de la masse non suspendue. Dans d'autres cas, le premier cycle n'a pu être distingué et n'a donc pu être analysé avec un degré de confiance suffisant. De façon à obtenir la meilleure possibilité d'analyse comparative, l'amortissement a également été calculé en utilisant les deuxième et troisième pics, ainsi que les troisième et quatrième pics de la courbe de réponse.

$$\mathbf{D}_{2,3} = \frac{1}{2\pi} \bullet \ln\left(\frac{\mathbf{A}_2}{\mathbf{A}_3}\right)$$

$$\mathbf{D}_{3,4} = \frac{1}{2\pi} \bullet \ln\left(\frac{\mathbf{A}_3}{\mathbf{A}_4}\right)$$

Les résultats présentés dans les tableaux IV.4. à IV.7 et les figures IV.29. à IV.32. indiquent que la valeur de l'amortissement, déterminée par l'essai de lâcher, dépend de la hauteur de lâcher et des pics de réponse retenus pour l'analyse. En général, le coefficient d'amortissement décroît avec une augmentation de la hauteur du lâcher. Pour la suspension pneumatique, il augmente si on utilise des pics de réponse successifs pour calculer l'amortissement. Malgré un certain nombre de variations dans les résultats, l'essai de lâcher a constitué un moyen de déterminer le coefficient d'amortissement sur les types de suspensions examinées. Le lâcher simultané d'un groupe d'essieux sur une hauteur de 80 mm est considéré comme un essai valide pour vérifier la conformité à la Directive européenne 92/7/EEC.

Suspension pneumatique

Les résultats des essais sur la suspension pneumatique (figure IV.29. et tableau IV.4.) montrent une nette relation linéaire entre le coefficient d'amortissement et la hauteur de lâcher, pour des valeurs de celle-ci comprises entre 40 et 120 mm. Une augmentation de 20 mm de la hauteur de lâcher a pour effet une diminution de 19% du coefficient d'amortissement ; cette relation change, toutefois, pour des hauteurs de lâcher dépassant 80 mm. Les résultats montrent également que les coefficients d'amortissement varient selon les pics successifs retenus pour les calculer. L'analyse des troisième et quatrième pics de la courbe de réponse conduit à un coefficient d'amortissement supérieur de 29% à la valeur trouvée à partir du calcul sur les deuxième et troisième pics. Pour les essais réalisés sans amortisseurs (tableau IV.5. et figure IV.30.), le coefficient d'amortissement s'est montré moins sensible à la hauteur de lâcher et au choix des pics successifs pour le calcul. La fréquence moyenne de rebond de la masse suspendue a été de 1.53 Hz avec amortisseurs, pour 1.49 Hz sans amortisseurs. L'amortissement de la suspension était de 7%, valeur nettement inférieure à la valeur cible minimale de 20%. Les amortisseurs utilisés pour cette suspension étaient pourtant en bon état ; cependant, ils étaient montés avec un angle d'inclinaison important réduisant substantiellement leur efficacité.

Tableau IV.4. **Lâcher d'essieu simultané - suspension pneumatique**
Note : n/e-non exploitable

Hauteur du lâcher (mm)	Fréq. nat. Hz	Amortissement (en % de la valeur critique)		
		$D_{1,2}$	$D_{2,3}$	$D_{3,4}$
40	1.60	n/e	10.6	12.2
60	1.52	n/e	8.9	10.7
80	1.51	n/e	7.2	9.3
100	1.51	n/e	6.6	8.0
120	1.51	n/e	8.0	7.0

Figure IV.29. **Coefficient d'amortissement d'une suspension pneumatique : lâcher simultané du groupe d'essieux**

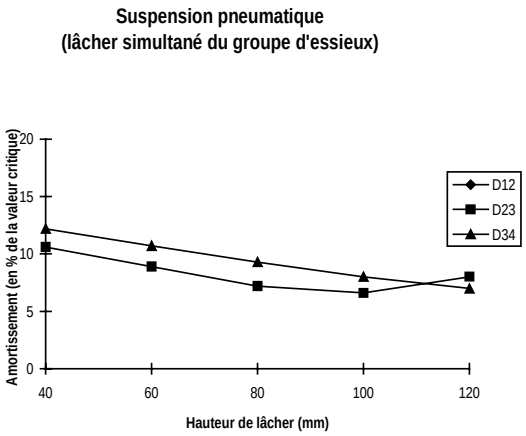
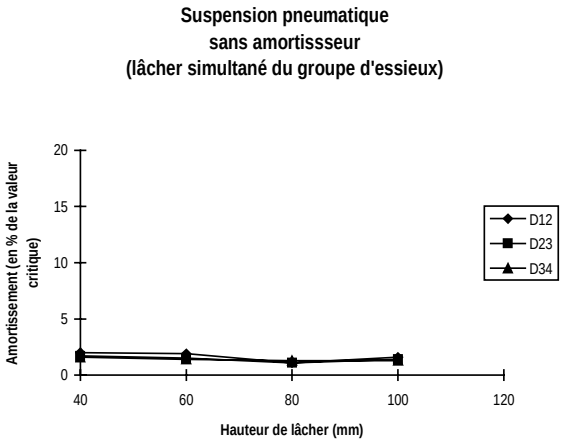


Tableau IV.5**. Lâcher d'essieu simultané - suspension pneumatique (sans amortisseur)**
Note : n/e-non exploitable

Hauteur du lâcher (mm)	Fréq. nat. Hz	Amortissement (en % de la valeur critique)		
		$D_{1,2}$	$D_{2,3}$	$D_{3,4}$
40	1.48	2.0	1.7	1.6
60	1.49	1.9	1.5	1.4
80	1.49	1.1	1.1	1.3
100	1.49	1.6	1.4	1.3
120	n/e	n/e	n/e	n/e

Figure IV.30. **Coefficient d'amortissement d'une suspension pneumatique (sans amortisseur) : lâcher simultané du groupe d'essieux**



Source : NRC.

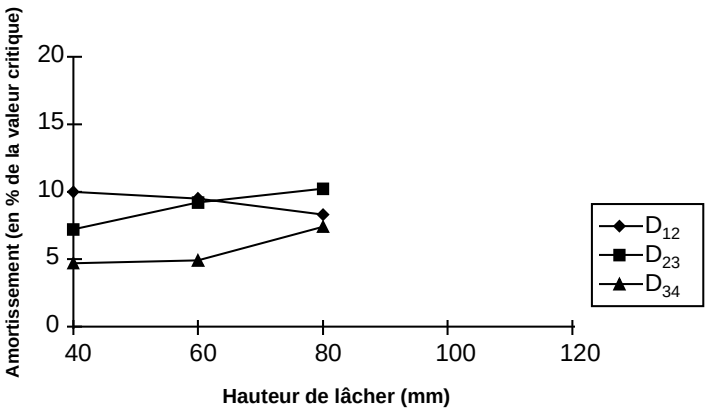
Suspension acier

Les résultats de l'essai de lâcher avec la suspension acier, indiqués au tableau IV.6. et à la figure IV.31, ne sont pas aussi cohérents que ceux obtenus avec la suspension pneumatique. Des hauteurs de lâcher dépassant 80 mm ont produit des signaux de réponse du véhicule qui n'étaient pas exploitables et ne sont donc pas indiqués dans les tableaux et les graphiques. L'amortissement de la suspension acier est en général moins sensible à la hauteur du lâcher que celui de la suspension pneumatique. Cependant, la suspension acier est plus sensible aux pics de réponse retenus pour l'analyse. Ces deux conclusions sont cohérentes avec les caractéristiques de l'amortissement de Coulomb. La suspension acier à ressort n'était pas équipée d'amortisseurs à effet de viscosité, et la fréquence moyenne de la masse suspendue était dans ce cas de 3.19 Hz.

Tableau IV.6. **Lâcher d'essieu simultané - suspension acier**
Note : n/d-non exploitable

Hauteur du lâcher	Fréq.nat.	Amortissement (en % de la valeur critique)		
(mm)	Hz	$D_{1,2}$	$D_{2,3}$	$D_{3,4}$
40	3.23	10.0	7.2	4.7
60	3.19	9.5	9.2	4.9
80	3.16	8.3	10.2	7.4
100	n/e	n/e	n/e	n/e
120	n/e	n/e	n/e	n/e

Figure IV.31. **Coefficient d'amortissement d'une suspension en acier : lâcher simultané du groupe d'essieux**



Source : NRC.

Suspension à ressort en caoutchouc

Les résultats des essais sur la suspension à ressort en caoutchouc étaient très uniformes comme le montrent le tableau IV.7. et la figure IV.32. Comme pour les autres types de suspension, une augmentation de la hauteur du lâcher a provoqué une baisse du coefficient d'amortissement. Ce dernier variait peu en fonction des pics de réponse successifs. Une hauteur de lâcher supérieure à 80 mm a produit des résultats non exploitables. La fréquence moyenne de la masse suspendue était de 2.43 Hz dans le cas de la suspension à ressort en caoutchouc.

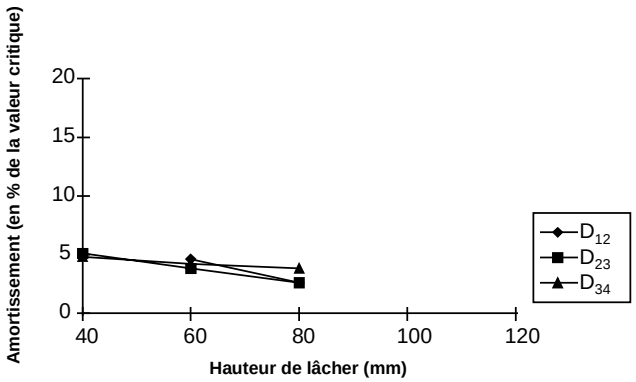
Résumé des essais de lâcher

Les résultats des expérimentations montrent que l'essai de lâcher simultané d'un groupe d'essieux permet de distinguer nettement les suspensions mécaniques et pneumatiques, sur le plan de la fréquence de rebond de la masse suspendue et de l'amortissement. Cet essai indique également de façon claire que, en raison de la non-linéarité du système, la performance de l'amortissement est liée à la hauteur de lâcher. On a constaté que la hauteur de 80 mm de la Directive européenne donnait des résultats fiables. Un consensus est nécessaire sur la hauteur de lâcher à retenir si on veut que des comparaisons fondées soient possibles pour évaluer la performance des suspensions.

Tableau IV.7. **Lâcher d'essieu simultané - suspension caoutchouc**
Note : n/e-non exploitable

Hauteur du lâcher (mm)	Fréq. nat. Hz	Amortissement (en % de la valeur critique)		
		$D_{1,2}$	$D_{2,3}$	$D_{3,4}$
40	2.49	n/r	5.1	4.8
60	2.44	4.6	3.8	4.2
80	2.36	2.6	2.6	3.8
100	n/e	n/e	n/e	n/e
120	n/e	n/e	n/e	n/e

Figure IV.32. **Coefficient d'amortissement d'une suspension caoutchouc : lâcher simultané du groupe d'essieux**



Source : NRC.

La suspension pneumatique n'a pas atteint l'amortissement de 20% requis par la Directive européenne 92/7/EEC. La raison la plus probable de ce défaut est certainement un mauvais emplacement et une orientation inadéquate de l'amortisseur. Ceci met en évidence que des suspensions pneumatiques peuvent ne pas être conformes à la Directive et que, pour l'avenir, toutes les suspensions devraient être évaluées indépendamment de leur catégorie générique.

Simulation des profils en long des chaussées

Une série d'expérimentations a été menée en utilisant le simulateur de routes, afin de reproduire les déformations courantes des chaussées. Trois sections "en vraie grandeur", représentatives de chaussées d'uni bon, moyen et mauvais, ont été sélectionnées pour constituer un ensemble de chaussées "standard" pour le Projet DIVINE. Les profils verticaux des traces de roues ont été mesurés et l'indice d'uni (IRI -- International Roughness Index) a été calculé et ses valeurs sont présentées dans le tableau IV.8.

Tableau IV.8. **Indice d'uni (*International Roughness Index*) pour les profils de routes du Projet DIVINE**

Classes d'uni	**IRI**
"NRC bon"	0.97
"NRC moyen"	2.23
"NRC mauvais"	4.46

Source : NRC.

Les profils ont été utilisés pour piloter le simulateur afin d'évaluer la réponse des trois suspensions à différentes vitesses. Les profils ont été créés à partir des mesures de profils verticaux des traces des roues droite et gauche. Afin d'éliminer l'effet de roulis du véhicule en cours d'essai, on a utilisé le profil de la trace de roue gauche pour piloter les actionneurs droit et gauche. Les essais au simulateur ont été réalisés pour les trois profils en utilisant trois types différents de suspension sur la remorque standard d'essai. Les coefficients de chargement dynamique ont été calculés et portés sur un graphique pour permettre une comparaison.

Une deuxième série d'expérimentations a été réalisée en utilisant un profil "virtuel" de route représentant les familles génériques d'uni bon, moyen et mauvais. Le profil virtuel a été défini en fonction de la pente de la densité spectrale de puissance (DSP). On a constaté qu'une pente de – 2 sur une courbe de densité spectrale de déplacement (m^3/cycle) en fonction du nombre d'ondes (cycles/m) représentait une bonne approximation de premier ordre des profils réels de chaussée et produisait aussi une puissance constante en fonction de la fréquence. L'amplitude du profil de chaussée virtuel a été ajustée pour s'approcher des qualités d'uni bon, moyen et mauvais des profils DIVINE. Evaluées à un nombre d'ondes correspondant de $1/(2\pi)$, les amplitudes utilisées sont présentées dans le tableau IV.9.

Tableau IV.9. **Amplitude des profils virtuels de routes et équivalence en termes d'uni (IRI)**

Qualité de l'uni	IRI	Densité spectrale de déplacement (m^3/cycle)
"NRC bon"	0.97	2.7×10^{-7}
"NRC moyen"	2.23	4.5×10^{-6}
"NRC mauvais"	4.46	2.7×10^{-5}

Source : NRC.

L'excitation des suspensions en utilisant les profils de route DIVINE ou virtuels fournit une large possibilité d'évaluation des suspensions. Toutefois, ces deux essais ne peuvent être réalisés que sur un simulateur en vraie grandeur, ce qui constitue un facteur limitant. En raison du coût élevé d'investissement des systèmes de simulation, cet essai ne peut pas constituer un moyen pratique d'évaluer l'agressivité d'une suspension à divers intervalles de temps au cours de sa durée de vie.

Balayage de fréquence sinusoïdale

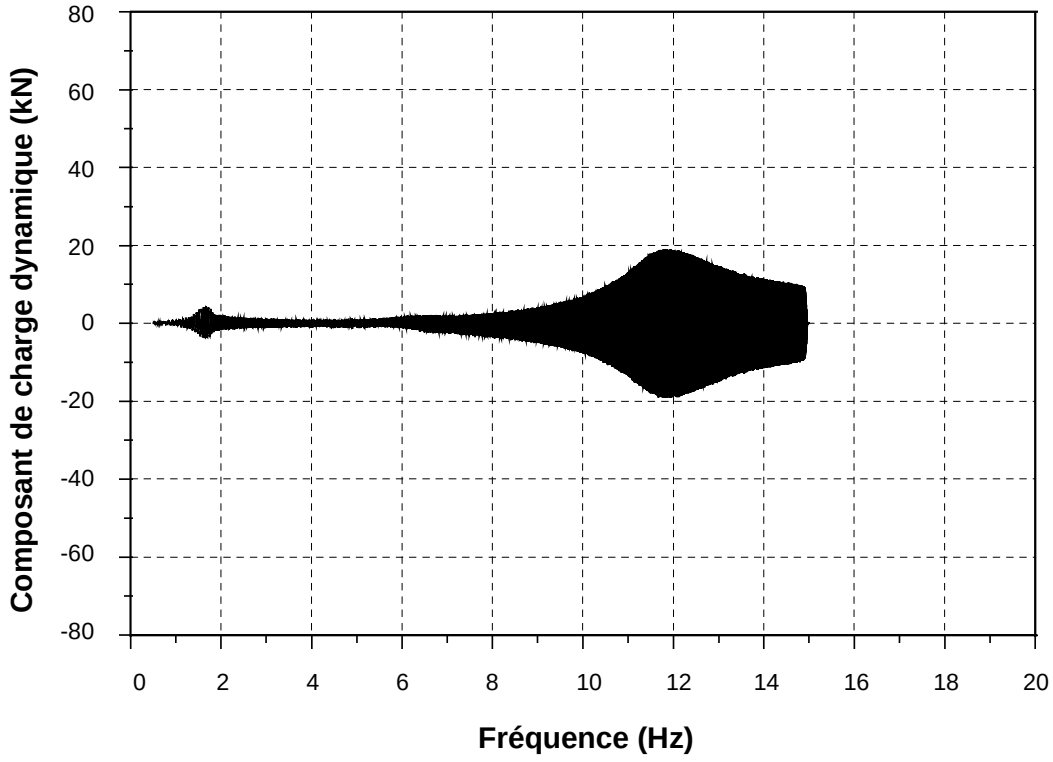
L'excitation sinusoïdale en phase a été réalisée à des niveaux d'amplitude constante, successivement de 1, 2, 3, 4, 6 et 8 mm, pour une fréquence variant entre 0 et 20 Hz. Les résultats ont clairement montré qu'une fonction de force sinusoïdale d'amplitude constante très faible peut provoquer une réponse importante de la suspension aux fréquences propres des masses suspendues et non suspendues. Les effets de variations de l'amortissement de la suspension sont très visibles aux fréquences basses et élevées, comme le montrent les figures IV.33 et IV.34.

Cette méthode paraît très prometteuse en tant que moyen pratique d'évaluation de l'agressivité des suspensions et de l'état des amortisseurs. Etant donné que le test est fondé sur une sollicitation d'amplitude constante, il peut s'appliquer au développement d'un appareil relativement simple sur le plan mécanique, permettant de générer une fonction de sollicitation proche des conditions de circulation.

L'essai d'excitation en balayage de fréquence et à amplitude sinusoïdale constante en phase s'avère être le plus efficace pour séparer la réponse de la suspension aux fréquences à la fois de la masse suspendue et non suspendue du véhicule, comme le montre la figure IV.35. On notera que dans la figure IV.35 les barres marquées "fréquences basses" correspondent à la masse suspendue, et les barres marquées "fréquences hautes" à des pics de fréquence de la masse non suspendue pour les trois types de suspension pneumatique, acier et caoutchouc. Cette méthode permet de bien distinguer les types de suspension et aussi de calculer le coefficient d'amortissement. Des amplitudes de 1 ou 2 mm pour les

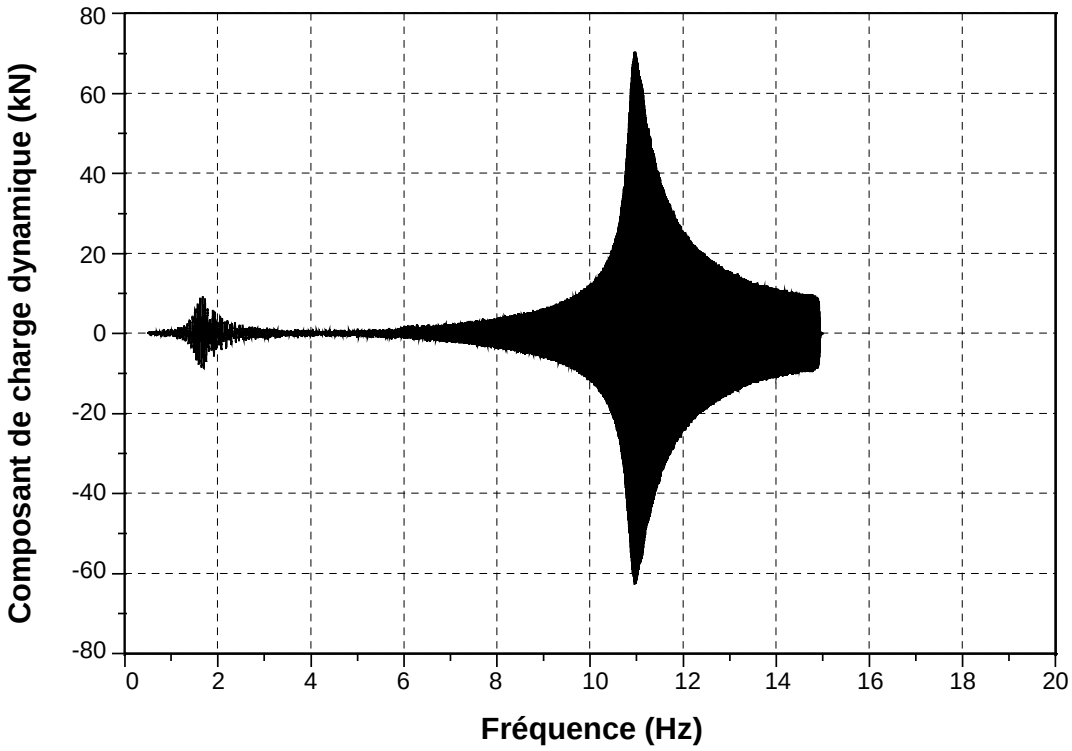
fonctions de force ont produit d'excellents résultats ; au-delà de 2 mm, les déplacements ont généré une réponse excessive du véhicule, particulièrement à la fréquence de la masse suspendue.

Figure IV.33. **Sollicitation sinusoïdale d'amplitude constante 1 mm : suspension pneumatique avec amortisseurs – les deux essieux sont excités en phase**



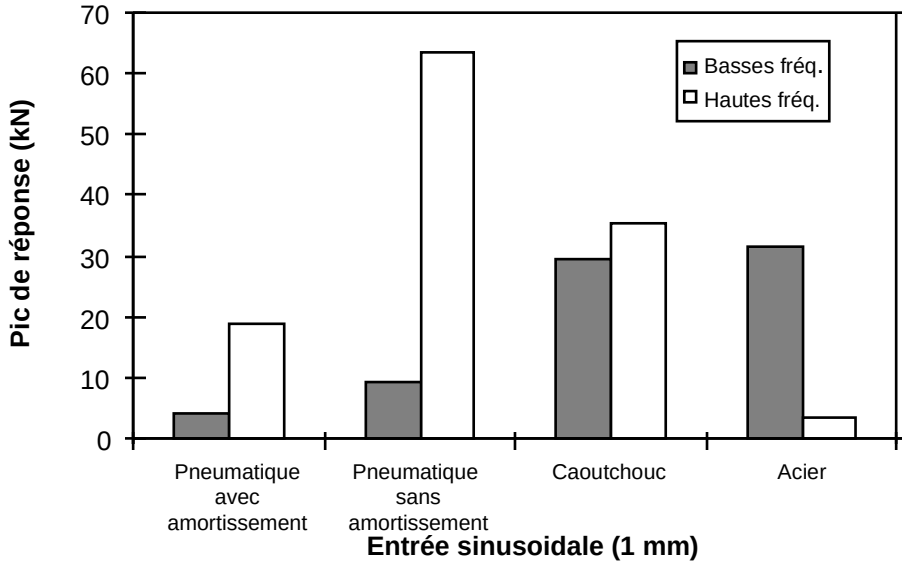
Source : NRC.

Figure IV.34. **Sollicitation sinusoïdale d'amplitude constante 1 mm : suspension pneumatique sans amortisseurs – les deux essieux sont excités en phase**



Source : NRC.

Figure IV.35. **Valeur pic des réponses correspondant aux fréquences des masses suspendues et non suspendues pour différents types de suspension**



Source : NRC.

Bien que l'excitation sinusoïdale montre des perspectives très intéressantes pour évaluer les suspensions, d'autres travaux sont nécessaires pour définir des critères appropriés pour évaluer l'agressivité des suspensions en utilisant ce test. Une modélisation globale et un programme d'essai seront indispensables pour mettre au point le protocole d'essai et les critères.

IV.3.3. Evaluation des modèles informatiques

Description de la tâche

La tâche de simulation informatique a constitué un moyen de déterminer la capacité de différents modèles informatiques à prévoir les forces d'impact des roues et la réponse verticale du véhicule à une sollicitation donnée. La démarche a été coordonnée par l'Institut de Recherche pour les Chaussées et les Véhicules de l'Organisation pour la Recherche Scientifique Appliquée des Pays-Bas (TNO–WT), qui a travaillé sous les auspices du projet de recherche en coopération DIVINE (Hoogvelt et Ruijs, 1997). Les possesseurs de modèles ont été invités à un essai en aveugle de leur modèle.

On a fourni à tous les participants :

- Des paramètres identiques pour le véhicule ainsi que des données sur le profil de la chaussée, issues des essais avec les véhicules instrumentés.

- Des spécifications régissant le format des données pour le véhicule, la route et l'expression des résultats.

- La réponse mesurée et l'historique du chargement dynamique lors de l'expérimentation. Ces données ont été fournies après la livraison des résultats. Le propriétaire du modèle pouvait alors ajuster son modèle et soumettre une seconde série de chargements dynamiques simulés.

Un profil de chaussée présentant un bon uni a été choisi pour la validation des modèles afin que des excitations de faible amplitude amènent à distinguer les différences entre les modèles linéaires et non-linéaires en testant leur habilité à simuler le mouvement de collages et décollements successifs des éléments de la suspension acier. Le spectre de fréquence intéressant était compris entre 0.5 et 15 Hz.

Le véhicule instrumenté à deux essieux du TRL a été choisi pour conduire la tâche de simulation informatique. On a pris comme vitesses de référence 65, 75 et 85 km/h, pour lesquelles il existait des données validées. Les caractéristiques des ressorts et des amortisseurs et les qualités mécaniques essentielles du camion ont été mesurées et les données ont été fournies aux propriétaires des modèles.

Description des modèles

Les six organisations suivantes ont répondu à l'invitation et participé à l'exercice de modélisation et de simulation :

- L'Institut des Transports de Pennsylvanie (Etats-Unis).

- *Scania Truck and Bus* (Suède).

- L'Institut TNO de Recherche pour les Chaussées et les Véhicules (Pays-Bas).
- *Roaduser Research Pty Ltd* (Australie).
- L'Administration Fédérale des Routes (Etats-Unis).
- L'Université d'Osaka (Japon).

L'Institut des Transports de Pennsylvanie (PENNSTATE) a proposé un modèle linéaire simplifié faisant appel à PCMATLAB. Le modèle mathématique est un modèle linéaire de "quart de véhicule" constitué de quatre équations d'état linéaires.

Scania Truck a développé un modèle utilisant le programme général de simulation à éléments multiples, DADS (*Dynamic Analyses & Design System*). Il s'agit d'un assemblage tridimensionnel formé de trois éléments rigides (masse suspendue, essieux avant et arrière) et de quatre ressorts à lames, quatre amortisseurs et six pneus. Un modèle de ressorts à lames, interne à Scania, a été utilisé avec des paramètres estimés.

L'Institut TNO a développé un modèle utilisant le programme PARADYME, une couche dédiée du modèle macro reliée au programme BAMMS de simulation à éléments multiples interne au TNO. BAMMS est un programme symbolique multi-éléments qui génère un code FORTRAN 77 pour chaque modèle. La couche PARADYME offre aux usagers un environnement de simulation flexible fonctionnant sur le principe d'une base de données. Tous les paramètres du modèle sont stockés dans une base de données de fichiers ASCII comprenant une structure hiérarchique stricte. Ce modèle contient deux composantes rigides d'essieux qui diffèrent dans les paramètres de direction, de raideur, d'amortissement et de géométrie. Chaque modèle de suspension est décrit par un fichier séparé de paramètres.

Le *Roaduser Research* a développé un modèle interactif d'infrastructure à deux essieux, du même type que la série de modèles "*Roaduser AUTOSIM Truck Engineering Dynamics* (RATED)" qui permet de prévoir le comportement dynamique de différentes configurations de véhicules lourds, allant de camions rigides à deux essieux à des trains routiers à 28 essieux. Les modèles RATED ont été développés en utilisant le code de simulation multi-éléments AUTOSIM et ont été validés par un essai sur le terrain. Le modèle RATED du camion du TRL incluait le modèle UMTRI pour le ressort à lame.

Le Groupe Interaction Véhicule – Chaussée (*Truck Pavement Interaction* – TPI) de la FHWA a développé un outil de modélisation et de simulation VSIM3D. Le logiciel a été validé sur des données expérimentales provenant des essais sur le simulateur. Le logiciel est suffisamment complet pour simuler différents types de véhicules et de chaussées et permet facilement de faire des modifications. Des travaux sont en cours pour valider le modèle avec des données provenant d'essais routiers.

L'Université d'Osaka a utilisé un modèle à sept degrés de liberté, conçu à l'origine pour analyser la réponse dynamique des ponts sous les véhicules en mouvement. Il est utilisé comme un modèle isolé.

Résultats de l'exercice de modélisation

Trois caractéristiques ont été utilisées pour valider et/ou comparer les modèles :

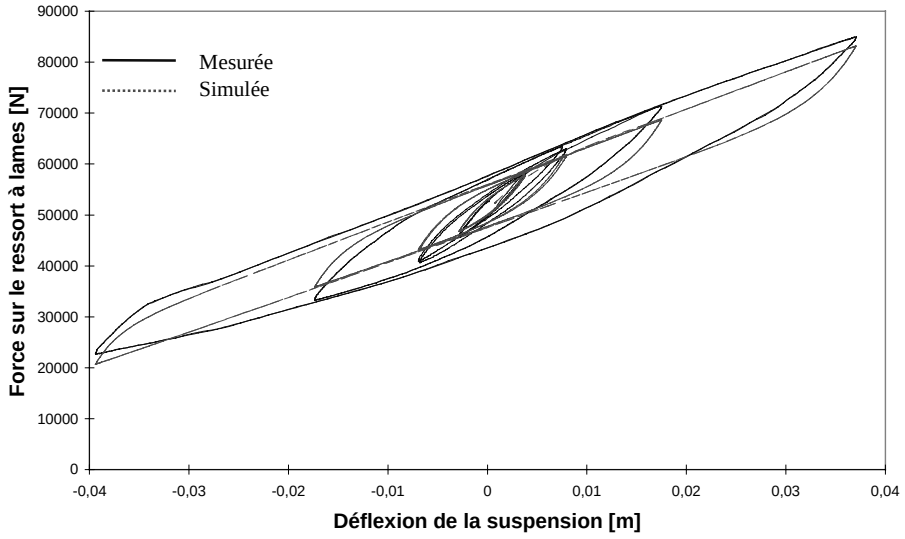
1. Les valeurs de coefficient de chargement dynamique prévues par le modèle ont été comparées aux valeurs calculées à partir des mesures réelles de charges sur les roues.

2. La fonction de distribution cumulative de chargement sur une roue a été utilisée pour analyser les composantes dynamiques.

3. Les harmoniques du chargement sur une roue ont été utilisées pour analyser le spectre de fréquence des différents modèles.

Un des six participants (le TNO) a répondu à la proposition d'ajustement du modèle par itération, consistant à effectuer une seconde simulation en connaissant les charges mesurées sur les roues. Dans le cadre de ce second essai, la seule modification a porté sur les caractéristiques des suspensions avec le modèle de suspension UMTRI de ressorts à lames (voir figure IV.36). Cette modification a permis d'améliorer la performance du modèle de manière considérable et a prouvé qu'il était essentiel de disposer d'un modèle de ressort réaliste pour simuler le comportement des véhicules (Hoogvelt et Ruijs, 1997).

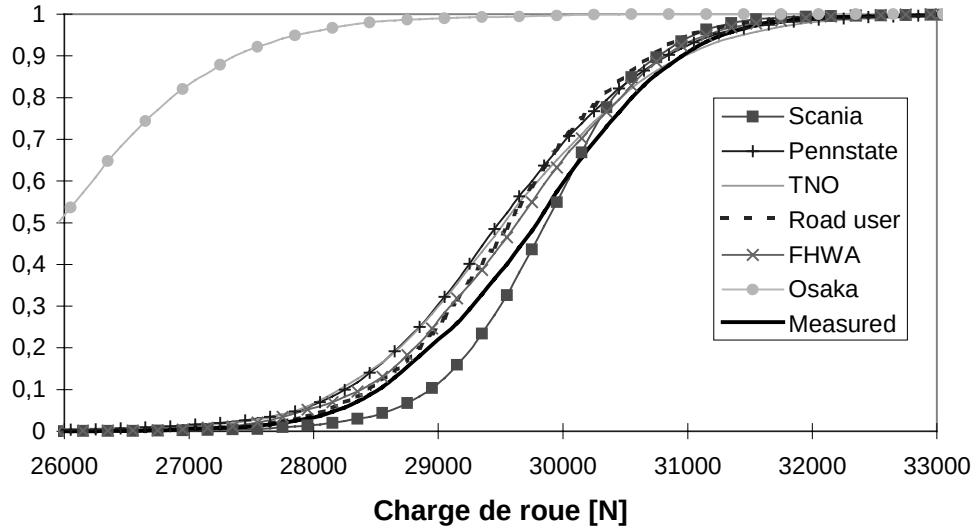
Figure IV.36. **Caractéristiques des ressorts de l'essieu arrière**



Source : TNO.

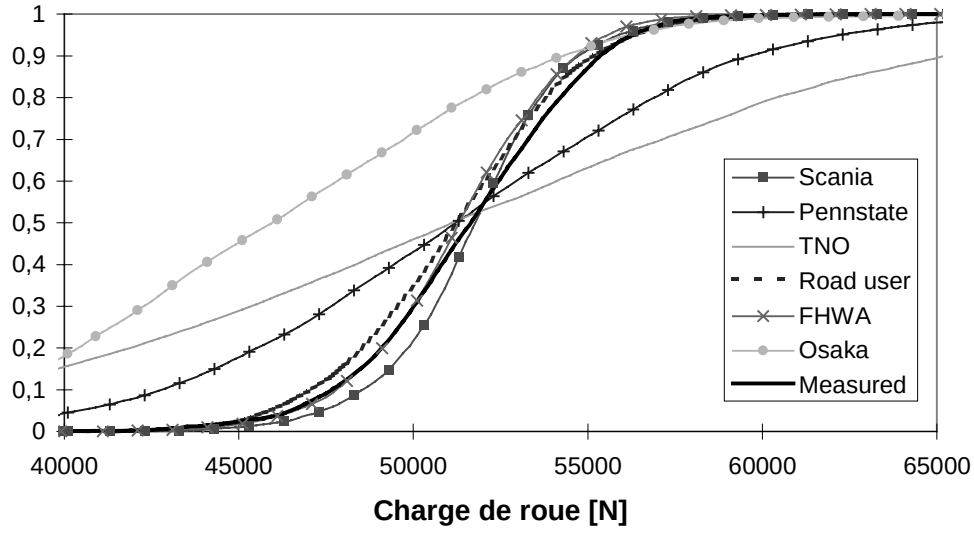
Cet exercice de modélisation a permis de montrer que l'histogramme cumulé était la meilleure fonction pour analyser et valider les modèles (voir figures IV.37 et IV.38). Les harmoniques donnent de bonnes informations qualitatives sur les modèles (voir figure IV.38). La valeur du coefficient de chargement dynamique n'a qu'un rôle restreint dans la validation des modèles.

Figure IV.37. **Fonction de distribution cumulative – Simulation d'un chargement sur roue avant gauche à 65 km/h**



Source : TNO.

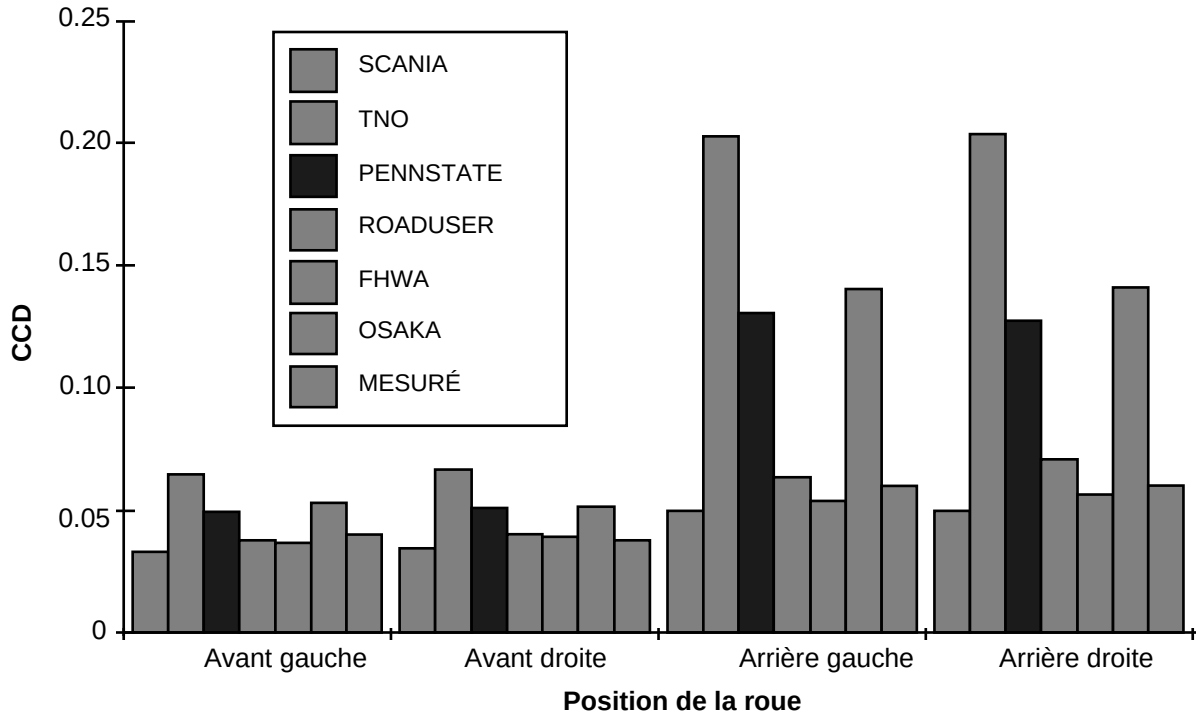
Figure IV.38. **Fonction de distribution cumulative – Simulation d'un chargement sur roue arrière gauche à 85 km/h**



Source : TNO.

Certaines simulations informatiques des chargements dynamiques de roue sont capables de calculer ces chargements avec une précision de 5 à 10%. Il est essentiel que ces modèles représentent de manière précise les caractéristiques non linéaires de la suspension, en particulier le frottement de Coulomb qui conduit à un mouvement de collages et décollements successifs des éléments de la suspension (voir figure IV.36). Les modèles capables de simuler le chargement dynamique des roues avec une précision de 5 à 10% sont, de la même manière, capables de prévoir les valeurs effectives du coefficient de chargement dynamique (voir figure IV.39 et tableau IV.10.).

Figure IV.39. **Valeurs du coefficient de chargement dynamique des charges de roue simulées à 85 km/h**



Source : TNO.

Tableau IV.10. **Valeurs du CCD issues des simulations de chargements sur les roues**

Roue	Vitesse [km/h]	Scania	TNO	Pennstate	Roaduser	FHWA	Osaka	Mesurée
Avant	65	0.0257	0.0385	0.0361	0.0313	0.0333	0.0466	0.0328
gauche	75	0.0309	0.0486	0.0452	0.0372	0.0354	0.0531	0.0394
	85	0.0331	0.0647	0.0492	0.0376	0.0364	0.0530	0.0399
Avant droite	65	0.0267	0.0392	0.0373	0.0342	0.0358	0.0430	0.0337
	75	0.0318	0.0483	0.0459	0.0398	0.0380	0.0501	0.0371
	85	0.0344	0.0669	0.0510	0.0402	0.0391	0.0513	0.0377
Arrière	65	0.0308	0.0956	0.0825	0.0539	0.0434	0.0881	0.0511
gauche	75	0.0432	0.1576	0.1228	0.0596	0.0502	0.1325	0.0572
	85	0.0497	0.2027	0.1304	0.0634	0.0540	0.1404	0.0598
Arrière	65	0.0314	0.0978	0.0839	0.0606	0.0452	0.0911	0.0531
droite	75	0.0434	0.1579	0.1230	0.0651	0.0522	0.1316	0.0609
	85	0.0496	0.2037	0.1277	0.0706	0.0564	0.1410	0.0601

Source : TNO.

Aucun modèle n'a cherché à simuler les chargements dynamiques provoqués par un défaut d'équilibrage des roues ; ce type de chargement peut cependant avoir une grande influence sur l'amplitude d'oscillation de l'essieu, quand la fréquence du mode de défaut dépasse la fréquence de débattement.

Les modèles RATED et VESIM3D se sont montrés les plus précis dans l'estimation du chargement sur les roues dans les divers contextes. Le modèle Scania arrive en troisième position.

IV.3.4. Propriétés des suspensions peu agressives

Les caractéristiques de rigidité et d'amortissement sont les deux propriétés fondamentales des suspensions de véhicules lourds qui agissent sur leur agressivité. Une suspension équipée de ressorts peu rigides, sans amortissement de Coulomb (frottement entre les lames d'acier), combinée à un niveau approprié d'amortissement visqueux conduira à un comportement optimal, c'est-à-dire des chargements dynamiques faibles pour la fréquence de la masse suspendue.

Afin de déterminer la limite appropriée de fréquence de la masse suspendue et le minimum d'amortissement visqueux requis pour mériter la qualification de "peu agressive", on a étudié par simulation informatique la relation entre la fréquence de la masse suspendue et l'amortissement visqueux, eu égard au coefficient de chargement dynamique (CCD). Le modèle RATED a été utilisé pour caractériser les suspensions génériques d'un véhicule à deux essieux à pleine charge.

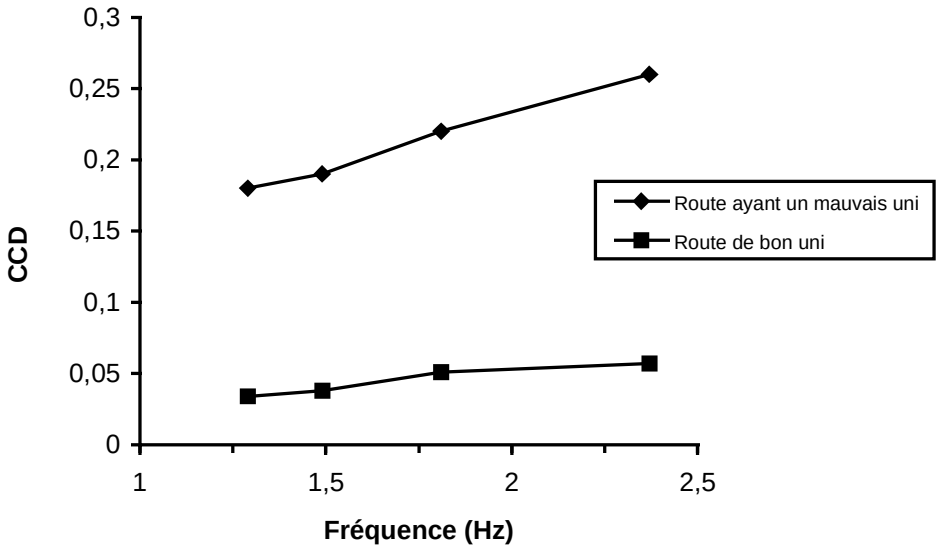
Fréquence de la masse suspendue

La figure IV.40 montre qu'il existe une relation étroite entre la fréquence de la masse suspendue et le CCD. Le tableau IV.11. indique les différentes fréquences et valeurs d'amortissement testées par simulation. Le CCD augmente en même temps que la fréquence de la masse suspendue. Le taux d'augmentation du CCD, en fonction de la fréquence, dépend de l'uni de la chaussée. Plus l'uni est mauvais, plus l'augmentation du CCD est forte.

L'étude de simulation a également montré que la relation entre la fréquence de la masse suspendue et le CCD est aussi affectée par le degré d'amortissement visqueux. Plus ce dernier est élevé et moins le taux d'augmentation du CCD en fonction de la fréquence de la masse suspendue est fort.

Pour que la performance d'une suspension sous chargement dynamique puisse être assimilée à celle d'une suspension pneumatique, la Directive 92/7/EEC prescrit une fréquence de la masse suspendue inférieure à 2.0 Hz. La figure IV.40 montre clairement que, si on place plus bas la spécification de fréquence de la masse suspendue en passant de 2.0 Hz à 1.5 Hz, il en résulte une nette amélioration de la performance de la suspension, soit environ 24% (prenant en compte le cas d'un uni mauvais). Etant donné que les suspensions pneumatiques courantes en service ont généralement des fréquences inférieures à 1.5 Hz, la réduction de la valeur maximale admissible de 2.0 à 1.5 Hz n'imposera pas de contrainte exagérée à l'industrie. Par contre, cette réduction limiterait de façon significative la capacité de nombreuses suspensions acier à être considérées comme de moindre agressivité. Amener la spécification à 1.5 Hz permettra de s'assurer que le maximum d'avantages sera obtenu des suspensions de moindre agressivité, en restant en pratique dans les limites de ce qui est réalisable.

Figure IV.40. **Relation entre la fréquence de la masse suspendue et le CCD (amortissement de 20%)**



Source : NRC.

Tableau IV.11. **Variables de fréquence de la masse suspendue et d'amortissement utilisées pour les suspensions mécaniques et pneumatiques**

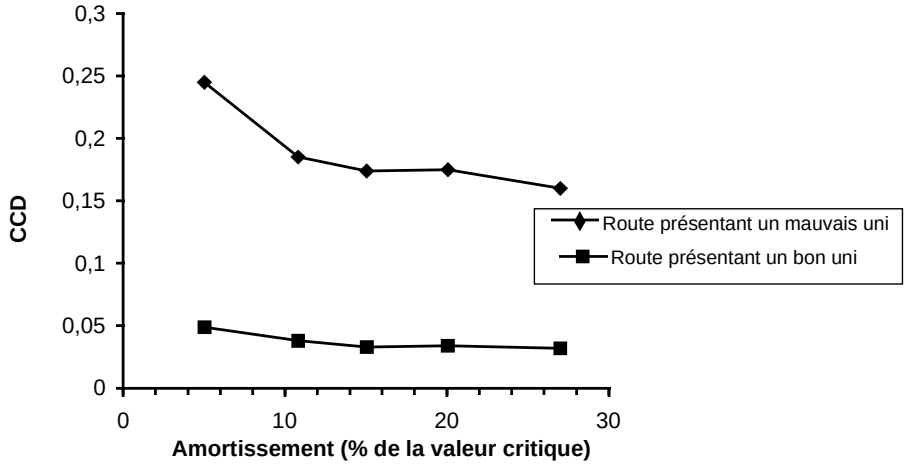
Fréquence de la masse suspendue Hz		**Amortissement en % de la valeur critique**	
Mécanique	Pneumatique	Mécanique	Pneumatique
2.00	1.33	20	7 - 30
2.17	1.50	17	5 - 27
2.63	2.00	11	7 - 27
2.94	2.50	5.4	5 - 9

Source : NRC.

Amortissement visqueux

Comme le montre la figure V.41, l'amortissement visqueux exerce une influence importante sur le CCD. La réponse du système est la plus sensible à l'amortissement – c'est-à-dire que le CDD augmente plus rapidement pour une diminution donnée de l'amortissement – pour des valeurs inférieures à 15% de la valeur critique. Sur la base de cette constatation, il apparaît que la spécification de la Directive 92/7/EEC, recommandant un amortissement minimum de 20%, est appropriée. Toutefois, il convient de noter qu'un amortissement supérieur à 20% apporte des bénéfices proportionnellement moins importants, par conséquent, il n'est pas nécessaire de viser des valeurs d'amortissement très supérieures à 20%.

Figure IV.41. **Relation entre l'amortissement visqueux et le coefficient de chargement dynamique (CCD)**



Source : NRC.

Les amortisseurs à effet visqueux s'usent avec le temps et doivent être révisés ou remplacés. Le niveau d'usure est souvent progressif et a pour résultat une réduction de la performance d'amortissement. Aussi, il est important de considérer une limite d'état de fonctionnement pour l'amortissement d'une suspension. Il est recommandé de réviser ou de remplacer les amortisseurs dès que l'amortissement descend en dessous de 20%, bien qu'il soit peu probable que l'on constate une augmentation importante de l'agressivité avant que l'amortissement ne descende en dessous de 10-15%.

Amortissement de Coulomb

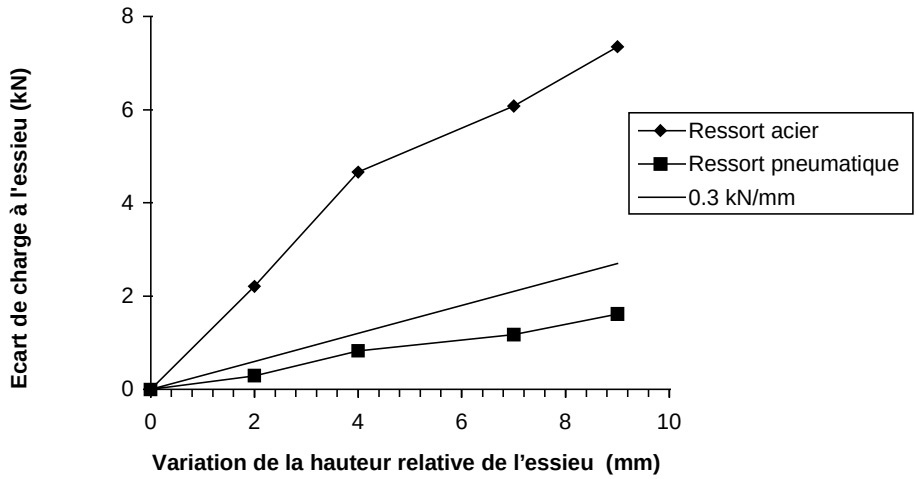
On a constaté que la présence d'un amortissement de Coulomb (frottement/glissement) avait un effet négatif sur la performance de la suspension. La Directive 92/7/EEC prescrit un ratio d'amortissement de Coulomb inférieur à 50% de l'amortissement visqueux. L'amortissement de Coulomb est mesuré en effectuant l'essai de lâcher après avoir démonté les amortisseurs visqueux. Cette spécification est un critère important pour définir la performance d'une suspension en termes de moindre agressivité.

Egalisation de la charge par la suspension

L'égalisation de la charge par la suspension exprime la capacité d'une suspension à maintenir des charges moyennes par essieu égales sur tous les essieux d'un groupe d'essieu (tandem ou tridem). Cette fonction a un impact très important sur la performance des groupes d'essieux tandem et tridem, car les systèmes qui répartissent mal les charges imposent une sollicitation forcément plus élevée sur la chaussée que ceux qui parviennent à les répartir. Une telle aptitude de la suspension a des implications sur la conception du véhicule et son exploitation. Par exemple, les semi-remorques sont attelées à différents tracteurs, à des hauteurs d'attelage différentes qui ont pour résultat des variations de l'angle de tangage de la remorque. Ces variations peuvent entraîner des modifications dans la répartition de la charge entre les essieux de la remorque. Les effets de tels phénomènes sont à même d'être minorés par l'établissement de normes de performance des suspensions réglementant les capacités de celles-ci à répartir les charges.

La capacité de la suspension à égaliser la charge entre essieux peut être évaluée sur la base de la variation moyenne de charge par unité de déplacement vertical relatif de l'essieu (par exemple, sur une distance de 100 mm). La figure IV.42 montre les caractéristiques comparées de répartition de la charge pour des suspensions acier et pneumatique d'un essieu tandem et recommande une limite relative à la performance de répartition. Elle ne tient toutefois pas compte d'une compensation éventuelle due à la charge par essieu. Pour que la suspension tandem puisse être définie comme peu agressive, il est recommandé que la variation différentielle de charge à l'essieu soit inférieure à 0.3 kN/mm, sur la base d'une charge de 9 tonnes par essieu.

Figure IV.42. **Répartition de la charge par essieu (condition stationnaire) suivant le type de suspension (suspension pneumatique à bras porteur d'un tandem et suspension à ressort acier d'un tridem)**



Source : NRC.

IV.3.5. Evaluation de la performance des suspensions

L'évaluation des suspensions, en tant que sous-systèmes indépendants du véhicule, offre une solution pratique pour tester la moindre agressivité des véhicules lourds vis-à-vis de la chaussée.

Le fait de traiter la suspension comme un sous-système permet de mettre en oeuvre des méthodes simplifiées, à faible coût, avec d'excellents résultats. Les conclusions des expérimentations menées avec le simulateur dans le cadre de DIVINE ont démontré que les systèmes d'actionneurs hydrauliques constituent un moyen efficace d'évaluer la performance d'une suspension, à condition d'exciter simultanément tous les essieux du véhicule donné. La réponse verticale obtenue montrera alors des caractéristiques semblables à l'expérimentation sur la route.

D'autres possibilités, moins complexes, ont également prouvé leur efficacité pour exciter et évaluer des systèmes de suspension. Un concept d'essai a émergé des expérimentations par lesquelles la suspension peut être excitée par une fonction de déplacement sinusoïdal d'amplitude constante balayant un spectre de fréquence donné. L'excitation peut être générée à l'aide d'un banc de vibration ou même d'un appareil mécanique relativement simple et peu coûteux. Cette méthode permet de déterminer les fréquences à la fois de la masse suspendue et non suspendue, ainsi que la fonction d'amortissement. Un essai du même type est utilisé dans certains pays européens pour mesurer les qualités routières des suspensions d'autocars pour passagers. Cette méthode permet de déterminer les fréquences à la fois de la

masse suspendue et non suspendue, ainsi que l'amortissement visqueux et l'amortissement de Coulomb. Toutefois de plus amples recherches sont nécessaires avant d'appliquer cette méthode aux véhicules lourds.

L'essai de lâcher simultané d'une hauteur de 80 mm s'est avéré constituer un moyen utile pour évaluer l'agressivité d'une suspension multi-essieux. Pour qualifier une suspension comme peu agressive, il est recommandé que la fréquence propre soit inférieure à 1.5 Hz et que l'amortissement soit au moins égal à 20% de la valeur critique. Pour qualifier une suspension mécanique de peu agressive, l'amortissement de Coulomb ne doit pas dépasser 50% de l'amortissement visqueux.

BIBLIOGRAPHIE

AURELL, J. (1991), *On the Influence of Different Suspension Parameters of Commercial Vehicles on Dynamic Wheel Loads,* Proceedings of the Inst. Mech. Eng. Conference on Dynamic Road Loading, London.

BONAQUIST, R. (1992), *An Assessment of the Increased Damage Potential of Wide Based Single Tires,* Proceedings of the 7th International Conference on Asphalt Pavements, Vol 3. ISAP.

CANTIENI, R. (1983), *Dynamic Load Tests on Highway Bridges in Switzerland - 60 Years Experience of EMPA,* EMPA Report No. 211, Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research, Dübendorf, Switzerland.

CANTIENI, R. et R. HEYWOOD (1998), *Dynamic Load Testing of Road Bridges in Switzerland and Australia,* EMPA Draft Report, Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research, Dübendorf, Switzerland, et Queensland University of Technology, Brisbane, Australia.

COLE, D. J. et D. CEBON, (1994), *Truck Suspension Design to Minimize Road Damage,* CUED/C-MECH/TR64, Cambridge.

COST 323, (1997), *European Specification on Weigh-in-motion of Road Vehicles,* draft 2.2, EUCO-COST/323/5/1997, Cost Transport, EC/DGVII, Brussels.

CONSEIL DES COMMUNAUTES EUROPEENNES (1992), Council Directive 92/7/EC, Brussels.

HOOGVELT, R. B. J. et P. A. J. RUIS (1997), *OECD - IR6 DIVINE Element 4. Computer Simulation of Heavy Vehicle Dynamic Wheel Loads*, TNO Report 97.OR.VD.016.1/RH/PR, TNO, Delft, Pays-Bas.

HUHTALA, M., PIHLAJAMÄKI, J. et P. HALONEN (1997*), Pavement Response due to Dynamic Loads,* Technical Research Centre of Finland, Espoo.

HUHTALA, M., PIHLAJAMÄKI, J. et P. HALONEN (1997), *"Pavement Response due to Dynamic Axle Loads*", Proceedings of the Eighth International Conference on Asphalt Pavements, Volume I pp 471-485, University of Washington, Seattle.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO) (1995), *Mechanical Vibration - Road Surface Profiles* - Reporting of Measured Data, ISO/DIS 8608:1995(E), Genève.

JACOB, B. et V. DOLCEMASCOLO (1997), *Répétabilité spatiale des forces d'impact sur une chaussée,* Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris.

KENIS, W., GEORGE, D. et J. HAMMOUDA (1997), *Pavement Primary Response to Dynamic Loading,* Report No. FHWA-RD-073, Federal Highways Administration, Washington, DC.

KENIS, W. et W. WANG (1997), "Analysis of Pavement Structural Variability", Report No. FHWA-RD-072, Federal Highways Administration, Washington, DC.

MAGNUSSON, G., CARLSSON, H.E. et E. OHLSSON (1984), *The Influence of Heavy Vehicles' Springing Characteristics and Tyre Equipment on the Deterioration of the Road*, VTI Report 270.

OCDE (1992), RECHERCHE EN MATIERE DE ROUTES ET DE TRANSPORTS ROUTIERS, *Chargement dynamique des chaussées*, OECD, Paris.

PIDWERBESKY, B. et J. DE PONT (1995), *Results of CAPTIF Pavement Testing and Analysis*, Proceedings of the Dynamic Loading of Heavy Vehicles and Road Wear Mid-term Seminar, Sydney. Austroads.

RAKHEJA, S. et J. H. F. WOODROOFFE (1994*), Role of Suspension Damping in Enhancement of Road-friendliness of Heavy Vehicles*, Engineering Foundation Conf., Noordwijkerhout NL.

SHARP, K. G. et M. A. MOFFATT (1996), *Analysis of Performance Data Collected during Trafficking of Test Pavement by CAPTIF: Element 1 of OECD IR6 Project*, ARRB Transport Research Contract Report CR RI905/3, Avril.

STEVEN, B. D., FUSSELL, A. W. et B. D. PIDWERBESKY (1996a), "DIVINE Element 1 construction report", Civil Engineering Research Report 96-8, University of Canterbury, Christchurch, Nouvelle-Zélande.

STEVEN, B. D., FUSSELL, A. W. and B. D. PIDWERBESKY (1996b*)*, "DIVINE Element 1 pavement post-mortem report", Civil Engineering Research Report 96-9, University of Canterbury, Christchurch, Nouvelle-Zélande.

SWEATMAN, P. F. (1994), "Implementation of requirements for road-friendliness of heavy vehicles", Roaduser Research 92-93-46.

WOODROOFFE, J. H. F. (1997*), Heavy Truck Suspensions: Methods for Evaluating Road-friendliness*, NRC & Roaduser Research, Ottawa.

CHAPITRE V – AMÉLIORER LE SYSTÈME VÉHICULE-INFRASTRUCTURE : LES VOIES OUVERTES PAR LA RECHERCHE DIVINE

La recherche menée dans le cadre du Projet DIVINE a fourni la base scientifique d'une nouvelle approche de la gestion des véhicules lourds et des routes en tant que système de transport et les résultats ouvrent la voie à des initiatives nouvelles dans la conception, la construction et l'entretien des chaussées, des ponts et des véhicules. Ce Chapitre suggère des axes suivant lesquels les conclusions de DIVINE peuvent être mises en application pour chacun des secteurs concernés. Un défi plus important sera de traiter des interactions importantes qui se produisent dans le système véhicule-infrastructure. Tandis que les résultats du Projet DIVINE vont amener à une perception nouvelle de ces interactions, il est vraisemblable que des recherches ultérieures seront nécessaires pour initier des méthodes de gestion plus performantes de l'ensemble du système lui-même.

L'un des thèmes récurrents importants qui émerge du Projet DIVINE est le besoin continu d'une approche pluridisciplinaire des questions liées au véhicule et à l'infrastructure. Désormais, les technologies ayant trait à l'un des secteurs des chaussées, des ponts ou des véhicules devront prendre en compte les effets sur les autres secteurs. De même, les recherches futures devront réellement traverser les frontières des disciplines techniques traditionnelles qui sont impliquées.

La suite de ce chapitre traite séparément des différentes composantes du système et conclut en spécifiant les besoins de recherche identifiés par le Projet DIVINE pour chacun des domaines concernés.

V.1. Les chaussées

Pour diverses raisons, la connaissance de la mécanique des chaussées est, dans son ensemble, bien moins avancée que celle des ponts et des véhicules. Etant donné les nombreuses questions non résolues dans l'évaluation de la performance technique d'une chaussée, il ne sera pas facile d'intégrer un futur ensemble de facteurs dynamiques complexes dans les méthodes de dimensionnement et d'entretien des chaussées. Cependant, s'il est possible de franchir ce cap, alors les progrès dans la recherche sur les chaussées seront vraisemblablement grandement accélérés.

Quand on considère l'interaction physique entre le véhicule et la réaction de la chaussée sur laquelle il circule, on constate qu'un certain nombre de caractéristiques de la chaussée entrent en jeu. Celles-ci comprennent, par exemple, le profil en long de la route qui intervient sur les chargements dynamiques générés, l'état structurel de la chaussée à l'instant donné qui détermine la réponse aux sollicitations dynamiques, et les conditions de l'interface pneu-chaussée qui influent sur la transmission du chargement dynamique à la structure de chaussée. Aussi, il est évident que le niveau d'interaction va évoluer en même temps que des variations sur l'un ou l'autre ou l'ensemble de ces paramètres au cours de la durée de vie de la chaussée.

Les résultats de cette interaction se manifestent dans la performance à long terme de la chaussée. Il existe différents moyens pour mesurer et suivre dans le temps la performance d'une chaussée.

L'interaction physique véhicule/chaussée est prise en compte dans une moindre mesure dans le dimensionnement de la chaussée, et différentes techniques, comme la conception mécaniste et les essais accélérés sur chaussées, existent et peuvent contribuer à ce processus.

Il est également nécessaire que des décisions importantes soient prises concernant les limites de charge autorisées pour les poids lourds et l'attribution des coûts à l'usage du véhicule et aux interventions d'entretien. Cette démarche requiert le support de concepts appropriés pour la durée de vie de la chaussée, la consommation de son capital de durée de vie et les mesures de détérioration ou de dégradation de la chaussée.

V.1.1. Réponse de la chaussée aux sollicitations des véhicules

En ce qui concerne la réponse de la chaussée aux sollicitations induites par les véhicules, le Projet DIVINE a mis en évidence plusieurs facteurs ayant des implications importantes sur la composante chaussée du système. Par exemple, le travail effectué dans le cadre de l'Elément 2 sur la réponse primaire de la chaussée a confirmé que, pour des chaussées relativement épaisses (160 mm de matériaux bitumineux), les déformations horizontales mesurées à la base de la couche bitumineuse sont presque directement proportionnelles à la force dynamique des roues. Par exemple, une augmentation de 10% du chargement dynamique par roue a pour effet une augmentation de 7 à 12% de la déformation. Etant donné la relation reconnue entre déformation et dégradation de la chaussée, ceci signifie une augmentation importante de la détérioration de la chaussée sous un trafic qui génère en permanence de telles charges. Le dimensionnement de ces chaussées épaisses doit donc prendre en compte cette augmentation potentielle de la dégradation. Dans un premier temps, il peut être nécessaire d'adopter une approche relativement grossière du phénomène pour prendre en compte cette dégradation dans le processus de dimensionnement de la chaussée. Pour affiner l'approche, une recherche ultérieure est recommandée pour déterminer comment estimer les chargements dynamiques provoqués sur un profil en long en cours de dégradation par une flotte de véhicules équipés de configurations d'essieux, de roues et des suspensions éminemment variables.

La recherche a également permis de trouver que la réponse en déformation de la chaussée à un chargement dynamique ne dépend pas de la fréquence de celui-ci. La réponse est la même qu'il s'agisse de la fréquence plus élevée de débattement de l'essieu ou de la fréquence plus basse de rebondissement de la caisse du véhicule. Par contre, une augmentation de 10% de la charge dynamique par roue sur une structure bitumineuse mince a pour effet une augmentation beaucoup plus faible (2 à 3%) de la déformation que dans le cas d'une couche épaisse. Ceci montre que les mécanismes de répartition de la charge sont nettement différents en présence d'une chaussée bitumineuse épaisse ou mince et que, dans ce dernier cas, ils sont très dépendants des conditions d'interface pneu-chaussée. Les pressions de contact, par exemple, sont susceptibles de contribuer plus gravement à la détérioration de la couche de roulement que les déformations dans la fondation de chaussée. Dans l'immédiat, il ne semble pas réaliste que ces effets puissent être pris en compte dans une méthode de dimensionnement des couches bitumineuses minces, en raison du peu de connaissances disponibles sur le sujet. Les résultats de DIVINE ont mis l'accent sur cette question. Il est recommandé de poursuivre les recherches sur les pressions de contact, en utilisant un large éventail de types de pneus, roues et chaussées, afin de faire progresser les procédures actuelles de dimensionnement, qu'elles soient mécanistes ou empiriques.

Le projet DIVINE a également confirmé que la force d'impact des roues dépend du type de suspension, du profil en long de la chaussée et de la vitesse du véhicule. La recherche a permis de mieux quantifier ces effets. Sur des routes d'uni correct, par exemple, les suspensions acier ont produit des facteurs d'impact de 1.30 sous des groupes d'essieux de semi-remorques, à comparer à des valeurs de 1.10

à 1.15 pour des suspensions pneumatiques. Par contre on n'a constaté quasiment aucune différence entre les deux types de suspension dans le cas d'essieux simples de camions rigides ou de tracteurs. Cependant, sur des routes présentant un mauvais uni, les suspensions acier ont produit des facteurs d'impact de 1.4 à 1.5 sous les groupes d'essieux, à comparer à 1.2 pour les suspensions pneumatiques. Ceci confirme bien que par un "contrôle" du profil en long on peut réduire les facteurs d'impact dynamique pour les deux types de suspension, et donc finalement prolonger la durée de vie de tous les types de chaussées. Toutefois, il est clair que lorsque l'effet du type de suspension est associé à l'effet du chargement dynamique sur la déformation de la chaussée, les chaussées les plus minces sont particulièrement vulnérables. Ainsi, le "cycle de détérioration" des chaussées minces est considérablement plus court que celui des chaussées plus épaisses, bien qu'elles soient dimensionnées pour un trafic moins important.

D'un point de vue pratique, un tel contrôle du profil en long ne peut être mis en oeuvre de manière économique que pendant la phase de construction ou de reprofilage de la chaussée. Les résultats de DIVINE suggèrent que la base d'une action économiquement viable visant à ramener le profil en long à un niveau acceptable va demander un développement considérable et qu'un suivi et un contrôle (là où c'est possible) des profils en long seront nécessaires pour fournir des informations quantitatives sur le niveau de dégradation en relation avec le trafic supporté. Comme on l'a noté dans le cadre de l'essai accéléré sur chaussée, les indicateurs internationaux de profil en long ne semblent pas les mieux adaptés à cet usage.

Pour ce qui concerne le dommage en fatigue, les chaussées rigides et semi-rigides sont bien plus sensibles à une augmentation du chargement dynamique que les chaussées souples, en raison de l'exposant plus élevé sur la loi de fatigue. Les résultats de DIVINE ne permettent pas de déterminer un seuil précis de dégradation du profil en long à partir duquel une intervention d'entretien serait recommandée. Toutefois, le chargement dynamique augmente rapidement dès que l'uni mesuré par l'*International Roughness Index* (IRI) atteint des niveaux de dégradation correspondant à des valeurs d'IRI de 2.5 à 3.

Le travail réalisé sur la réponse primaire des chaussées a également confirmé la dépendance entre la vitesse du véhicule et la réponse de la chaussée. On a pu conclure que la déformation générée par une charge de roue donnée est beaucoup plus élevée pour des vitesses très lentes que pour des vitesses normales de circulation. Ceci peut avoir des implications importantes étant donné que certaines régions sont confrontées à des problèmes sévères et permanents de congestion sur des routes supportant un important trafic de véhicules lourds. Ceci est particulièrement important car des dégradations localisées peuvent entraîner des coûts de réparation d'un niveau disproportionné, en particulier sur des routes supportant un trafic lourd important, en raison des interférences avec le flot de trafic habituel. Il convient donc de prendre en compte les effets du trafic lent de véhicules lourds lors de la conception ou de la réhabilitation de ce type de routes.

La concentration spatiale des charges dynamiques de roue est potentiellement très importante pour tous les types de chaussée. Les résultats de la recherche DIVINE sur la répétabilité spatiale ont montré l'existence de ce potentiel, mais ont également attiré l'attention sur le fait que le phénomène est particulièrement dépendant du profil de la route et des types de suspensions et de roues et des vitesses représentés dans le flux de trafic. Dans le cas où la composition du trafic lourd tend à se limiter à quelques types particuliers, le risque de dommage à la chaussée par répétabilité spatiale est plus élevé. On rencontre de plus en plus fréquemment de telles situations, particulièrement parce que la nature des véhicules lourds de marchandises est de plus en plus spécifique à leur fonction. En Europe, par exemple, la plupart des transports longue distance sont assurés par des semi-remorques à cinq ou six essieux, dont une majorité est équipée de suspension pneumatique, ce qui va dans le sens de la répétabilité spatiale malgré une limitation des chargements dynamiques.

Un autre résultat de DIVINE est que les incréments de charge dynamique à l'essieu augmentent le dommage par fatigue de la chaussée, non seulement en cas de répétabilité spatiale, mais également dans le cas d'un phasage aléatoire des forces d'impact. Ceci provient de la non-linéarité de la loi de fatigue pour les matériaux bitumineux. Dans ces conditions, les déplacements verticaux principaux du véhicule et des essieux, tels que le rebondissement de la masse suspendue et l'oscillation des essieux, ainsi que l'effet périmétrique des roues – forces dues à l'excentration des pneus et aux défauts périmétriques – peuvent provoquer une augmentation de dommage de l'ordre de 5% sur des routes d'uni correct, et de 30 à 50% dans le cas d'un mauvais uni.

Il est possible de mieux appréhender les effets dynamiques des roues et des essieux ainsi que leur répétabilité spatiale grâce à l'utilisation des systèmes MS-WIM de pesage en marche qui fournissent des mesures des forces d'impact à différents endroits le long de la chaussée. De tels systèmes peuvent permettre de contrôler les charges sous trafic et leurs relations avec la dégradation du profil en long, et il est recommandé d'effectuer ce type de contrôle.

En résumé, le projet DIVINE a montré que la réponse des chaussées au chargement dynamique des véhicules justifie des dispositions spécifiques dans les méthodes de dimensionnement. Toutefois l'attention requise peut dépendre de l'épaisseur de la chaussée. En particulier, il est nécessaire de continuer la recherche sur les réponses des chaussées plus minces et les effets au contact pneu-chaussée. Les résultats du projet DIVINE ont également montré que le profil en long de la route jouait un rôle important dans la répétabilité spatiale. C'est pourquoi il est nécessaire de contrôler et de surveiller le profil en long des routes afin de déterminer leurs effets sur la répétabilité spatiale. Un tel suivi aidera également à développer un algorithme permettant d'identifier les profils limitant la répétabilité. De même, la surveillance et le contrôle des profils en long s'avèrent nécessaires pour réduire le niveau de chargement dynamique. L'IRI peut être utile à cette démarche, toutefois des algorithmes meilleurs et des indicateurs plus appropriés peuvent se révéler indispensables. Pour ces raisons, ainsi que pour celles décrites précédemment, le contrôle du profil en long est hautement souhaitable.

V.1.2. Dimensionnement et performance des chaussées

Cette section du rapport examine la signification du chargement dynamique pour le dimensionnement et l'analyse des chaussées, en particulier par rapport aux résultats de l'essai de chargement dynamique accéléré.

Outils de dimensionnement des chaussées

Au cours des 50 dernières années, l'un des développements les plus importants dans le domaine de la technique routière a été l'introduction de méthodes de dimensionnement des chaussées mécanistes (ou structurelles) pour remplacer les méthodes empiriques traditionnelles. L'annexe A présente des informations détaillées. Les procédures mécanistes impliquent deux étapes : (i) le modèle de réponse, qui calcule la réponse – contraintes, déformations et déplacements – d'une chaussée donnée sous un chargement ; et (ii) le modèle de performance, dans lequel les réponses sont entrées dans une sorte de modèle de prévision de la durée de vie, qui est généralement fondé sur une "loi de puissance".

Certains de ces modèles tentent de prendre en compte le comportement non élastique-linéaire des matériaux bitumineux qui est en fait dépendant de la contrainte et/ou viscoélastique. Cependant, en raison même de leur complexité, les méthodes de dimensionnement mécanistes tendent à s'appuyer sur des modèles élastiques multicouches qui, bien que relativement simplistes, peuvent malgré tout pourvoir à des caractéristiques de matériaux telles que des degrés d'anisotropie ou des situations de chargement sous

des essieux multiples. Elles sont également plus à même d'être acceptées en pratique, et sont en fait acceptées, parce que les concepteurs peuvent tirer des bénéfices des applications informatiques de ces méthodes. Des modèles plus complexes viscoélastiques et en particulier des modèles aux éléments finis, sont utilisés comme outils de recherche. Bien que leur introduction dans la pratique courante soit à encourager, des développements plus poussés sont nécessaires avant qu'ils ne puissent être réellement adoptés par les praticiens.

Les caractéristiques des matériaux, les conditions climatiques et de trafic, et les normes de construction varient d'un pays à l'autre. Ceci a conduit à l'élaboration de nombreux modèles, chacun d'eux étant spécifique à un contexte local et souvent mis au point ou validé par l'utilisation de données locales empiriques. Les épaisseurs de chaussée retenues dans le cadre de l'essai CAPTIF ont été choisies de manière à disposer d'une structure qui soit acceptable par rapport à la pratique en Asie/Pacifique, en Europe et en Amérique du Nord. Les pratiques empiriques de dimensionnement utilisées en Nouvelle-Zélande à ce moment ont montré que la durée de vie d'une chaussée correspondait globalement au passage de 1 à 2 millions d'essieux équivalents (1-2 MESALs) pour la résistance à la fissuration, et d'environ 10 MESALs pour l'orniérage. Dans le cas du chargement choisi pour l'essai CAPTIF, ces chiffres correspondent à environ 500 000 cycles de chargement pour la fissuration et 2 millions de cycles pour l'orniérage.

Dans une étape initiale de l'essai de chargement accéléré, plusieurs méthodes empiriques ont été utilisées pour prévoir la durée de vie de la chaussée sous les conditions (connues) de l'essai. Bien que des données précises n'aient pas pu être fournies pour tous les paramètres d'entrée, la connaissance des matériaux au niveau local a permis d'effectuer des estimations à peu près précises. On a constaté que non seulement la fourchette de durée de vie calculée par les différentes méthodes était très large, mais aussi qu'aucune procédure n'avait prévu avec une marge d'erreur acceptable (+/- 50%) la durée de vie réelle mesurée de la chaussée. Certains facteurs principaux n'étaient pas connus, comme l'effet de la concentration de charge dans les traces de roues et la faible variation des influences liées à l'environnement. Il est clair que cette question mérite l'attention, particulièrement dans la perspective de l'usage de spécifications liées à la performance pour le dimensionnement des chaussées.

Etant donné que la plupart des méthodes de dimensionnement ont été mises au point et calées sur la base de données provenant des chaussées en service, il n'est pas étonnant que dans le cadre d'un chargement accéléré, les procédures de dimensionnement ne puissent pas fournir des durées de vie prévisionnelles avec une bonne précision. Quelques explications sont mentionnées ci-dessous :

- Bien qu'étant compatible avec le principal objectif de l'étude – à savoir un classement comparatif de la performance des chaussées sous deux types différents de suspension – le fait que la chaussée d'essai était confinée dans un cuvelage en béton a pu générer des effets de bord qui auraient artificiellement rigidifié la structure, augmentant ainsi la durée de vie de la chaussée. Ces effets n'ont pu être contrôlés au cours de l'essai, car les ressources disponibles n'ont pas permis de mesurer la rigidité ailleurs que sur les chemins de roulement. En outre, un tel exercice aurait été limité à une comparaison des bassins de déflexion en absolu plutôt qu'à un calcul *a posteriori*.

- L'installation CAPTIF est située dans un endroit couvert, alors que la pluie et le rayonnement direct du soleil contribuent au niveau de dégradation de la chaussée. Cependant, le choix de conduire l'essai sous abri était tout à fait réfléchi, car autrement les influences environnementales auraient affecté les résultats du point de vue de l'isolation des effets des deux types de suspension par rapport aux effets dus à des modifications de

l'environnement, en particulier pour ce qui concerne la portance de la fondation pendant l'essai.

- La distribution du chargement, comme pour la plupart de ces installations, est beaucoup plus canalisée que ce qui se produit dans le cas d'une chaussée en service.

- Les méthodes de construction utilisées n'étaient pas représentatives de la pratique courante des chantiers en raison de la nécessité de construire la chaussée à l'intérieur d'un cuvelage circulaire trapézoïdal et d'avoir une structure uniforme. En outre, le béton bitumineux a été mis en oeuvre à la main et compacté en utilisant un équipement traditionnel.

Même en prenant en compte les réserves qui précèdent, les résultats ont confirmé que les procédures de dimensionnement actuelles, et plus spécialement les modèles de prévision de la durée de vie des chaussées, sont probablement conservatrices. Ceci est particulièrement vrai pour les modèles de déformation de la couche de forme et du sol support qui sont souvent issus des méthodes de dimensionnement empiriques, elles-mêmes conservatrices par nature.

Dans ce domaine, une conclusion importante du Projet DIVINE est la confirmation de la validité du déflectomètre à boulet (*Falling Weight Deflectometer* - FWD) en tant qu'outil de corrélation entre les données de déflexion et des indices de performance de la chaussée, particulièrement l'uni et la fissuration. Le FWD ainsi que d'autres appareils similaires ont un rôle important à jouer dans le processus de construction, en particulier pour aider à déterminer la variabilité structurelle. Bien que dans le cadre de CAPTIF on n'ait pu démontrer que l'utilisation régulière du FWD pendant la durée de service de la chaussée, y compris durant la construction, aurait fourni de meilleures informations en ce qui concerne la performance à long terme, la situation peut être différente sur le terrain lorsque des facteurs, tels que des entrées d'eau, provoquent des variations localisées de la portance. De fait, les appareils comme le FWD sont maintenant largement utilisés dans les études sur la performance à long terme des chaussées et ont constitué un élément important du programme de recherche stratégique sur les routes (SHRP – *Strategic Highway Research Program*) des États-Unis.

Modèles de performance des chaussées

Les modèles mécanistes sont conçus pour évaluer la performance structurelle, alors que les modèles de performance des chaussées sont conçus pour évaluer la performance fonctionnelle. Bien que de nombreux modèles aient été développés pour déterminer la réponse des chaussées, il existe très peu de modèles mathématiques de prévision de la performance des chaussées – c'est-à-dire uni, fissuration, orniérage, etc. Il y a deux raisons majeures à ceci : (i) la complexité des modèles ; et (ii) le manque de données pertinentes sur la performance qui puissent être utilisées pour développer ou valider les modèles.

Il n'a jamais été dans l'intention de la recherche sur l'essai de chargement accéléré de valider des modèles de performance ou d'en développer de nouveaux. Cependant, sur la base de l'essai CAPTIF, il apparaît essentiel d'inclure dans les modèles de performance la variabilité de la portance structurelle et les chargements dynamiques étant donné que la portance et les effets dynamiques interagissent. De manière spécifique, une faiblesse structurelle de 30% combinée à un facteur d'impact compris entre 15 et 40% ont été responsables des seules dégradations observées.

D'autres facteurs, tels que la fissuration et l'orniérage, doivent être pris en compte dans les modèles de performance des chaussées. L'accumulation de dommages par fissuration est lente et difficile

à mesurer aussi bien sur les routes en vraie grandeur que dans le cadre des essais accélérés. Par conséquent, la caractérisation de la fissuration utilisée dans les modèles devrait refléter l'étendue des zones fortement fissurées plutôt que des moyennes globales du degré de fissuration. D'un autre côté, l'orniérage constitue une mesure fiable de dégradation de la chaussée et reste relativement facile à mesurer avec précision. Toutefois, les valeurs maximales, minimales ainsi que la moyenne et l'écart type devraient être contrôlés et pris en compte dans les systèmes de gestion des chaussées.

En conclusion, il est nécessaire de déployer des efforts pour conduire des essais sur le terrain relatifs à l'interaction véhicule-chaussée, afin de confirmer et d'étendre les conclusions de DIVINE et de valider un modèle interactif portant sur ces interactions. Un tel modèle devra prendre en compte les effets interactifs du profil de la chaussée, de sa variabilité structurelle et du chargement dynamique tout au long de sa durée de vie.

V.1.3. Concepts de durée de vie et de performance des chaussées

Comme on l'a vu précédemment, il existe plusieurs moyens de décrire l'état structurel et l'état fonctionnel d'une chaussée, ainsi que leur évolution en fonction du temps et/ou de la circulation. On a vu que ces deux critères étaient nécessaires pour décrire l'état général d'une chaussée. C'est une conclusion importante de la recherche DIVINE, en particulier du fait que les résultats ont souligné la difficulté d'interprétation sur la base d'un seul de ces critères. DIVINE a montré, par exemple, que du point de vue de l'interaction véhicule-chaussée, l'état fonctionnel est prédominant en raison des importants effets du profil en long sur le niveau du chargement dynamique.

Il faut rappeler cependant que les résultats du Projet DIVINE mettent également en évidence des liens étroits entre l'état structurel et l'état fonctionnel. Des variations dans la portance de la structure à la construction de la chaussée amènent à des dégradations du profil en long qui, en retour, provoquent une augmentation des chargements dynamiques. L'état structurel, variabilité comprise, prédomine à la construction mais devient moins important au moment de l'apparition des effets de l'évolution du profil en long.

Les conclusions de DIVINE mettent en évidence la nécessité de revoir les concepts de performance des chaussées et de consommation de leur durée de vie. D'après les résultats de dégradations obtenus dans le cadre de l'essai accéléré, on a constaté que par rapport aux suspensions acier, les suspensions pneumatiques augmentaient la durée de vie de la chaussée de 45 à 65% sur la base d'un critère d'orniérage particulier, et de 30% sur la base d'un critère de fissuration particulier. De même, les résultats obtenus à partir de la réponse primaire des chaussées indiquent que l'utilisation de suspensions pneumatiques, à la place de suspensions acier, augmente la durée de vie de l'ordre 60% dans le cas de la structure bitumineuse épaisse étudiée, et de 15% pour la structure mince. L'ensemble de ces valeurs montre le besoin de vérifier si les méthodes de dimensionnement actuellement utilisées doivent être modifiées pour prendre en compte à la fois les conséquences du chargement dynamique – en adoptant des dispositions concernant les différents effets sur les chaussées épaisses ou minces – et la question de la variabilité structurelle.

Les résultats des essais sur la répétabilité spatiale indiquent que, dans le cas d'une route d'uni bon ou moyen, la concentration des charges de roue à des localisations spécifiques réduirait la durée de vie de la chaussée de 35 à 50%. Ce résultat est important pour la méthode de dimensionnement utilisée, mais reste probablement plus pertinent pour ce qui concerne le profil en long de la route et sa conservation – ou son amélioration – par rapport à une valeur caractéristique d'uni donnée. Aussi, les résultats de

DIVINE montrent qu'il sera nécessaire de réviser le concept de durée de vie d'une chaussée, à la fois sur le plan de l'état structurel et fonctionnel.

V.2. Les ponts

Les paramètres principaux régissant la réponse des ponts au passage des véhicules lourds sont :

- La fréquence naturelle du pont.
- Les profils en long du pont et de ses approches.
- Les fréquences de charges dynamiques de roue ; et
- L'amplitude des charges dynamiques de roue.

La réponse dynamique des ponts aux sollicitations des véhicules lourds est habituellement exprimée par une composante statique à laquelle s'ajoute une majoration, ou tolérance, liée aux effets dynamiques. La tolérance de chargement dynamique (TCD) est constituée d'une partie de la composante statique et a traditionnellement été fonction de la portée moyenne du pont. Des spécifications récentes expriment la TCD en fonction de la fréquence fondamentale du pont, d'autres font état d'une valeur unique quel que soit le pont et d'autres encore comportent des provisions pour tenir compte du profil en long. Le Projet DIVINE a démontré qu'il est nécessaire de prendre en compte la TCD dans tous les cas.

La qualité des suspensions des véhicules lourds n'est pas prise en compte dans les spécifications de conception des ponts puisqu'il n'existe pas de procédures incluant les effets des suspensions. Le profil en long de la route est également négligé bien qu'universellement reconnu comme très important en relation avec la réponse dynamique des ponts. La recherche DIVINE a montré que la réponse dynamique des ponts ne peut être explicitée que si elle est considérée comme un élément du système incluant le pont, le profil en long de la route, la masse du véhicule, sa configuration et sa vitesse ainsi que la suspension du véhicule. Le besoin de comprendre ce système complexe se fait de plus en plus ressentir dans la mesure où on demande à une infrastructure d'ouvrages vieillissants et en cours de dégradation de supporter des charges toujours croissantes pour répondre aux efforts de l'industrie et des gouvernements visant à améliorer l'efficacité des transports.

Le Projet DIVINE a rassemblé des données uniques qui ouvrent la voie à des stratégies plus performantes pour ceux qui sont impliqués dans chaque aspect de l'industrie des travaux publics - conception, entretien, évaluation et gestion. De même, la recherche DIVINE propose le développement de systèmes de suspension moins agressifs vis-à-vis des ponts.

V.2.1. Réponse des ponts aux charges dynamiques de roue

Éléments de ponts de grande portée (L>100 m)

Le type de suspension des véhicules a peu d'importance pour les ponts de cette catégorie, sauf dans le cas d'un mauvais uni. La raison en est le faible effet d'une charge mobile isolée par rapport aux situations critiques correspondant aux effets cumulés de groupes de véhicules émettant chacun une vibration correspondant à ses caractéristiques propres. L'effet est également moins important que celui d'une charge statique imposée par des véhicules à l'arrêt. En outre, la fréquence fondamentale du pont est

plus basse que celle des véhicules lourds, aussi ces ouvrages ont tendance à atténuer les composantes dynamiques des forces d'impact des roues.

Ponts de moyenne à grande portée (L ≈ 30 - 100 m)

La concordance de fréquences entre le pont et le rebondissement du véhicule peut se produire dans le cas de ponts de moyenne portée. En comparaison avec les véhicules équipés de suspension acier, les suspensions pneumatiques plus souples auront pour résultat une augmentation de la réponse dynamique de ponts dont la fréquence naturelle est comprise entre 1.5 et 1.8 Hz (portée maximale L ≈ 70-60 mètres). L'inverse est vrai pour des ponts dont la fréquence naturelle est comprise entre 2 et 4 Hz (L ≈ 60-30 m). Les expérimentations ont montré que les réponses dynamiques rentraient bien dans le cadre des recommandations préconisées par les spécifications dans le cas de couches de roulement présentant des profils en long de bonne qualité. Une recherche ultérieure est nécessaire pour quantifier les effets de profils en long présentant un uni plus dégradé.

Ponts de courte et moyenne portée (L ≈ 15-30 m)

Les ponts ayant une fréquence naturelle comprise entre 4 et 8 Hz ont tendance à n'entrer en couplage dynamique ni avec la fréquence de rebondissement du véhicule ni avec celle de débattement de l'essieu. Généralement, les véhicules à suspension pneumatique induisent une réponse plus faible que des véhicules similaires à suspension acier et la réponse sera vraisemblablement inférieure aux valeurs préconisées par les spécifications, du moment que le profil en long de la couche de roulement reste acceptable.

Ponts de courte portée (L ≈ 8-15 m)

La recherche DIVINE a démontré qu'une "quasi-résonance" pouvait se produire entre les ponts de courte portée et l'oscillation des essieux des véhicules lourds, mais avec une amplification minimale. Les effets de rebondissement de la partie suspendue du véhicule sont également transmis à l'ouvrage avec une amplification minimale. La réponse dynamique des ponts de courte portée aux charges dynamiques peut se révéler beaucoup plus importante que prévu. Ceci est vrai à la fois pour les suspensions acier et pneumatiques, dans le cas où le profil en long montre des défauts d'uni de courte longueur d'onde suffisants pour exciter la vibration des essieux.

L'incrément dynamique le plus important enregistré a été de 137%. Il était associé au passage d'un véhicule à suspension pneumatique sur un pont de courte portée à une vitesse d'environ 60 km/h et a mis en évidence l'importance de la qualité du profil en long de la couche de roulement et la nécessité d'amortisseurs efficaces. Cet événement, ainsi que d'autres de moindre importance, ont démontré que le passage d'un véhicule isolé homologué (équipé d'une suspension "peu agressive" ou conventionnelle), sur un pont de courte portée montrant des défauts d'uni de courte longueur d'onde, pouvait induire des effets dont l'amplitude était équivalente à celle d'un véhicule largement en surcharge, ou à un dépassement correspondant à deux véhicules par rapport à la tolérance de chargement dynamique recommandée par les spécifications.

La réponse des ponts de courte portée aux passages de véhicules suspendus pneumatiquement a montré un grand nombre de cycles de contrainte et de déformation avec des amplitudes bien supérieure à la déflexion/déformation maximum. Le dommage par fatigue peut atteindre un ordre de grandeur de deux à trois fois la valeur généralement admise pour un cycle de contrainte par un véhicule isolé. Ces effets ont

été limités à une fourchette de vitesse relativement étroite (autour de 60 km/h) dans laquelle le groupe d'essieux vibrait en phase. Ces effets se vérifient pour des suspensions pneumatiques bien amorties et sont amplifiés dans le cas de véhicules équipés d'amortisseurs inefficaces. Un meilleur amortissement du pont réduit cet effet.

V.2.2. Résumé

La recherche DIVINE a conduit aux conclusions suivantes pour ce qui concerne les ponts :

1. Les suspensions des véhicules jouent un rôle important dans la réponse dynamique des ouvrages au passage d'un véhicule isolé.

2. Les suspensions pneumatiques peuvent induire des réponses dynamiques plus faibles.

3. En ce qui concerne les ponts de courte portée dont la couche de roulement présente un mauvais uni, les suspensions souples ou peu agressives pour les chaussées, peuvent se révéler agressives pour les ponts si le pont a une fréquence naturelle correspondant à la fréquence de rebondissement du véhicule ou si le pont de courte portée (dont la fréquence naturelle correspond au débattement de l'essieu) présente des défauts d'uni de courtes longueurs d'onde.

4. Le profil en long de la couche de roulement revêt une grande importance dans la détermination de la réponse dynamique des ponts. Un entretien efficace de l'ouvrage nécessite de maintenir le profil en long à un niveau d'uni acceptable. Les critères d'appréciation de l'uni requièrent des développements ultérieurs.

5. Dans les codes de dimensionnement des ponts, les valeurs admissibles de chargement dynamique devraient être fonction de la fréquence naturelle fondamentale de l'ouvrage (prenant en compte la fréquence de débattement des essieux) et du profil de la route. La tolérance de chargement dynamique est différente suivant que l'on considère les états limites de qualités de service de fatigue ou de contrainte.

6. Un amortissement efficace des suspensions souples est essentiel. Il sera nécessaire de mener une recherche ultérieure sur les degrés d'efficacité des amortisseurs montés sur des suspensions pneumatiques à la fois neuves et usagées.

L'entretien de l'uni des ponts et de leurs accès est un facteur très important de réduction des dommages aux ouvrages. Des défauts d'uni de grande longueur d'onde induisent des mouvements de rebondissement de la partie suspendue du véhicule dont l'amplification reste limitée sur les ponts de courte portée mais se montre plus forte dans le cas de ponts de portée moyenne à longue.

Les mouvements d'oscillation des essieux induisant des défauts d'uni de courte longueur d'onde sont moins dommageables pour les structures longitudinales principales des ponts de portée moyenne à longue parce qu'aucune concordance de fréquences ni, en conséquence, d'effets de quasi-résonance, ne peut se produire. Cependant, la présence de défauts d'uni de courte longueur d'onde, comme des nids de poule ou des joints de pont décalés, aura pour résultat des oscillations d'essieux amplifiées par des ouvrages de courte portée ou des travées de courte portée faisant partie d'ouvrages plus longs. Les ponts dont la couche de roulement présente un bon uni ne montrent pas de sensibilité au type de suspension des véhicules.

Intuitivement, il est clair qu'un profil en long dégradé est préjudiciable à la performance d'un ouvrage d'art. Cependant, les codes de dimensionnement des ponts ne fournissent aux responsables chargés de la conception ou de l'évaluation de la capacité de résistance des ponts ou de leur entretien que peu ou pas d'éléments quantitatifs relatifs à l'incidence du profil en long de la couche de roulement. La recherche DIVINE a montré que le profil en long de la couche de roulement, la fréquence naturelle et l'amortissement du pont sont des éléments importants qui nécessitent un contrôle de la part des gestionnaires.

Les mesures d'uni sont à présent d'un usage courant et les techniques de traitement de signal sont opérationnelles pour améliorer le traitement quantitatif des données. Les mesures des forces d'impact des roues et des réponses des ponts peuvent à présent être entreprises relativement simplement. Le Projet DIVINE a aussi démontré que les modèles dynamiques de véhicules sont capables de rendre compte avec précision des forces dynamiques de roues et de nombreux chercheurs ont démontré que la question de l'interaction pont/véhicule pouvait être traitée analytiquement. On dispose par conséquent des outils pour répondre au besoin de développer et de valider des modèles de spécifications qui tiennent compte, dans leurs recommandations relatives aux valeurs limites admissibles de chargement dynamique, du profil de la route et de la fréquence naturelle du pont. Il est recommandé de développer des spécifications visant à faciliter l'identification et le classement des profils en long des ponts et de leurs approches, en termes d'effets sur l'endommagement à la fois des ponts et des véhicules lourds.

Etant donné que la tendance va dans le sens d'une infrastructure d'ouvrages d'art vieillissante et supportant un trafic de véhicules plus lourds, il est indispensable de mieux comprendre le système *véhicule – profil en long – pont*. Bien que les investigations liées au Projet DIVINE se soient restreintes à un nombre limité de véhicules et de ponts, la recherche a montré que la réponse dynamique des ponts était sensible à des modifications même légères du profil en long, du type de pont ou de suspension des véhicules. Par exemple, le nombre d'essieux dans un groupe, l'efficacité des amortisseurs pour une suspension pneumatique et la localisation des défauts d'uni de courte longueur d'onde sont vraisemblablement importants pour des ponts de courte portée. Il est également connu que le nombre de véhicules présents simultanément sur un ouvrage a tendance à diminuer les effets dynamiques.

De nombreux paramètres entrent dans la détermination du niveau de performance des amortisseurs. Ces paramètres comprennent l'emplacement géométrique des amortisseurs dans le système de suspension et la capacité d'amortissement. La technologie permettant d'évaluer à un coût raisonnable l'efficacité des amortisseurs montés sur un véhicule commercial lourd n'est pas encore disponible pour l'industrie du transport. Il est donc tout à fait possible que des véhicules circulent avec des amortisseurs inefficaces, augmentant par là le dommage aux ponts de courte portée. Les effets des amortisseurs sur le chargement dynamique dans les modes d'oscillation des essieux, ainsi que leurs conséquences sur les ponts de courte portée, demandent une recherche ultérieure. Il est donc recommandé d'étudier l'efficacité de l'amortissement des suspensions sur les véhicules en service dans la perspective de : (i) comprendre les effets probables d'endommagement des ponts, et (ii) déterminer le niveau requis pour la validation de la performance de la suspension.

V.3. Les véhicules

Le Projet DIVINE, fondé sur une dizaine d'années de recherches sur différents aspects du domaine étudié, fait également suite aux améliorations technologiques apportées aux suspensions et au désir d'examiner les avantages de ces changements sur la durée de vie des chaussées. La tendance à utiliser des suspensions pneumatiques sur les véhicules lourds s'est confirmée depuis plusieurs années. Cependant, même si de nombreux véhicules neufs sont équipés de suspensions pneumatiques dans les

pays de l'OCDE, la majorité des camions qui circulent sur nos routes sont équipés de suspensions acier. En outre, à ce stade, la présence de suspensions pneumatiques sur les véhicules neufs reste loin d'être universelle, puisque certains pays optent pour équiper les remorques neuves avec ce système, et d'autres pays optent pour équiper les camions et les tracteurs.

Il existe de multiples raisons qui poussent à utiliser des suspensions pneumatiques sur les véhicules les plus récents. En plus d'une meilleure qualité de conduite à la fois pour les conducteurs et la marchandise, les suspensions pneumatiques sont en mesure d'améliorer pratiquement tous les aspects de la performance dynamique d'un véhicule lourd, y compris la sécurité liée à la stabilité, le freinage et la tenue de route. Ils permettent également une répartition plus équilibrée de la charge entre les essieux et réduisent les effets des véhicules lourds sur l'environnement relatifs au bruit et aux vibrations.

On sait que, par rapport aux suspensions acier conventionnelles, les suspensions pneumatiques courantes réduisent les chargements dynamiques en raison d'une fréquence de rebondissement du véhicule relativement basse, un frottement très faible et un amortissement visqueux élevé assuré par des absorbeurs hydrauliques de choc faisant partie intégrante de la suspension. On peut s'interroger sur la performance des suspensions pneumatiques quand les amortisseurs en service perdent une partie de leur efficacité. Bien qu'il ait été suggéré que les suspensions pneumatiques présentant des amortisseurs fatigués n'apportent aucun avantage par rapport aux suspensions acier et peuvent en fait créer des effets dynamiques plus élevés dans certains cas, cette proposition ne reçoit que peu de crédit.

On sait aussi que certaines suspensions acier modernes, comme celles équipées de lames profilées, ont des propriétés dynamiques semblables à celles des suspensions pneumatiques, et ont donc le potentiel de réduire les chargements dynamiques sur les routes. C'est pour cette raison que la Communauté Européenne a introduit un essai simple de rebondissement pour vérifier l'équivalence des suspensions acier par rapport aux suspensions pneumatiques. Ainsi, alors que les suspensions pneumatiques actuelles et certaines suspensions acier sont reconnues pour leurs caractéristiques intéressantes, des efforts sont en cours en vue d'une amélioration de la technologie dans ces domaines, et il se pourrait que des gains ultérieurs de réduction de l'agressivité vis-à-vis des routes soient obtenus.

Le Projet DIVINE s'est concentré sur les effets des suspensions parce que la suspension est le seul élément du système véhicule-infrastructure qui puisse être modifié sans trop de difficulté afin d'améliorer la performance du système. On sait que les configurations des véhicules et des roues peuvent jouer sur les charges dynamiques de roues, et il a été démontré que le contact du pneu affecte aussi le mode de transmission des effets dynamiques à travers les différentes couches de la chaussée. Cependant, l'objet principal de DIVINE était de quantifier effectivement les avantages des suspensions peu agressives pour l'infrastructure routière.

V.3.1. Caractéristiques des suspensions pneumatiques et acier actuelles

Plusieurs suspensions courantes – y compris pneumatiques, acier et caoutchouc – ont été utilisées dans les expériences concernant les Eléments 2, 3, 5 et 6 du Projet DIVINE.

Le tableau V.1. fait apparaître un niveau de convergence élevé en ce qui concerne l'amortissement des suspensions acier et la fréquence des suspensions pneumatiques. Cependant, des fortes variations ont été constatées dans l'amortissement des suspensions pneumatiques et dans la fréquence des suspensions acier.

Tableau V.1. **Fréquence et amortissement des suspensions testées**

Suspension	Fréquence	Amortissement
Suspensions pneumatiques nord-américaines anciennes	1.51 Hz	7%
Suspensions pneumatiques nord-américaines récentes	1.45 Hz	20%
Suspensions pneumatiques européennes récentes	1.40 Hz	35%
Suspensions acier nord-américaines anciennes	3.16 Hz	10%
Suspensions acier nord-américaines récentes	2.75 Hz	6%
Suspensions australiennes d'ancien modèle	3.20 Hz	10%
Suspensions acier européennes récentes	2.08 Hz	11%

Il est clair que la Directive Européenne en usage prescrivant une fréquence maximale de 2 Hz et un amortissement minimum de 20% permet généralement de différencier les suspensions pneumatiques des suspensions acier. Cependant, elle se prête moins bien à l'objectif initial consistant à spécifier des performances en vue d'une équivalence par rapport à une suspension pneumatique.

V.3.2. Exigences relatives à la performance des suspensions

Les résultats de l'Elément 3 du Projet DIVINE ont montré que le chargement dynamique généré par les suspensions est sensible à la fois à la fréquence et à l'amortissement de la suspension, mesurées dans l'essai de lâcher européen. On a également trouvé que la fréquence et l'amortissement des suspensions pneumatiques et acier ne sont pas des paramètres indépendants. Pour des raisons pratiques, il est difficile de concevoir une suspension acier présentant un bon amortissement et une fréquence inférieure à 2 Hz.

La sensibilité du chargement dynamique aux variations de l'amortissement de la suspension est telle qu'on constate une faible augmentation du chargement dynamique lorsque l'amortissement passe de 20 à 15%, une augmentation un peu plus importante lorsque l'amortissement est réduit à 10%, puis une forte augmentation quand l'amortissement descend en dessous de 10%. Ceci est particulièrement vrai si la fréquence de la suspension est limitée à 1.5 Hz.

On a également montré qu'on obtenait un gain limité, en termes de réduction du chargement dynamique, si on parvenait à abaisser la fréquence de la suspension en dessous de 1.5 Hz ou à augmenter l'amortissement au-delà de 20%. Toutefois, un amortissement supérieur à 20% peut apporter des avantages pour les performances des véhicules lourds sur le plan de la sécurité et de la réduction des vibrations d'essieux dans des conditions sévères de défauts d'uni.

Il est recommandé de définir une suspension "peu agressive" par les critères suivants, tels que déterminés par l'essai de lâcher européen :

- Fréquence inférieure ou égale à 1.5 Hz.
- Amortissement supérieur ou égal à 20%.

V.3.3. Évaluation de la moindre agressivité des véhicules vis-à-vis de la route

L'essai de lâcher européen s'est révélé utile pour caractériser la fréquence et l'amortissement des suspensions. Il est toutefois recommandé de modifier la procédure d'analyse des données d'essai afin

de spécifier que seuls les deuxième et troisième pics doivent être pris en considération pour la détermination du coefficient d'amortissement.

Il serait également souhaitable d'appliquer un protocole d'essai simple sur les suspensions en service, soit dans des centres de contrôle gouvernementaux, soit dans les ateliers d'entretien des véhicules. L'Elément 3 du Projet a développé un essai de balayage sinusoïdal simultané d'amplitude 1 mm, qui s'est montré efficace dans la différentiation des caractéristiques dynamiques des suspensions testées. Il est recommandé que cet essai soit mis en place dans la pratique.

V.3.4. Simulateurs de routes

Les simulateurs de routes peuvent être utilisés pour générer des chargements dynamiques donnant une représentation très proche du comportement sur chaussée, à condition cependant que tous les essieux du véhicule soient excités par le simulateur.

V.3.5. Modèles informatiques de simulation

Les modèles de simulation qui représentent le véhicule en trois dimensions et utilisent des représentations d'hystérésis non linéaires des ressorts en acier sont capables de prévoir les forces de roue avec une précision acceptable.

V.3.6. Performance dans des conditions extrêmes de défauts d'uni

L'Elément 6 du Projet DIVINE a montré que, dans des conditions extrêmes de défauts d'uni sur l'approche de certains ponts, il était possible de générer des efforts dynamiques importants liés à une fréquence élevée de débattement des essieux. Des niveaux d'amortissement des suspensions plus forts que ceux recommandés dans la section V.3.2 seraient alors requis afin de contrôler de telles vibrations. Il est recommandé de conduire une recherche complémentaire sur le besoin et la faisabilité de contrôler ce phénomène en appliquant d'autres normes pour la performance des suspensions.

V.3.7. Mise en oeuvre des spécifications de performance pour les suspensions

Afin de réduire la détérioration de la chaussée et de favoriser la possibilité d'une augmentation de la charge à l'essieu autorisée, il est recommandé d'introduire des spécifications de performance pour les suspensions, fondées sur les critères décrits la section V.3.2. De telles spécifications pourraient être introduites sur une base commune et l'adoption de recommandations uniformes dans les pays de l'OCDE.

Il reste difficile de répondre quantitativement à la question du niveau potentiel d'augmentation de la charge statique dans le cas d'une suspension peu agressive pour une même chaussée. L'Elément 1 du Projet DIVINE a montré par l'expérimentation que, pour une charge statique donnée, les suspensions pneumatiques prolongent la durée de vie des chaussées par rapport aux suspensions acier. Les résultats fournis par la réponse primaire des chaussées dans l'Elément 2 du Projet DIVINE, en admettant une loi de la puissance quatrième, indiquent que les suspensions pneumatiques augmentent la durée de vie de la chaussée de 15 à 60%, en fonction de son épaisseur. Ceci correspond à une augmentation de 4 à 12% de la charge statique, en utilisant encore une fois une loi de la puissance quatrième. Une telle augmentation de la charge à l'essieu fournirait au transport routier un gain de productivité important ainsi qu'une réduction significative des coûts indirects pour l'usager.

Il est recommandé de conduire une nouvelle expérimentation afin de comparer la performance des chaussées sous des suspensions acier et pneumatiques, ces dernières recevant une charge statique plus élevée. Cette expérience permettrait de disposer d'une base plus solide pour établir des limites différentielles de poids relatives aux suspensions pneumatiques et acier.

V.4. Les besoins de recherche

V.4.1. Dans quelles mesures le Projet DIVINE a-t-il répondu aux objectifs fixés ?

Influence des suspensions des véhicules lourds sur la durée de vie des chaussées et les coûts

Les résultats ont montré que les suspensions et le chargement dynamique ont un impact direct sur les réponses de la chaussée et que les défauts d'uni et les autres formes de détérioration évoluent plus rapidement dans le cas de suspensions acier que dans le cas de suspensions pneumatiques. La portée de ces résultats est limitée par la réalisation d'un seul essai accéléré des chaussées dont il est difficile d'extrapoler les conclusions pour les adapter aux routes réelles. Il est clair que davantage de recherche est nécessaire dans ce domaine, et les résultats de DIVINE fournissent une base solide pour le développement des expériences futures.

Aucune information n'a été obtenue en ce qui concerne une relation directe entre la durée de vie des chaussées et leurs coûts.

Influence des suspensions des véhicules lourds sur la durée de vie des ponts et les coûts

Pour les ponts de portée moyenne à longue, l'influence des charges de trafic mobiles sur la conception des ouvrages d'art et les coûts d'entretien est limitée, car le ratio par rapport au poids propre est généralement limité. D'un autre côté, les charges mobiles ont une incidence importante dans le cas des ponts de courte portée. On a déjà introduit des mentions sur le chargement dynamique dans les réglementations en vigueur et dans la Partie 3 (Charges liées au trafic sur les ponts routiers) de l'Eurocode 1 mis au point récemment. Les chargements dynamiques générés par le trafic peuvent également conduire à une réduction de la durée de vie par une augmentation des dégradations dues à la fatigue dans les ponts en acier ou les parties en acier des ponts en béton armé ou précontraint. Des recherches détaillées ont été menées sur ce sujet par la Communauté Européenne pour l'Acier et le Charbon entre 1978 et 1992. Les résultats de ces travaux ont été pris en considération dans l'Eurocode 3 (Construction en acier). Des travaux de recherche supplémentaires seraient utiles pour mieux rendre compte de l'effet des caractéristiques des véhicules telles que l'effet du type de suspension sur ces charges dynamiques.

Incidence des suspensions non agressives sur le dimensionnement des ponts

Les résultats du Projet DIVINE ont montré que des mentions devaient être ajoutées dans les codes de dimensionnement pour les ponts de moyenne portée. Des considérations plus poussées concernant la conception des suspensions pneumatiques devraient être conduites pour les ponts de courte portée dont les accès et l'ouvrage lui-même ne présentent pas un bon uni. Davantage de recherche est nécessaire pour évaluer le besoin et la faisabilité de telles modifications dans la conception des suspensions.

Spécification et essai des véhicules non agressifs pour la route

Les résultats du Projet DIVINE fournissent une description technique de la performance des suspensions non agressives fondée sur les spécifications de la Communauté Européenne – qui attribue aux suspensions une équivalence par rapport aux suspensions pneumatiques – et qui propose des critères rationnels fondés sur la limitation du chargement dynamique des routes.

Maintenir la performance des véhicules peu agressifs en exploitation

On a trouvé que l'efficacité de l'amortissement est un critère très important pour évaluer l'agressivité d'un véhicule. Un nouvel essai pour les suspensions a été mis au point dans le cadre de l'Elément 3 : il pourrait être appliqué aux véhicules en exploitation et présente des avantages sensibles par rapport à l'essai de lâcher et aux essais sur le banc de vibration en vraie grandeur. Cet essai permet d'évaluer avec plus de précision l'amortissement des suspensions et d'étendre les spécifications paramétriques au comportement des suspensions pour les fréquences élevées ainsi que pour les basses fréquences. Cet essai pourrait être développé et utilisé dans les centres de contrôle gouvernementaux et dans les garages pour l'entretien des véhicules. Davantage de travail est nécessaire pour que ce nouvel essai soit complètement opérationnel. Il est également important de s'assurer que l'amortissement des suspensions est conforme aux critères de sécurité car les considérations de sécurité peuvent imposer des contraintes plus importantes sur la performance de l'amortissement que les seuls critères de moindre agressivité pour la route et ils pourraient donc nécessiter des recherches plus poussées.

Adaptations des indices d'état des routes aux effets des camions

Les indices de profil fondés sur la Densité Spectrale de Puissance (DSP) fournissent des informations plus pertinentes que l'IRI (*International Roughness Index*) sur les déformations verticales en surface liées au chargement dynamique.

Le Projet DIVINE a démontré l'importance de la répétabilité spatiale du chargement dynamique, et il convient de mener de nouveaux travaux pour déterminer s'il est possible de développer un indice de profil susceptible de fournir des informations sur le potentiel de répétabilité spatiale des profils en long de chaussées.

Incitation à la conception et à l'utilisation de véhicules peu agressifs pour la route

Grâce à ses six Eléments de recherche, le Projet DIVINE a permis de se forger une meilleure idée des effets physiques des suspensions peu agressives par rapport aux suspensions traditionnelles. Ces informations peuvent être utilisées à plusieurs niveaux pour encourager l'utilisation de véhicules de moindre agressivité.

Options politiques relatives aux charges à l'essieu et à la configuration des essieux

Les résultats du Projet DIVINE s'appliquent principalement à l'influence des suspensions et aux effets du chargement dynamique. Des travaux complémentaires sont nécessaires pour comprendre pleinement les effets des essieux en charge et des groupes d'essieux sur la fatigue et la durée de vie de la chaussée. Le Projet DIVINE a conduit à une meilleure compréhension de l'interaction

véhicule-infrastructure qui permettra d'établir des lignes directrices pour développer des essais et des recherches appropriés.

Il serait également souhaitable de développer des réseaux de pesage en marche pour enregistrer à grande échelle les forces d'impact réelles des essieux sur les chaussées ainsi que pour contrôler les charges dans le respect de la réglementation en vigueur. Ceci est nécessaire pour assurer la protection de l'infrastructure – ponts et routes – mais aussi pour assurer une concurrence loyale entre les différents modes de transport.

Affectation des coûts routiers

Les résultats du Projet DIVINE ne donnent pas d'information directe sur l'affectation des coûts routiers mais ils montrent que les procédures actuelles de dimensionnement des chaussées et d'évaluation stratégique peuvent surestimer l'effet des charges de roue par rapport aux effets dus au mauvais état de la chaussée. Etant donné le rôle essentiel du recouvrement des coûts dans le financement des routes et la part importante des coûts routiers attribués à la masse et à la circulation des véhicules lourds, des recherches poussées sont nécessaires pour mieux comprendre les contributions relatives de la masse des camions, de la moindre agressivité des véhicules, de l'état initial et actuel de la route et des effets environnementaux sur la fatigue et la dégradation des chaussées. Encore une fois, les résultats du Projet DIVINE contribueront dans une large mesure à mettre au point un programme de recherche efficace.

V.4.2. Quel est le type de recherche nécessaire pour améliorer la relation entre véhicules lourds et infrastructure ?

Véhicules et chaussées

La principale question soulevée par les résultats du Projet DIVINE concerne le rôle global des véhicules et de la charge appliquée par les roues – statique ou dynamique – dans la détérioration et la dégradation des chaussées. Les résultats ont montré qu'il était difficile, et probablement inapproprié, de faire une distinction entre les influences respectives du véhicule, de la chaussée et de l'environnement. Il convient de conduire une recherche interactive sur ces éléments. Les résultats du Projet DIVINE montrent que les techniques actuelles de dimensionnement des chaussées et d'évaluation peuvent avoir tendance à surestimer la contribution directe des charges des véhicules lourds à la diminution de la durée de vie de la chaussée, par rapport à l'influence du profil en long de la chaussée, de la variabilité structurelle et de l'environnement. D'autres questions ont été soulevées et les résultats du Projet DIVINE devraient être utilisés pour développer un programme de recherche efficace pour répondre à celles-ci. Les résultats de cette recherche seront particulièrement pertinents pour éclairer l'affectation des coûts.

En complément de cette interrogation générale, se pose une autre question concernant les réglementations sur les véhicules lourds et les possibles modifications par incrémentation dans ces réglementations :

- Pour une augmentation donnée du poids par essieu, quelle est l'augmentation associée des coûts d'entretien et autres ?

- Quel poids supplémentaire peut-il être autorisé lorsqu'on ajoute un nouvel essieu à un véhicule (en remplaçant par exemple un essieu tandem par un essieu tridem) ?

– Quel poids supplémentaire peut-il être autorisé quand on remplace une suspension agressive par une suspension peu agressive ?

Les résultats du Projet DIVINE montrent que de telles questions doivent couvrir une grande variété de chaussées et de variables de configuration des véhicules, afin d'aboutir à des réponses réalistes et applicables. Bien que DIVINE constitue un début prometteur dans ces domaines, d'autres recherches sont nécessaires et devraient être fondées sur l'analyse de l'état fonctionnel de la chaussée.

Pour faciliter la mise en oeuvre de politiques réglementaires mieux adaptées, il est nécessaire d'avoir accès à des outils crédibles et pratiques d'évaluation des chaussées et des véhicules. Bien que d'autres recherches soient nécessaires, DIVINE a fourni une contribution substantielle dans les domaines suivants :

– *Mesure de l'état structurel de la chaussée et de sa variabilité.* Le Projet DIVINE a montré que le déflectomètre à boulet et les instruments similaires sont des outils puissants pour cette mesure.

– *Mesure de l'état fonctionnel de la chaussée*. Bien que les technologies utilisant un profilomètre soient bien au point, le Projet DIVINE a montré que les indices actuels de profil en long nécessitaient d'être davantage développés afin de mieux refléter le chargement dynamique et la répétabilité spatiale.

– *Moyens d'évaluer la moindre agressivité des suspensions pour les routes*. Les résultats du Projet DIVINE proposent plusieurs méthodes pour cette évaluation.

– *Moyens d'évaluer les effets des pneus.* Davantage de recherche est nécessaire pour étudier comment les charges dynamiques sont transmises à la structure de la chaussée par l'intermédiaire du pneu, en particulier pour les chaussées minces.

– *Validation de la modélisation de l'état fonctionnel de la chaussée en réponse à l'interaction dynamique entre véhicules et chaussées.* DIVINE a fourni des recommandations pour une modélisation plus fine des véhicules. Des travaux complémentaires sont maintenant nécessaires pour développer, évaluer et valider des modèles dynamiques véhicule-chaussée de l'état fonctionnel.

– *Mesure des chargements dynamiques liés à l'essieu et au véhicule et des forces d'impact, à grande échelle, en développant des réseaux de pesage en marche*. Des systèmes de pesage en marche à capteurs multiples devraient être utilisés pour un examen plus approfondi des caractéristiques des charges dynamiques.

En plus des recherches mentionnées ci-dessus, qui concernent réellement l'interaction véhicule-chaussée, le Projet DIVINE a souligné le besoin d'améliorer les techniques de dimensionnement et d'auscultation des chaussées. Les domaines spécifiques, pour lesquels les résultats du Projet DIVINE ont montré que des recherches supplémentaires restent nécessaires, sont :

– Une amélioration des méthodes de dimensionnement mécaniste des chaussées.

– Une révision des critères de dégradation utilisés dans le dimensionnement mécaniste des chaussées.

- Une plus grande prise en compte de l'état fonctionnel, ainsi que structurel dans le dimensionnement mécaniste des chaussées.

- Une plus grande considération de la variabilité structurelle, du chargement dynamique et de la répétabilité spatiale dans le dimensionnement mécaniste des chaussées.

- Une comparaison des essais accélérés des chaussées par rapport aux essais sur le terrain, en particulier en ce qui concerne la performance fonctionnelle ; et

- La mise au point d'une meilleure instrumentation pour mesurer la réponse de la chaussée avec plus de fiabilité et de précision à un moindre coût, afin d'obtenir des données de meilleure qualité pour développer et valider les modèles de chaussées.

Véhicules et ponts

La principale question qui ressort des résultats du Projet DIVINE est la relation entre, d'une part, la réponse initiale des ponts – en termes de déformations et de contraintes – et d'autre part, leur durée de vie en fatigue et les coûts d'entretien. Le Projet DIVINE a montré que, sous certaines conditions, le chargement dynamique dû aux véhicules lourds peut générer des cycles multiples de réponses amplifiées des ouvrages. Des recherches sont nécessaires pour déterminer les effets de telles réponses sur la détérioration des ponts et les coûts correspondants.

Les résultats du Projet DIVINE ont montré que tous les ponts, à l'exception de ceux de très grande portée, doivent être dimensionnés pour un chargement dynamique correspondant à tout le spectre de chargement par les véhicules. Les spécifications actuelles pour le dimensionnement des ponts ne considèrent que le chargement dans les fréquences basses et prennent très peu en compte l'uni de la couche de roulement des ponts et de leurs accès. D'autres recherches sont nécessaires pour renforcer la reconnaissance de ces effets dans les spécifications de chargements dynamiques autorisés.

Il est également nécessaire de disposer de moyens d'identifier les ponts existants susceptibles d'être exposés au chargement dynamique des véhicules lourds. Le Projet DIVINE a montré que la fréquence naturelle des ponts ainsi que le profil en long du pont lui-même et de ses accès étaient des facteurs importants dans la génération du chargement dynamique et dans l'amplification de la réponse du pont à ce chargement. Des recherches sont nécessaires pour développer des recommandations concernant l'identification des ponts exposés aux effets du chargement dynamique et les travaux d'entretien destinés à améliorer le profil en long des accès.

Les résultats du Projet DIVINE ont également montré que les suspensions des véhicules, en particulier celles qui n'ont pas un amortissement suffisant, pouvaient conduire à des interactions avec les ponts. Des recherches sont nécessaires afin de vérifier si des changements dans la conception des suspensions, ou des additifs aux exigences actuellement proposées pour satisfaire au critère de moindre agressivité, sont nécessaires pour prendre en compte ces interactions uniques entre véhicules et ponts.

V.4.3. Comment une meilleure connaissance des interactions physiques peut-elle conduire à une modélisation pratique des coûts pour les administrations et les usagers de la route ?

Des efforts supplémentaires sont nécessaires pour mettre au point des modèles exhaustifs sur les coûts des transports routiers pour les administrations et les usagers. Les plus grandes difficultés dans le

développement et l'utilisation de tels modèles résident dans la nécessité de pouvoir prédire les éléments suivants :

- Les effets des travaux d'entretien sur l'état fonctionnel et structurel des chaussées.
- Les effets de chargements dynamiques de grande intensité des ponts sur leur durée de vie et les coûts pour l'administration ; et
- Les effets de l'état fonctionnel de la chaussée sur les coûts d'exploitation des véhicules, y compris l'incidence de la vitesse et du temps de trajet, de l'usure des pneus, de la consommation de carburant, du confort de conduite et de la durabilité du véhicule.

En ce qui concerne les efforts de recherche à prévoir dans ces domaines, les résultats du Projet DIVINE ont démontré la nécessité de mettre l'accent sur l'incidence des travaux d'entretien, pour ce qui concerne la variabilité de la portance structurelle des chaussées et l'amélioration de leur état fonctionnel.

V.5. Conclusions résumées

En résumé, le Projet DIVINE a permis de dégager les principales conclusions scientifiques suivantes :

1. Les réponses primaires des chaussées reflètent le chargement dynamique total appliqué par les véhicules lourds pour des fréquences de charges dynamiques de roue allant au moins jusqu'à 15 Hz.

2. Les réponses primaires sont directement proportionnelles à la charge totale, y compris les charges dynamiques, dans le cas de chaussées épaisses (environ 150 mm d'épaisseur) et dans une moindre mesure pour les chaussées minces (environ 80 mm d'épaisseur).

3. Un essai accéléré dynamique a montré que le profil de la chaussée se détériorait plus rapidement sous une suspension acier que sous une suspension pneumatique supportant la même charge. Certains aspects de la fissuration et la profondeur maximum d'ornière étaient également plus important dans le cas des suspensions acier. La détérioration de la chaussée était également plus rapide de 15% dans le cas de la suspension acier.

4. Les simulateurs de route (bancs de vibration) reproduisent les charges dynamiques de roue mesurées sur la route dans le cas où tous les essieux du véhicule sont excités. La précision de la reproduction des charges dynamiques, en utilisant le coefficient de chargement dynamique, est d'au moins 3%.

5. On a confirmé que les propriétés essentielles des suspensions peu agressives se caractérisaient par une faible rigidité du ressort, un frottement de Coulomb très faible et un niveau approprié d'amortissement visqueux. De telles propriétés se retrouvent dans les suspensions pneumatiques bien conçues et bien entretenues et il est peu probable que des suspensions à ressort acier puissent atteindre un tel niveau de performance. Il est suggéré une méthode pour mesurer ces paramètres qui est plus précise et plus cohérente que les essais de lâcher et de marche actuellement utilisés.

6. L'utilisation de suspensions pneumatiques sur les essieux moteurs et porteurs (à l'exception peut-être de l'essieu de direction) permet de réduire la dégradation de la chaussée et devrait donc être encouragée.

7. Des simulations informatiques des charges dynamiques de roue sont capables de calculer ces charges avec une précision d'environ 5%, en utilisant le coefficient de chargement dynamique. Il est essentiel que ces modèles représentent avec précision les caractéristiques non linéaires de la suspension, et en particulier le frottement de Coulomb dans les ressorts à lame d'acier.

8. Sous un trafic mixte, les charges dynamiques tendent en général à se concentrer en des points de la route situés à 8 à 10 mètres d'intervalle. Sur une route présentant un bon uni, la somme cumulée des charges d'essieu au point de concentration est d'environ 10%. Sur une route ayant un mauvais uni, cet effet est deux fois plus important. La concentration des charges dynamiques pour les suspensions pneumatiques est deux fois moindre comparée aux suspensions acier.

9. Le profil du revêtement d'un pont et de ses approches a un effet direct sur la réponse de la suspension du camion et donc sur la réponse dynamique du pont. Pour un profil de bon uni, l'influence de la suspension du véhicule lourd est insignifiante, mais son importance augmente avec la dégradation de l'uni.

10. Pour les ponts de moyenne à longue portée (20-70 mètres) présentant un bon uni, les réponses dynamiques sont relativement faibles à la fois pour les véhicules ayant des suspensions acier et pour ceux ayant des suspensions pneumatiques. Dans cette gamme, on constate des réponses plus fortes pour les véhicules à suspensions pneumatiques roulant sur des ponts de fréquence 1.6 Hz (70 mètres) et pour les véhicules à suspension acier roulant sur des ponts de fréquence 3.0 Hz (40 mètres). Pour les ponts de courte portée (10 mètres) présentant un mauvais uni, on constate des réponses dynamiques importantes à la fois pour les véhicules équipés de suspensions acier et ceux équipés de suspensions pneumatiques. Les réponses les plus élevées ont été relevées pour les ponts de courte portée présentant un amortissement faible, au passage de véhicules à suspensions pneumatiques, dans le cas d'une excitation particulière des vibrations de débattement d'essieu.

ANNEXE A
TERMINOLOGIE ET BREVE DESCRIPTION DU DIMENSIONNEMENT DES CHAUSSEES, DE L'ANALYSE DE L'ÉTAT DES CHAUSSÉES ET DE LA CONCEPTION DES PONTS

A.1. Terminologie

A.1.1. Réponse initiale de la chaussée

Elle est définie dans ce rapport comme signifiant l'état actuel des contraintes, déformations ou déplacements se produisant à un point donné de la chaussée lors du passage d'une unité de chargement à la surface de la chaussée.

A.1.2. Endommagement ou dommage

Les chaussées ne subissent pas de ruine catastrophique. Elles se dégradent ordinairement en raison d'une accumulation par incrément **d'endommagements** en quantité faible mais finie, qui apparaît après une répétition d'applications de l'unité de chargement. La dégradation peut se produire sous forme d'une quantité finie de déformations permanentes en cisaillement ou volumétriques, ou en termes d'allongements finis suffisants pour provoquer un incrément d'endommagement par fatigue. Dans tous les cas, de petites quantités, mais des quantités finies, de dégradation s'accumulent pour se transformer en défauts visibles et non visibles – fissures ou déformation permanente – sur l'ensemble de la chaussée.

A.1.3. Dégradations

Les défauts qui apparaissent aux points les plus faibles de la chaussée et où le chargement est le plus élevé, sont de plus influencés par les effets environnementaux et par l'interaction d'autres défauts. Ils deviennent finalement manifestes dans des défauts visibles (ou mesurables) de la chaussée dénommés ***dégradations*** de la chaussée.

A.1.4. Détérioration de la chaussée

Ce terme est utilisé pour exprimer le rythme de progression des divers modes de dégradations mesurables. Pour les routes sujettes à la *fissuration due à la fatigue,* la détérioration de la chaussée varie de manière exponentielle par rapport à la charge de roue en fonction, peut-être, d'une loi en puissance quatrième. Dans le cas de routes sujettes à la déformation permanente, la détérioration de la chaussée suit également une loi de "puissance" mais avec un exposant plus faible, éventuellement égal à 1 (OCDE, 1992). Le terme *wear* en anglais, traduit ici par détérioration de la chaussée, est parfois utilisé dans le sens d'usure pour mentionner la dégradation des propriétés du revêtement de la chaussée, comme l'adhérence, mais dans ce rapport il est uniquement utilisé dans le sens décrit ci-dessus.

A.2. Développement des procédures de dimensionnement structurel des chaussées

A.2.1. Dimensionnement empirique

Les origines des abaques de dimensionnement empirique des chaussées remontent à la méthode CBR (*Californian Bearing Ratio*) de dimensionnement des chaussées élaborée par la Direction des Routes de l'État de Californie (Porter, 1942). Entre 1928 et 1942, la Direction a étudié la qualité et les épaisseurs des matériaux de couches de base, de fondation et de plate-forme support de chaussée pour des tronçons de chaussées souples en bon état et d'autres en état de ruine avancée sur l'ensemble du système routier de Californie. A partir de ces données, des courbes ont été élaborées pour déterminer l'épaisseur totale de la structure (couches de base, de fondation, et matériaux d'apport de la couche de forme) nécessaire pour supporter le trafic prévu.

A la fin des années 1940, le Laboratoire de recherche routière du Royaume-Uni (RRL) a comparé les épaisseurs totales des chaussées requises d'après la méthode CBR avec les épaisseurs réelles de routes présentant des états variés. Plus tard, des essais en vraie grandeur ont été menés sur des routes ouvertes à la circulation pour examiner la performance de ces routes dans diverses conditions de matériaux et d'épaisseurs de couche. En 1960, des données suffisantes étaient disponibles pour publier des normes préliminaires de dimensionnement (*Road Research Laboratory*, 1962). En 1965, la seconde édition était élargie pour prendre en compte les routes à faible trafic.

Les modèles empiriques sont limités par le fait qu'ils ont été développés à partir d'analyses de régression des données expérimentales et d'observation. Pour cette raison, si ces modèles sont utiles lorsque l'on ne comprend pas le mécanisme de la performance des chaussées, ils ne devraient pas être utilisés en dehors de l'éventail de données qui a servi à les développer.

A.2.2. Essai routier AASHO

On peut considérer que les débuts des essais modernes de chaussées avec chargement contrôlé et accéléré, par rapport aux sections expérimentales "en service" construites sur un réseau routier, remontent à l'Essai routier de l'Association Américaine des officiels des routes fédérales (AASHO) (*Highway Research Board*, 1962) conduit dans l'Illinois entre août 1956 — début de la construction des installations d'essai — et novembre 1960, lorsque les cycles de chargement ont pris fin. Le principal objectif de la recherche consistait à établir les relations entre performance, dimensionnement structurel (c'est-à-dire, épaisseurs des éléments de la structure de la chaussée) et chargement (c'est-à-dire, l'amplitude et la fréquence des charges à l'essieu). Étant donné que l'un des buts fondamentaux de l'étude était d'évaluer la performance des chaussées jusqu'à la ruine, beaucoup d'entre elles ont été dimensionnées pour rompre sous la charge ou, au moins, pour présenter de graves dégradations.

Les résultats sont présentés sous forme d'équations et de représentations graphiques montrant les effets spécifiques de variables particulières sur la performance de la chaussée. Ceci a permis d'identifier dans quelle mesure la modification des performances est associée à des changements spécifiques dans la charge d'essieu et au nombre de répétitions de la charge.

Le concept d'équivalence de charge à l'essieu initialement développé à partir de l'Essai AASHO a été utilisé pour convertir le nombre de passages d'une charge et configuration d'essieu données qui a provoqué un certain niveau de dégradation terminale de la chaussée en nombre de chargements par un essieu standard équivalent (ESALs – *Equivalent Standard Axle Loads*) qui entraînerait le même endommagement. Le concept est exprimé sous forme d'une loi de puissance et, parce qu'une puissance quatrième a été obtenue à partir d'une analyse des données de l'Essai AASHO, la loi est maintenant connue sous le nom de "loi de la puissance quatrième".

Cette loi a, ensuite, été largement utilisée, en particulier dans les procédures de dimensionnement empiriques, parce qu'elle a permis d'exprimer le trafic prévu en termes d'essieux équivalents pour la durée de vie prévue au lieu de recourir au "nombre de véhicules commerciaux". En d'autres termes, le recours à cette loi a permis de fonder le dimensionnement sur un trafic non spécifique composé de diverses charges et configurations d'essieu.

Comme dans le cas des procédures de dimensionnement empiriques qui ne devraient pas être utilisées en dehors de l'éventail des données à partir desquelles le modèle a été développé, l'utilisation de la "loi de la puissance quatrième" risque de ne pas être adaptée à toutes les situations à moins que les conditions d'environnement, de trafic, le type de chaussée et les méthodes de construction soient identiques ou très proches de ceux de l'Essai routier AASHO.

Un autre problème associé à l'utilisation des facteurs de dégradation des véhicules (ESALs) est que, même s'ils peuvent être utiles pour évaluer les différentes options de dimensionnement de la chaussée, ils ne donnent pas, en eux-mêmes, d'indication sur la performance à long terme de la chaussée, qui dépendra d'un ensemble d'autres facteurs. En tirant partie de l'expérience étendue sur leur utilisation, on peut également suggérer que certaines hypothèses — telles que la prémisse selon laquelle des charges provoquant des déflexions égales, provoquent aussi des dégradations égales — à la base de la détermination des valeurs des exposants dans les expressions de ces facteurs peuvent également être critiquées.

En plus de son rôle de pionnier dans le domaine de la performance des chaussées, il convient de rappeler que l'Essai routier AASHO a joué aussi le même rôle en matière de recherche expérimentale sur l'interaction dynamique véhicule/pont et sur la simulation des processus connexes à l'aide de modèles informatisés.

A.2.3. Dimensionnement mécaniste

Le dimensionnement des chaussées est passé d'une approche empirique à une approche plus fondamentale dans laquelle la chaussée est traitée comme une structure de génie civil qui, grâce aux connaissances sur les propriétés des matériaux constitutifs, est accessible à une analyse, premièrement, de sa réponse à une charge appliquée — c'est-à-dire, les contraintes, déformations et déplacements propagés dans la structure en réponse à l'application d'une charge — et, deuxièmement, de sa performance lorsqu'elle est soumise à de nombreuses répétitions de la charge appliquée — c'est-à-dire la déformation progressive de tous les matériaux et l'initiation et la progression des fissures dans les matériaux liés (bitumineux ou hydrauliques).

Les modèles de réponse les plus communément utilisés sont les modèles linéaires élastiques, même si la réponse peut également être déterminée avec divers types de modèles à éléments finis et de modèles viscoélastiques. La réponse aux données de charge est ensuite entrée dans un modèle de performance et la "vie", ou le nombre de répétitions de la charge utilisée dans la modélisation de la réponse, est déterminée. La procédure est itérative en ce sens que l'épaisseur et/ou la rigidité des matériaux constitutifs sont ajustées jusqu'à ce que la durée de vie estimée par le calcul soit plus grande que la durée de vie de référence retenue pour le dimensionnement.

Divers modèles de performance ont été adoptés. Par exemple, le modèle le plus couramment utilisés pour la durée de vie en fatigue des matériaux bitumineux est celui de la méthode de dimensionnement Shell (Shell, 1978) fondée sur les résultats d'essais en laboratoire. De nombreux modèles de performance pour les matériaux traités aux liants hydrauliques sont également fondés sur des

essais en laboratoire mais, plus récemment, ils ont été perfectionnés suite à des essais accélérés contrôlés sur chaussée (Jameson et al., 1992). Les exposants des variables de dégradation varient largement dans ces modèles et des valeurs aussi élevées que 18 ont été rapportées dans la littérature. De même, divers modèles ont été proposés pour la performance des matériaux en grave naturelle et des matériaux des couches de forme. Les modèles fondés sur les abaques de dimensionnement empiriques pour les matériaux non liés comportent généralement un certain conservatisme inhérent qui a des répercussions sur le critère de déformation du sol support retenu dans le dimensionnement de la chaussée et le dimensionnement du rechargement à prévoir.

Si le recours aux mesures de la réponse initiale — par exemple les modifications dans les contraintes, déformations, déflexions dues aux charges appliquées sur la chaussée — est utile pour dimensionner les chaussées, il ne conduit pas par lui-même à en faire un modèle de prévision de la performance de la chaussée. La raison en est que la performance de la chaussée dans le temps dépend de variables qui souvent ne sont pas directement liées à la réponse initiale de la chaussée. L'évolution d'une mesure de performance fonctionnelle, telle que l'uni, est étroitement associée aux variations de la résistance de la chaussée et du sol support, aux variations des épaisseurs des couches le long de la structure de la chaussée, et à l'évolution non uniforme de ces propriétés dans le temps sous l'influence de la nature dynamique du chargement de la chaussée et de l'environnement.

Une des premières procédures exploitables de dimensionnement mécaniste élaborée pour prédire la performance de la chaussée à long terme est VESYS (*Viscoelastic Structural Subsystem* — Sous-système structurel viscoélastique) (Kennis, 1978). Le grand nombre de données détaillées à entrer nécessaires pour obtenir des estimations de performance significatives a, toutefois, limité son utilisation aux chercheurs et aux universitaires. Plusieurs versions avancées ont depuis été développées et la dernière, VESYS 5, devrait être disponible en 1998. Même si les données d'entrée du programme sont toujours aussi complexes (si ce n'est plus) que celles des versions antérieures et permettent le calcul dans les cas de matériaux viscoélastiques, d'essieux multiples et de jumelages ou de roues simples, on espère qu'il sera utilisé sur le terrain compte tenu du meilleur niveau de connaissances en matière de dimensionnement mécaniste et des traitements par ordinateur de plus en plus rapides et précis.

Le modèle MOPP (*Mathematical model of pavement performance* — modèle mathématique de la performance de la chaussée) (Ullidtz, 1987) a été mis au point entre 1976 et 1985 et il est particulièrement intéressant parce qu'il permet de prédire l'évolution de l'uni dans le profil en long. Comme VESYS, le modèle est complexe mais une bonne corrélation a été trouvée entre ses prédictions et les résultats réels obtenus par l'Essai routier AASHO et avec ceux obtenus sur une installation d'essais accélérés de chaussée. L'Université de Cambridge (Collop et Cebon, 1995) a récemment développé un nouveau modèle de performance de chaussée sur l'ensemble de sa durée de vie (WLPPM — *Whole-life pavement performance model*) qui utilise les mesures de la réponse initiale, y compris les effets de la charge dynamique pour prédire la performance à long terme de la chaussée. Ce modèle est dans sa première phase de développement et utilise un certain nombre d'hypothèses simplificatrices sur la nature des variables de la chaussée. Les études paramétriques indiquent, jusqu'à présent, une assez bonne corrélation du modèle avec les observations sur le comportement à long terme d'une chaussée.

A.2.4. Essais accélérés de chaussée

Tandis que le dimensionnement de l'épaisseur des chaussées et les procédures de sélection des matériaux existants sont souvent fondés sur les résultats d'un grand nombre d'essais en vraie grandeur de chaussée menés dans de nombreux pays, cette approche a ses limites en termes d'adéquation vis-à-vis de l'accroissement du nombre de véhicules et des charges ainsi que des nouvelles configurations d'essieux et

de roues actuellement rencontrées. Pour cette raison, les services des routes ont tendance depuis ces dernières années à mener des programmes de recherche importants qui combinent le suivi de la performance à long terme de chaussées en service (PLTC) avec les essais accélérés en vraie grandeur (EAVG), et les essais de caractérisation des matériaux en laboratoire afin de tenter de mieux comprendre la performance des chaussées routières.

En outre, le besoin d'optimiser les ressources disponibles a conduit à développer de nouveaux matériaux et sous-produits, marginaux ou non-normalisés. L'EAVG convient bien à ce type d'études parce que les données relatives à la performance des matériaux peuvent être recueillies rapidement et facilement et comparées à la performance des matériaux qui sont déjà communément utilisés avec succès dans la pratique. En d'autres termes, l'EAVG peut être utilisé pour "noter" les matériaux et/ou les procédés.

L'EAVG peut être défini (Metcalf, 1996) comme l'application contrôlée d'un chargement de roue prototype, supérieur ou égal à la charge limite réglementaire, à un système prototype ou réel de structure de chaussée pour déterminer la réponse et la performance de la chaussée dans des conditions contrôlées, accélérées, d'accumulation de dommages dans un temps limité. L'accélération de la dégradation est obtenue à l'aide de l'augmentation du nombre de répétitions, de conditions de chargement modifiées, de conditions climatiques imposées (par exemple, température et/ou teneur en eau), de l'utilisation de chaussées plus minces avec une capacité structurelle réduite et, donc, une durée de vie moins longue à la conception, ou une combinaison de ces facteurs. La construction en vraie grandeur selon des procédés conventionnels est souhaitable pour que les résultats puissent être plus facilement applicables dans la pratique.

Le Programme de recherche national en coopération sur les routes des Etats-Unis (NCHRP — *National Co-operative Highway Research Program*) a récemment lancé une étude sur les installations d'EAVG à travers le monde (Barbour, 1993). L'enquête a montré que, si des procédures mécanistes de dimensionnement sont mises au point dans de nombreux pays, la plupart du temps elles n'ont pas supplanté les méthodes empiriques ou semi-empiriques ni les "catalogues" de dimensionnement. La validation des modèles de réponse théorique et des procédures de prédiction des performances est, en conséquence, une importante caractéristique des programmes d'EAVG. Par exemple, Scazziga et al. (1987) ont utilisé l'EAVG pour évaluer les technologies de mesure des contraintes/déformations pour les chaussées bitumineuses lors de l'essai international conduit par l'OCDE en 1984 à Nardo (Italie) (OCDE, 1985). On a trouvé que les mesures de déformation sont susceptibles de varier fortement en raison de l'hétérogénéité des propriétés des matériaux et des couches, des changements de température dans la chaussée et de la localisation transversale de la charge par rapport à la position des capteurs de déformation à l'intérieur de la chaussée. D'autres difficultés pour corréler les déformations mesurées et prédites peuvent également être liées à la variation dans la qualité de la construction et au fait que les hypothèses inhérentes aux nombreux modèles de réponse de la chaussée (par exemple comportement linéaire élastique) ne sont pas en rapport avec le comportement réel.

Par exemple, pour pouvoir utiliser la modélisation de la déformation, il faut disposer de l'estimation du comportement du matériau pour évaluer la réponse en déformation permanente sous chargement répété. Les études conduites sur l'installation Shell (Hofstra et Valkering, 1977), à l'origine de la méthode de dimensionnement Shell pour les chaussées bitumineuses, ont montré que la théorie linéaire élastique n'est pas en parfait accord avec la réponse de la chaussée, l'importance des effets de température sur les chaussées bitumineuses ayant été clairement démontrée. Les études sur la durée de vie en fatigue de structures complètes de chaussées bitumineuses (Ullidtz, 1982) ont conclu que, en ce qui concerne la fissuration "il y a une différence considérable entre le nombre de charges prédit et celui observé (à la rupture du matériau bitumineux)", montrant les difficultés rencontrées si l'on compare le

comportement en fatigue en laboratoire à celui obtenu dans des conditions de chargement accéléré en vraie grandeur.

Plusieurs études (Vuong et al., 1994), ont trouvé que la déformation intervient davantage dans les couches de base que dans le sol support, ce qui a fait douter de l'applicabilité de nombreuses relations de performance fondées sur la déformation verticale maximum sur le sol support.

Comme le laisse à penser l'exposé ci-dessus, la première utilisation des EAVG a porté sur la comparaison empirique des différents matériaux et configurations de chaussée sous des configurations de chargement différentes. Les résultats de ces essais forment la base du dimensionnement de la chaussée et des procédures de sélection des matériaux actuels. Une utilisation secondaire a porté sur l'évaluation des modèles théoriques de réponse de la chaussée et de comportement des matériaux. En raison de sa nature, l'EAVG n'est pas capable de prendre en compte l'interaction des facteurs environnementaux et des charges, et en particulier la détérioration des matériaux de la chaussée exposés au soleil, à l'eau et à la durée. Il y a des preuves claires que l'environnement dans lequel une charge est appliquée, en présence d'humidité et de températures extrêmes en particulier, a une influence majeure sur les effets de la charge.

L'EAVG a été adopté pour l'Elément de Recherche 1 du Projet DIVINE parce que l'objectif principal était de comparer la performance d'une chaussée souple bien définie sous deux types de suspension différents et, ainsi, de "noter" les systèmes de suspension. Une telle étude n'aurait pas pu être conduite à l'aide d'un essai à long terme parce que, outre le temps nécessaire pour recueillir les données, le contrôle des conditions de trafic (c'est-à-dire, s'assurer que la même charge est appliquée au même tronçon de chaussée par deux systèmes de suspension différents), le contrôle de l'environnement et le contrôle strict du processus de construction n'auraient pas été faisables. Par ailleurs, il était impératif que l'EAVG soit conduit en association avec d'autres études, non seulement dans le cadre de l'Elément de Recherche 1 (caractérisation en laboratoire, caractérisation des suspensions, etc.), mais également avec les autres Eléments si l'on souhaitait obtenir une meilleure compréhension de l'interaction de la charge dynamique de la roue avec la route.

A.3. Développement des procédures d'analyse de l'état de la chaussée

Au cours de l'Essai AASHO, on a réalisé qu'une définition explicite de "l'état terminal" était nécessaire si l'on souhaitait que toute procédure de dimensionnement tirée de l'essai fasse l'objet d'une utilisation étendue. On a également mieux admis que les routes étaient construites pour le bénéfice de l'usager qui, en définitive, juge si un état donné de la chaussée est acceptable ou non. Il a donc été demandé à des groupes d'usagers de conduire sur des tronçons spécifiques de route et de "noter" son état entre 0 (route impraticable à vitesse normale) et 5 (route parfaite). Il leur a également été demandé s'ils considéraient l'état comme acceptable. Cette notation a été dénommée "Notation de qualité de service' (*Present Serviceability Rating* – PSR).

Il n'était pas possible d'avoir des groupes de conducteurs pour noter toutes les routes, et la PSR subjective a, en conséquence, été corrélée à une mesure objective de l'état dénommée Indice de qualité de service (*Present Serviceability Index* – PSI).

L'équation originale dérivée de l'Essai AASHO pour les chaussées souples est la suivante :

$$PSI = 5.03 - 1.9 \times \log(1 + SV) - 1.38 \times RD^2 - 0.01 \times \sqrt{(C + P)}$$

où :

SV = variance de la pente moyenne (pente exprimée en μrad et mesurée sur une longueur de 1 pied -- 304.8mm).

RD = profondeur moyenne d'ornière (pouces) dans les deux traces de roues (mesurée avec une règle de 4 pieds – i.e. 1219.2 mm).

C = superficie présentant une fissuration importante (pieds carrés fissurés/1000 pieds carrés).

P = superficie qui a fait l'objet d'emplois partiels (pieds carrés).

On a toutefois trouvé que les fissurations, l'orniérage et l'emploi partiel ne comptaient que pour 5% de la valeur du PSI. Les valeurs du PSI mesurées aujourd'hui par la plupart des dispositifs de mesure d'uni du type "réponse" (par opposition aux profilomètres) sont fondées sur le profil uniquement, ou plus exactement sur des statiques sur le profil converties en PSI grâce à une corrélation de la formule simplifiée suivante :

$$PSI = 5.03 - \log (1+SV)$$

Parmi les autres indices de la performance fonctionnelle qui ont été associés au PSI, on peut mentionner l'indice de confort de conduite (RCI - *Riding Comfort Index*) développé au Canada (Rilett et al., 1989).

En termes simples, l'uni de la route, ou les défauts d'uni, est une mesure de la perception par le conducteur des variations du profil de la surface de la route. En tant que mesure de la performance fonctionnelle, il a l'avantage de pouvoir être mesuré de manière objective à l'aide d'un dispositif de mesure normalisé comme un profilomètre, parce que l'uni mesuré n'est pas influencé par les caractéristiques dynamiques du véhicule hôte. Une mesure de l'uni communément utilisée, l'IRI (*International Roughness Index* — indice international d'uni) exprimé en mm/m, est une échelle d'uni fondée sur la réponse d'un véhicule générique aux défauts d'uni de la surface de la route. Sa véritable valeur est déterminée en obtenant une mesure suffisamment précise du profil de la route et en la traitant à l'aide d'un algorithme qui simule la manière dont un véhicule de référence répondrait aux entrées liées à l'uni, et en effectuant la somme des débattements des suspensions. Ainsi, il reproduit mathématiquement un équipement de mesure d'uni du type "réponse" (Gillespsie, 1992).

Il est admis que l'uni de la route n'est pas toujours une mesure adaptée pour évaluer quand et quel type d'entretien ou de réhabilitation est nécessaire durant le cycle de vie de la chaussée. Des mesures spécifiques des dégradations de la chaussée, telles que l'orniérage et la fissuration, sont plus adaptées à cette fonction.

A.4. Développement des méthodes de dimensionnement des ponts tenant compte du chargement dynamique

La situation a évolué de manière assez différente pour les ponts. Il est devenu évident au milieu du siècle dernier qu'il n'était pas suffisant de prendre seulement en compte les effets des charges statiques dans le cas des ponts ferroviaires. En 1847, après une série de rupture de ponts ferroviaires au Royaume-Uni, une étude a été lancée sur les effets des charges dynamiques produites par les véhicules ferroviaires. Cette étude n'a pas seulement tenté de trouver une solution au problème théorique de la réponse d'une poutre au passage d'une force et/ou d'une masse en mouvement à une vitesse donnée, mais elle a également donné lieu à ce qui était probablement les premiers essais d'un pont modèle et de ponts en exploitation. Sur la base de ces résultats et d'autres travaux ultérieurs, la tolérance de chargement dynamique (DLA -- *Dynamic Load Allowance*) pour les charges de pont ferroviaire a été définie comme étant fonction de la portée moyenne du pont.

Les premières spécifications traitant du chargement des ponts routiers au début du siècle ont eu recours à la philosophie élaborée pour les ponts ferroviaires. Toutefois, dès 1931, un comité de l'ASCE (*American Society of Civil Engineers*) a trouvé "qu'il n'y avait pas de raison scientifique pour considérer la portée moyenne du pont comme paramètre lorsque l'on étudie les effets des charges dynamiques des roues sur la réponse du pont". Quarante années après, les méthodes expérimentales et informatisées étaient suffisamment développées pour prouver que la réponse dynamique d'un pont aux actions des véhicules lourds est principalement fonction, d'une part, de la fréquence propre du pont et, d'autre part, de la bande et l'amplitude des fréquences des charges dynamiques de roues appliquées par le véhicule lors de son passage sur le pont. Les premières expérimentations sur les questions de concordance de fréquences et de quasi-résonance ont été conduites dix années plus tard au Canada et en Suisse. Sur la base de ces résultats, des normes de conception des ponts dans lesquelles la tolérance dynamique du pont est fonction de la fréquence propre du pont, ont été mises au point. Si la fréquence propre d'un pont est essentiellement constante et indépendante d'autres paramètres, la bande et l'amplitude des fréquences de la charge dynamique de roue dépendent du système de suspension et de la vitesse du véhicule, ainsi que du profil en long de la chaussée.

Les spécifications relatives au chargement des ponts, mises au point récemment, telles que l'Eurocode 1 -- Partie 3, SIA 160 (1989), BS 5400 et le code de dimensionnement des ponts d'Austroads sorti en 1992, tiennent compte des charges dynamiques sur la base de multiples études expérimentales et analytiques conduites dans plusieurs pays. Néanmoins, des travaux supplémentaires sont nécessaires afin de déboucher à une meilleure compréhension de l'interaction véhicule/pont et de prendre en compte différents types de véhicules, de suspensions et de défauts d'uni de la couche de roulement.

BIBLIOGRAPHIE

AMERICAN SOCIETY FOR CIVIL ENGINEERS (1931), "Impact in Highway Bridges", Final Report of the Special Committee, with discussion, Trans. ASCE 95, Paper No.1786.

BARBOUR, I. A. (1993), *Multiple-sensor Weigh-in-motion Trials at Abingdon (A34)*, Research Report 375. Transport Research Laboratory, Crowthorne.

COLLOP, A. C. et D. CEBON (1995*), A Parametric Study of Factors Affecting Flexible Pavement Performance,* Department of Engineering, University of Cambridge, Cambridge.

GILLESPIE, T.D. (1992). *Everything You Always Wanted to Know about the IRI but Were Afraid to Ask.* Rapport présenté lors de la "Road Profile Users Group Meeting", 22-24 September 1992, Lincoln Nebraska.

HIGHWAY RESEARCH BOARD (1962), *The AASHO Road Test. Report 7: Summary Report,* National Academy of Sciences - National Research Council Publication 1061, Washington DC.

HOFSTRA, A. et C. P. VALKERING (1977), "The Modulus of Asphalt Layers at High Temperatures; Comparison of Laboratory Measurements under Simulated Traffic Conditions with Theory", *Proc. 3rd International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements.* pp. 430-43. University of Michigan, Ann Arbor.

JAMESON, G. W., SHARP, K. G. et R. YEO (1992), *Cement-treated Crushed Rock Fatigue under Accelerated Loading: the Mulgrave,(Victoria) ALF Trial, 1989/1991*, Australian Road Research Board, Research Report, ARR No. 229, July. ARRB.

KENIS, W. J. (1978), *VESYS IIM Predictive Design Procedure, Users' Manual*, FHWA Report RD77-154. FHWA, Washington DC.

METCALF, J. B. (1996), "Application of Full-scale Accelerated Pavement Testing", NCHRP Synthesis 235, Transportation Research Board. National Research Council, Washington DC.

OCDE (1985), RECHERCHE EN MATIERE DE ROUTES ET DE TRANSPORTS ROUTIERS, *Essais en vraie grandeur des superstructures routières,* Paris.

OCDE (1992), RECHERCHE EN MATIERE DE ROUTES ET DE TRANSPORTS ROUTIERS, *Le chargement dynamique des chaussées,* Paris.

PORTER, O. J. (1942), "Foundations for Flexible Pavements", *Proceedings of the Highway Research Board,* 22, pp. 100-36. TRB, Washington DC.

RILETT, L. R., HUTCHINSON, B. G., et R. C. G. HAAS (1989), "Cost Allocation Implications of Flexible Pavement Deterioration Models", *Transportation Research Record 1215, Pavement Management and Rehabilitation.,* pp. 31-42. Transport Research Board, National Research Council, Washington DC.

ROAD RESEARCH LABORATORY (1960) *A Guide to the Structural Design of Pavements for New Roads*, Road Note 29. TRL, Crowthorne.

SCAZZIGA, I., DUMONT, A. G. et W. KNOBEL (1987), "Strain Measurements in Bituminous Layers", *Proceedings of the 6th International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements,* pp. 574-89. University of Michigan, Ann Arbor.

SHELL (1978), *Shell Pavement Design Manual*.

ULLIDTZ, P. (1982), "Predicting Pavement Response and Performance from Full-scale Testing", International Colloquium on Full Scale Pavement Tests, Institute fur Strassen-, Eisenbahn- und Felsbau an der Eidgenossischen Tehnischen Hochschule, pp. 129-46, ETH, Zurich

ULLIDTZ, P. (1987), *Pavement Analysis*, Developments in Civil Engineering, 19. Elsevier.

VUONG, B. T., SHARP, K. G., BARAN, E. et N. J. VERTESSY (1994), The Performance of Fine Grained Marginal Material under Accelerated Loading, *Proceedings of the 17th ARRB Conference*, Gold Coast 17(2), August, pp. 145-64. ARRB.

ANNEXE B
INSTALLATIONS ET ÉQUIPEMENT UTILISÉS

La coopération internationale favorisée par l'OCDE a donné la possibilité de disposer des installations de recherche les mieux adaptées concernant les véhicules, les chaussées et les ouvrages d'art, ce qui a permis de se concentrer individuellement sur chaque objectif du projet. Les sections suivantes décrivent les principales installations utilisées dans le cadre du projet DIVINE.

B.1. Installation sous abri d'essai accéléré de chaussée de Canterbury (CAPTIF – *Canterbury Accelerated Pavement Testing Indoor Facility)*

L'Elément 1 a consisté en un essai accéléré sous conditions contrôlées conçu pour provoquer une détérioration de la chaussée sous différents types de suspensions. Pour choisir l'installation, on est parti des exigences requises pour réaliser l'essai. Un examen des différents sites candidats a été réalisé et c'est finalement le site CAPTIF, situé à Christchurch en Nouvelle-Zélande, qui a été sélectionné.

CAPTIF a été conçu pour appliquer des charges ayant des caractéristiques dynamiques similaires à celles des flottes de véhicules en exploitation. La chaussée et sa fondation ont été construites sur une piste annulaire d'un diamètre moyen de 18.5 mètres. Les principales caractéristiques de CAPTIF sont son simulateur de chargement et son émulateur de véhicule (SLAVE – *Simulated Loading and Vehicle Emulator*). Les deux véhicules SLAVE utilisent les composantes représentatives des suspensions des véhicules lourds. Différents types de suspensions peuvent être montés sur les véhicules. Les principales caractéristiques de SLAVE sont résumées dans le tableau B.1.

Tableau B.1. **Caractéristiques de SLAVE**

Elément	Caractéristique
Roues d'essai	Roues jumelés ou simples ; standards ou larges ; pneus à carcasse radiale ou diagonale ; avec ou sans chambre à air ; diamètre maximal : 1.06 m.
Masse de chaque véhicule	De 21 à 60 kN (une charge d'essai de 49 kN a été utilisée dans l'Elément 1)
Suspension	Pneumatique ; ou ressort à lames d'acier multiples : parabolique simple ou double
Transmission aux roues	Transmission hydraulique à l'essieu, contrôlée et variable ; bidirectionnelle
Vitesse	0 à 50 km/h ; programmable ; précision de 1 km/h – une vitesse nominale d'essai de 45 km/h a été utilisé dans l'Elément 1
Rayon du trajet	9.26 m.

Les “véhicules” SLAVE sont équipés de groupes de demi-essieu qui peuvent être montés soit en roues jumelées soit en roues simples (des roues simples ont été utilisées dans l’essai DIVINE). Les configurations de chaque véhicule, pour ce qui concerne le type de suspension, la charge de roue, le type et le nombre de pneus, peuvent être identiques ou différentes ; dans ce dernier cas il est possible de faire un essai simultané de différentes caractéristiques de charge. Contrairement aux autres installations de chargement accéléré, SLAVE a été conçu pour générer des charges de roue dynamiques réalistes.

En ce qui concerne le Projet DIVINE, une des caractéristiques les plus importantes de CAPTIF était la possibilité d’utiliser deux pistes de chargement sur une chaussée d’essai, avec un espace suffisant entre les pistes, afin de produire une nette distinction entre les dégradations de la chaussée se produisant sur chaque piste. Dans le cadre du projet DIVINE, les véhicules SLAVE étaient équipés de systèmes de suspension à lames d’acier et de suspensions pneumatiques.

L’instrumentation du véhicule comportait des accéléromètres, montés sur la masse suspendue et la masse non suspendue de chaque véhicule, et des capteurs de déplacement pour mesurer les déplacements des suspensions. Les forces dynamiques de roue ont été calculées en combinant les deux signaux de l’accéléromètre, pondérés par les facteurs de masse appropriés.

B.2. Routes d’essai du Projet DIVINE

Les essais accélérés de CAPTIF conduits sous conditions contrôlées ont été complétés par les essais en vraie grandeur sur des chaussées instrumentées. Le Projet DIVINE a fait appel à de nombreux essais en vraie grandeur pour les Eléments 2 et 5.

B.2.1. Site d’essai de Virttaa (Finlande)

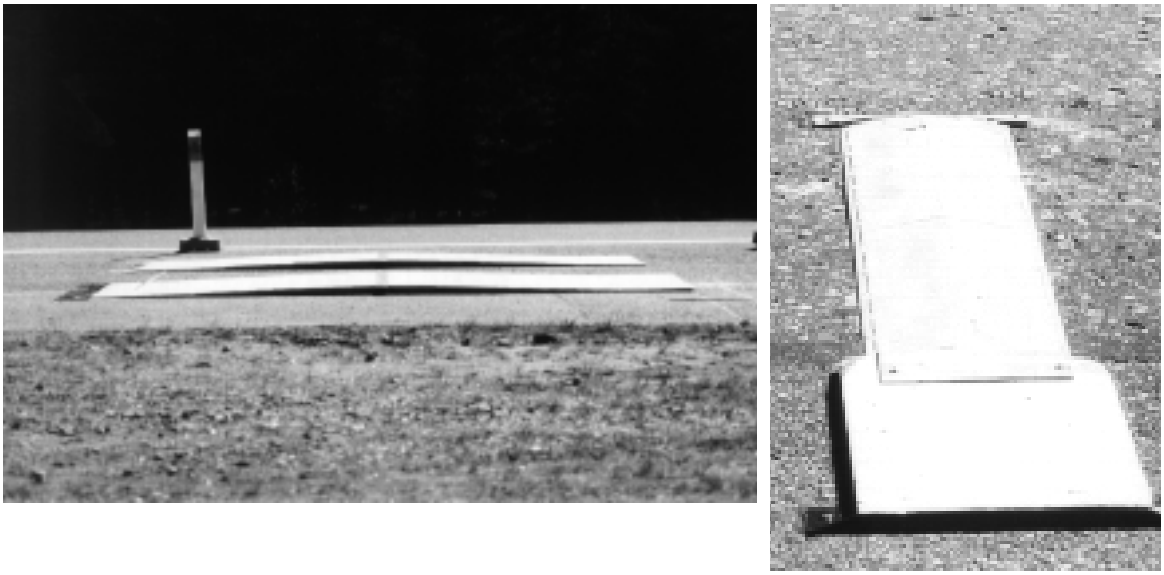
Le site d’essai de Virttaa est situé sur une section de 3 km en ligne droite d’une route à deux voies constituant une piste d’aviation temporaire de la Force Aérienne de la Finlande. Le site a une largeur d’environ 40 mètres et a déjà été utilisé dans le passé pour d’autres études portant sur la réponse et le comportement des chaussées. Ce site a été jugé tout à fait approprié pour les travaux de l’Elément 2 car une instrumentation conséquente de très bonne qualité y était déjà installée.

On a choisi une section du site comportant deux chaussées bitumineuses, l’une d’une épaisseur de 150 mm et l’autre d’une épaisseur de 80 mm. L’instrumentation de la chaussée comportait des capteurs, pour mesurer les déformations longitudinales et transversales, situés au sommet et à la base de la couche bitumineuse et un certain nombre de capteurs de pression situés dans les couches non liées et le sol support.

Les véhicules instrumentés (voir Section B.4) se déplaçaient le long de la ligne de mesure, et des mesures simultanées des charges dynamiques appliquées par le véhicule et des contraintes et déformations générées dans la chaussée étaient effectuées.

Deux différentes “bosses” (sorte de dos d’âne) ont été utilisées dans les essais : une bosse longue, en contreplaqué, d’une longueur de 4 mètres et d’une épaisseur de 50 mm, conçue pour générer des rebondissements de la caisse du véhicule ; et une bosse courte en acier, d’une longueur de 0.3 m et d’une épaisseur de 25 mm, conçue pour générer des débattements d’essieu (voir figure B.1). On a également réalisé des essais en l’absence de bosses.

Figure B.1. **Bosses courtes et longues utilisées dans l'Elément 2**



B.2.2. Route d'essai de l'Administration fédérale des routes des Etats-Unis (FHWA)

La route d'essai de la FHWA est située au Centre de Recherche sur les Routes de Turner-Fairbanks à McLean, Virginie. Bien que cette voie ne fasse par partie du réseau routier public, elle supporte un trafic faible en tant que route d'accès au site. La chaussée est comparable à la structure la plus épaisse de Virttaa, elle comprend une épaisseur nominale de béton bitumineux de 178 mm et a été construite pour une expérience conduite en 1991.

En utilisant la même technologie que pour la chaussée de Virttaa, 16 jauges de mesures de déformation longitudinale et transversale ont été installées à proximité du chemin de roulement afin d'enregistrer les déformations générées au sommet et à la base de la couche bitumineuse lors du passage d'un véhicule.

Le véhicule instrumenté du NRC (voir Section B.4) a également été utilisé sur la route d'essai de la FHWA, ce qui a permis d'établir un lien entre les deux sites d'essai. Etant donné que les différences de chargement dynamique peuvent être attribuées non seulement aux différences dans le profil en long de la route mais également aux différences dans la vitesse des véhicules, les essais de la FHWA ont été réalisés à une vitesse très basse et à des vitesses de 15, 25, 35 et 45 km/h en vue de prendre en compte cet effet. Les essais de la FHWA ont utilisé des bosses ayant à peu près la même forme que celles de Virttaa mais légèrement plus longues.

B.2.3. Section test sur la RN10 à Trappes (France)

L'Elément 5 portait principalement sur les charges dynamiques de la circulation sur les chaussées imposées par des véhicules d'essai connus et par un flux de trafic normal. Une attention particulière a été accordée à l'identification d'une possible répétabilité spatiale dans les caractéristiques de ces charges dynamiques. Afin d'y parvenir, une section d'une longueur appropriée de route publique était nécessaire et devait satisfaire aux exigences relativement strictes suivantes :

- Un trafic élevé avec une proportion importante de véhicules lourds de marchandises.

- Une section plane en ligne droite, supportant un trafic à vitesse relativement constante, sans congestion.

- Une chaussée dont l'uni était représentatif des routes habituellement rencontrées ; et

- Une bonne sécurité des zones sous expérimentations.

Au niveau de La Verrière, ville située à 35 kilomètres de Paris près de Trappes, la Nationale 10 (RN10) est une route à deux fois deux voies, droite, en terrain plat, supportant un trafic de 30 000 véhicules par jour, dont 25% de véhicules lourds de marchandises. L'uni de la chaussée est bon, avec un index IRI de 1.71 mm/m. Dans le cadre de l'essai de l'Elément 5, un ensemble de capteurs multiples WIM (MS-WIM) composé de 24 barres piézocéramiques fabriqué par Transfibre a été installé par Drouard. Il a été implanté sur une longueur totale de 36 mètres sur la voie lente du sens Paris-Province, avec un espacement étudié entre les différents capteurs. Les capteurs étaient connectés à trois moniteurs électroniques de pesage en marche (WIM) — fabriqués par LEEM, fournis par VECTRA et exploités par le Laboratoire Régional de l'Ouest Parisien (LROP) — afin de mesurer les forces d'impact au niveau des essieux à différents endroits et d'évaluer la preuve de la répétabilité spatiale (Figure B.2.). Une installation de pesage statique utilisée par la police pour les contrôles était située à 5 km en amont de la circulation et a servi pour mesurer les charges statiques réelles de véhicules lourds des marchandises pesés en marche et pour en déduire les facteurs d'impact et les incréments dynamiques.

Figure B.2. **Site de Trappes utilisé pour les expérimentations de l'Elément 5**

Le système de pesage en marche (MS-WIM) a été étalonné avec précision, en utilisant des véhicules pré-pesés puis le camion instrumenté du NRC. On a vérifié régulièrement l'étalonnage durant l'essai.

Les forces d'impact ont été mesurées par les capteurs WIM pour les deux véhicules instrumentés — le camion NRC et une remorque allemande à essieu simple fournie par l'Université de Hanovre — deux véhicules commerciaux, aimablement fournis par Renault Véhicules Industriels, et pour des véhicules lourds pré-pesés circulant dans le flux de trafic. En outre, on a pesé en marche un grand nombre de véhicules lourds dans le flux de circulation pendant une semaine puis on a estimé de manière précise leurs charges statiques à l'aide du système MS-WIM.

B.3. Ponts utilisés pour les essais de l'Elément 6

Sept ponts ont été instrumentés dans le cadre de l'Elément 6. Ces ouvrages étaient situés en Suisse et en Australie (*New South Wales*). Les principaux paramètres géométriques et dynamiques des ponts sont résumés dans le tableau B.2. et une photo de l'un des ponts australiens de courte portée est présentée à la figure B.3.

Tableau B.2. **Principaux paramètres des ponts de l'essai**

Pont (pays)	Portée max. (m)	Description	Fréquence propre (Hz)	Amortissement (%)
Sort (Suisse)	70.0	5 travées continues, poutres simple caisson en béton précontraint	1.62	1.00
Deibüel (Suisse)	41.0	3 travées continues, poutres simple caisson en béton précontraint	3.01	0.80
Foss (Suisse)	31.0	3 travées continues, poutres double caisson en béton précontraint	4.44	1.06
Lawsons (Australie)	23.3	1 travée, poutre en béton précontraint et dalle en béton armé	5.10	1.00
Coxs (Australie)	11.0	4 travées, dalles en béton armé simplement supportées par des poutres en acier	10.2	4.50
Camerons (Australie)	9.1	4 travées, platelage en béton précontraint	11.3	1.50
Cromarty (Australie)	9.0	3 travées, poutres en bois naturel et platelage bois	9.50	2.60

Source : Cantieni et Heywood, 1998.

Figure B.3. **Pont du Camerons Creek**

B.4. Véhicules utilisés pour les Eléments 2, 3, 5 et 6

Afin de répondre aux exigences strictes du Projet DIVINE, il était nécessaire de conduire des expériences pour lesquelles les charges dynamiques appliquées par les véhicules aux éléments de l'infrastructure pouvaient être mesurées simultanément avec les contraintes, les déformations et les déflexions apparus dans ces éléments de chaussée. Ceci nécessitait donc des véhicules instrumentés de manière appropriée et pouvant être utilisés de manière sûre et efficace dans des conditions expérimentales contrôlées.

Le Projet DIVINE a eu la chance d'avoir à sa disposition plusieurs véhicules qui ont été spécifiquement mis au point pour ces applications. Ils sont décrits dans les sections suivantes.

B.4.1. Véhicule du Conseil National de Recherche du Canada (NRC – National Research Council)

Le véhicule NRC est un véhicule lourd instrumenté articulé, à six essieux, consistant en un tracteur à 3 essieux et une remorque citerne à trois essieux avec un groupe d'essieux tandem et un essieu "ventral" (voir figure B.4). La configuration de la citerne a permis de contrôler la charge sur les essieux en ajoutant ou en enlevant une charge liquide de l'un ou plusieurs des compartiments de la citerne. Le véhicule, avec tracteur à cabine avancée, est typique des camions en circulation dans la plupart des pays du monde. Trois caractéristiques du véhicule étaient particulièrement adaptées à l'essai DIVINE. Tout d'abord, les suspensions sur tous les essieux, à l'exception de l'essieu de direction, pouvaient être changées de sorte que le véhicule pouvait être facilement équipé de n'importe quelle combinaison de suspensions pneumatiques, acier ou caoutchouc. Ceci était particulièrement important pour l'Elément 6 pour lequel il était nécessaire de comparer les suspensions dites "peu agressives" et les suspensions dites "agressives". Deuxièmement, le véhicule était équipé d'instrumentation sur chacun de ses essieux afin de mesurer les charges dynamiques de roue et la vitesse du véhicule. L'instrumentation pour la charge de roue comportait deux jauges de déformation et deux accéléromètres par essieu, configurés comme des montages en pont complets, mais montés de manière à être sensibles au cisaillement. Enfin, l'essieu "ventral" pouvait être relevé à n'importe quel moment, de sorte qu'il ne soit pas en contact avec la route.

Ceci permettait d'établir avec beaucoup de précision la charge zéro pour l'instrumentation sur cet essieu, et donc de connaître avec précision la valeur absolue de la charge sur l'essieu. Ceci était particulièrement important pour les Eléments 2 et 5, pour lesquels il était nécessaire d'appliquer des charges connues sur le revêtement et de mesurer les réponses simultanées grâce à l'instrumentation installée dans la route.

Figure B.4. **Véhicule instrumenté du NRC**

B.4.2. Véhicule du Laboratoire de recherche sur les transports du Royaume-Uni (Transport Research Laboratory – TRL)

Le camion Ford du TRL utilisé dans les Eléments 2 et 3 est un véhicule à deux essieux d'un poids total de 17.5 tonnes équipé d'un essieu moteur et d'un essieu de direction à suspension acier (voir Figure B.5). Des amortisseurs hydrauliques ont été montés sur chaque essieu. L'essieu moteur était équipé d'un système de suspension à lames d'acier comportant un ressort supérieur à 3 lames, et un ressort inférieur à 2 lames qui agit comme un ressort d'appoint en cas de surcharge. L'essieu de direction était équipé d'un ressort à deux lames.

L'instrumentation montée sur les essieux consistait en deux jauges de déformations, situées sur les surfaces supérieures et inférieures de l'essieu entre le ressort et le moyeu, afin de mesurer les efforts de flexion, et deux accéléromètres pour estimer les forces d'inertie de la masse d'essieu, situés à l'extérieur des jauges de déformation. Les résultats de ces capteurs pouvaient être combinés pour mesurer la force verticale instantanée appliquée à la route par la roue sur l'essieu instrumenté.

Figure B.5. **Véhicule instrumenté du TRL**

B.4.3. Remorque de Hanovre (Allemagne)

Le véhicule de l'Université de Hanovre (voir Figure B.6) est constitué d'une remorque instrumentée à un essieu et d'un camion rigide à deux essieux. Sa configuration autorise la présence de suspensions pneumatiques ou mécaniques, ainsi que le montage de pneus simples ou jumelés. L'essieu est équipé d'accéléromètres pour mesurer les charges dynamiques appliquées, et on peut soulever la remorque hydrauliquement pour vérifier l'instrumentation et assurer un bon étalonnage initial. On peut faire varier la charge d'essieu entre environ 2.5 et 8.5 tonnes en la chargeant plus ou moins avec des blocs de béton. Dans le cadre de l'essai DIVINE, la remorque était utilisée pour procéder à une nouvelle vérification de l'étalonnage de l'ensemble des capteurs WIM utilisés sur le site d'essai de la RN10, près de Trappes, France.

Figure B.6. **Remorque de l'Université de Hanovre**

B.4.4. Véhicules d'essai de l'Australie

Les véhicules d'essai utilisés en Australie – camions à benne basculante articulés à six essieux (voir Figure B.7) – ont été utilisés pour l'évaluation dynamique des ponts de courte portée. Chaque véhicule était chargé jusqu'à son maximum autorisé, c'est-à-dire un poids total en charge de 425 kN, un essieu directeur de 60 kN, 165 kN sur le groupe d'essieux tandem et 200 kN sur le groupe d'essieux tridem. Les remorques étaient modifiées de sorte à pouvoir les équiper soit avec des suspensions pneumatiques BPW, soit avec des suspensions acier à 8 lames fournies par York Australia.

Figure B.7. **Véhicule d'essai de l'Australie à suspension pneumatique sur le Pont de Creek Lawsons**

Les véhicules d'essai étaient instrumentés pour mesurer la force dynamique de roue pour chacun des essieux de la remorque. Chaque emplacement de roue du groupe d'essieu tridem était équipé de jauges pour mesurer les déformations dues au cisaillement dans la fusée d'essieu, ainsi que d'accéléromètres pour mesurer l'accélération de la masse non suspendue. Les signaux combinés étaient transmis directement à un système d'acquisition de données, pour enregistrement et analyse ultérieure. Les essieux instrumentés et étalonnés étaient fournis par BPW, Allemagne.

B.5. Le laser RST portable

Le laser RST portable est un profilomètre à grande vitesse conçu en Suède, fondé sur le principe GM de profilomètre développé par le laboratoire de recherche de la General Motors pendant les années 60. Pendant que le véhicule sur lequel est installé le laser RST portable roule sur une route, on effectue des mesures de la distance verticale entre un point du véhicule et la surface de la route (en utilisant une unité de distance propre à la mesure au laser), de l'accélération verticale à ce point (à l'aide d'un accéléromètre) et de la distance parcourue par le véhicule. Les données sont recueillies, analysées puis stockées dans un ordinateur embarqué. Le profil en long est mesuré sur des échantillons de route tous les 55 mm. Ces mesures peuvent être effectuées à différentes vitesses entre 15 et 90 km/h. Ceci signifie que le véhicule de mesure peut s'adapter à la vitesse et aux variations du trafic sans être gêné par la circulation ou sans perturber celle-ci. La caractéristique principale du laser RST portable est qu'il peut être facilement transporté (par avion, par exemple) et accroché à la barre d'attelage de presque tous les véhicules, avec éventuellement quelques adaptations nécessaires (voir Figure B.8).

Figure B.8. **Le portable laser RST**

ANNEXE C
GLOSSAIRE DES ABRÉVIATIONS

AASHO	American Association of State Highway Officials
APL	Analyseur de Profil en Long
ASCE	American Society of Civil Engineers
CBR	California Bearing Ratio – *Indice portant californien*
CCD	Coefficient de Chargement Dynamique
CV	Coefficient de Variation
CCV	Coût sur le Cycle de Vie
DIVINE	Dynamic Interaction between Vehicles and Infrastructure Experiment – *Essai sur l'interaction dynamique entre véhicules et infrastructure*
DSP	Densité Spectrale de Puissance
EAVG	Essai Accéléré en Vraie Grandeur
ESA(L)	Equivalent Standard Axle (Load) – *(Chargement par un) essieu standard équivalent*
IRI	International Roughness Index – *Indice d'uni international*
IWP	Inner Wheel Path (Air spring suspension for Element 1 APT)
FHWA	Federal Highway Administration *(*Etats-Unis*)*
FWD	Falling Weight Deflectometer – *Déflectomètre à boulet*
LCC	Life Cycle Costing – *Coût sur la durée de vie*
LROP	Laboratoire Régional de l'Ouest Parisien
LTPP	Long Term Pavement Performance – *Comportement des chaussées à long terme*
MESAL	Million Equivalent Standard Axle Loads - Million de chargements par un essieu standard équivalent
MMPP	Mathematical Model of Pavement Performance – *Modèle mathématique de la performance de la chaussée*
NCHPP	US National Co-operative Highway Research Program
NRC	National Research Council (Canada)
OWP	Outer Wheel Path (Steel leaf spring suspension for Element 1 APT)
PMS	Pavement Management Systems
PSI	Present Serviceability Index – *Notation des chaussées*
PSR	Present Serviceability Rating –*Indicateur d'état de service des chaussées*
RCI	Riding Comfort Index – *Indice de confort de conduite*
RMS	Root Mean Square – *Ecart quadratique moyen*
RRL	Road Research Laboratory (Royaume-Uni, maintenant devenu TRL)
RTR	Programme de recherche en matière de transports routiers et liaisons intermodales de l'OCDE

TCD	Tolérance de chargement dynamique (DLA – Dynamic Load Allowance)
TRL	Transport Research Laboratory (Royaume-Uni)
VAN	Valeur Actuelle Nette
VESYS	Viscoelastic Structural Subsystem – *Sous-système structurel viscoélastique*
VTT	Centre de recherche technique (Finland)
(MS-)WIM	(Multiple-sensor) Weigh-in-motion – *Pesage en marche (à capteurs multiples)*
WLPPM	Whole Life Pavement Performance Model – *Modèle de performance de chaussée sur sa "vie entière"*

ANNEXE D
LISTE DES PARTICIPANTS

Comité Exécutif
Président : M. Jørgen Christensen (Danemark)

Danemark	M. J. Christensen
Etats-Unis	M. R. Betsold
France	M. J.-F. Coste
Pays-Bas	Dr. C. van Theylingen M. P. Mazure (Retraité)
Royaume-Uni	M. G. Bowskill

Groupe d'experts scientifiques
Président : Dr. Peter Sweatman (Australie)

Allemagne	Dr.-Ing. W. D. Hahn M. M. Stanzel
Australie	Dr. R. J. Heywood M. K. Sharp Dr. P. Sweatman
Autriche	M. G. Fichtl Dr. J. Litzka M. H. Tieffenbacher
Belgique	M. A. De Henau
Canada	M. J. Woodrooffe
Danemark	M. E. Larsen
Etats-Unis	M. W. J. Kenis Dr. W. Wang

Finlande	M. M. Huhtala
France	M. B. Jacob
Hongrie	M. C. Koren M. L. Palkovics Dipl.-Ing. S. Tombor
Japon	M. T. Ikeda Dr. T. Maruyama
Nouvelle-Zélande	Dr. J. de Pont Dr. B. D. Pidwerbesky
Pays-Bas	M. R. J. Henny M. B. Hoogvelt
Royaume-Uni	M. R. Addis Dr. C. Mitchell
Suède	M. J. Aurell M. G. Magnusson
Suisse	Dr. R. Cantieni M. A.-G. Dumont Dr. W. Krebs
OCDE	Mme V. Feypell-de la Beaumelle M. B. Ficheroulle Mlle M.-D. Gorrigan M. P. Hasson M. B. Horn M. W. Hübner M. C. Levins M. A. Ockwell

Chercheurs additionnels

Australie	Dr. P. S. Baburamani M. G. Jameson M. J. R. Johnson-Clarke M. S. McFarlane M. M. Moffatt M. D. Swenson M. N. J. Vertessy M. R. Yeo

Canada	M. E. Feser M. P. Leblanc M. S. McLoud Dr. N. Mrad M. Y. Séguin M. R. Senn
Etats-Unis	M. D. George M. J. Hammouda Mlle P. Minkle
Finlande	M. R. Alkio M. P. Halonen M. V. Miettinen M. J. Pihlajamaki
France	M. O. Brunet M. V. Dolcemascolo M. P. Faucheur M. T. O'Connor
Nouvelle-Zélande	M. J. Devine M. A. Fussell M. B. Steven
Pays-Bas	M. P. Ruijs
République Tchèque	M. V. Bily
Royaume-Uni	M. I. Barbour M. L. Gyenes M. J. Hanley M. D. Jacklin Mme P. Lewis
Suisse	Mlle S. Barella Dr. A. J. Felber

Les chefs de projet étaient M. Addis et M. Mitchell. Les Membres du Comité de Rédaction étaient : M. Addis, M. Kenis, M. Sharp, M. Sweatman et M. Woodrooffe. Le rapport final a été préparé par le Secrétariat de l'OCDE.

La traduction de la version française a été révisée par MM. Bonnot et Jacob du LCPC.