

© DR

Le projet DVDC (durée de vie des chaussées) est un projet national, qui vise à développer des méthodes de qualification de l'état et de la durée de vie des chaussées et à améliorer la planification et le dimensionnement des travaux d'entretien. Ce projet démarre au premier trimestre 2016, pour une durée de 4 ans.

AUSCULTATION DES CHAUSSÉES PROJET NATIONAL DVDC

AUTEURS

Pierre Hornych
Chef du laboratoire
Auscultation, modélisation,
expérimentation
des infrastructures
de transport (LAMES)
Ifsttar

Luc-Amaury George
Directeur technique
Chaussées
Vectra

Sébastien Wasner
Chef du service Auscultation
et Politique d'entretien
des infrastructures
Cerema

Jean-Michel Simonin
Ingénieur chercheur
Développement
de méthodes et matériels
d'auscultation
Ifsttar

Initié par l'Usirf (Union des syndicats de l'industrie routière française), le projet DVDC vise à rassembler une quarantaine de partenaires du domaine routier : maîtres d'ouvrage, entreprises routières, industries du secteur, bureaux d'étude, laboratoires de recherche publics, équipes universitaires. Il est soutenu par la DGITM (direction générale des Infrastructures, des Transports et de la Mer) du ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie, et est administré par l'IREX (Institut pour la recherche appliquée et l'expérimentation en génie civil). Le projet comporte 3 grands thèmes de recherche :

- la compréhension des mécanismes de dégradation des chaussées : fatigue, fissuration, détérioration des interfaces, vieillissement des matériaux, effets du gel ;
- l'amélioration des méthodes d'auscultation des réseaux routiers ;
- le développement de nouveaux modèles de calcul pour modéliser le comportement des chaussées dégradées, prévoir leur durée de vie et dimensionner leur renforcement.

Cet article présente les travaux prévus dans le projet DVDC en matière d'auscultation. Ils visent à

développer et à évaluer de nouvelles méthodes d'auscultation non destructives (radar, propagation d'ondes), à améliorer l'utilisation de certaines méthodes existantes (déflexion, relevé automatisé de la fissuration, mesure d'uni), notamment pour les adapter en fonction des réseaux concernés.

DÉFINITIONS ET CADRE DU PROJET

Les méthodes d'auscultation des réseaux routiers et l'interprétation des données d'auscultation pour définir des indicateurs pertinents constituent les principaux sujets du projet DVDC. Les méthodes d'auscultation sont nécessaires à la fois pour connaître l'état d'un réseau, en assurer une meilleure gestion préventive et, à l'échelle d'une section de chaussée, réaliser des diagnostics plus fins, évaluer sa durée de vie ou définir les besoins d'entretien ou de réhabilitation. Si la connaissance du réseau routier national (RRN) a été abordée par l'IQRN (Image qualité du réseau routier national)¹ il y a 20 ans, la démarche reste insuffisante pour caractériser l'état structurel d'une

chaussée. Plus récemment, l'IQRA (Images qualité du réseau autoroutier), sur le réseau autoroutier concédé, est venu compléter le dispositif.

Pour les réseaux secondaires (départementaux ou communaux), notamment les moins circulés, les besoins en termes de méthodes d'auscultation et de suivi des réseaux peuvent être différents de ceux des réseaux routiers à fort trafic. Ils nécessitent un suivi adapté, fondé sur des méthodes d'auscultation et de relevé parfois simplifiées et moins coûteuses. Aujourd'hui, les pratiques et les besoins sont différents d'un maître d'ouvrage à l'autre.

Les méthodes d'auscultation et les appareils de mesure ont par ailleurs évolué au cours des dernières années, en particulier grâce à des progrès importants en matière de capteurs, de méthodes de mesure et de traitement informatique des résultats. Il est donc important de :

- réaliser un état de l'art et une évaluation des nouvelles méthodes d'auscultation qui semblent prometteuses (photo 1) ;
- faire évoluer la doctrine, en matière de procédures d'auscultation et d'analyse des résultats de mesures ;
- définir de nouveaux indices de surface et de structure pour qualifier l'état des réseaux, afin de répondre aux besoins des gestionnaires (évaluation des durées de vie, définition des priorités de travaux).

Dans le projet DVDC, il a été décidé de travailler sur plusieurs types de méthodes d'auscultation, qui apparaissent comme prioritaires pour évaluer l'état structurel des chaussées :

- les relevés des dégradations visibles en surface ;
- l'amélioration de l'interprétation des mesures de déflexion (analyse des bassins de déflexion complets, utilisation de nouveaux appareils) ;
- l'amélioration de l'utilisation et de l'exploitation des mesures radar, notamment pour la détection de décollements d'interfaces ou d'autres défauts internes des chaussées ;
- l'utilisation d'autres méthodes non destructives pour l'évaluation de l'état structurel et la détection de dégradations internes des chaussées.

Il convient de noter que les travaux menés dans le cadre du projet DVDC ne s'intéresseront pas à l'évaluation de caractéristiques de surfaces telles que la macrotexture, l'adhérence ou le bruit.

Enfin, la définition d'indices structurels pertinents, adaptés à chaque type de réseau, et la proposition de méthodes pour le suivi de leur évolution constituent l'aboutissement de cette partie du projet.

Pour parvenir à ces objectifs, le projet a été organisé autour de trois sujets :

- les retours d'expériences sur la connaissance de l'état du réseau ;
- les méthodes de mesure et d'auscultation *in situ* ;
- les indices structurels.

RETOURS D'EXPÉRIENCES SUR LA CONNAISSANCE DE L'ÉTAT DU RÉSEAU

OBJECTIF ET PARTENAIRES

L'objectif de cette première partie du projet est de bien définir les besoins des maîtres d'ouvrage et des concessionnaires en matière d'auscultation et de suivi, pour les différents types de réseaux, en prenant comme point de départ les pratiques actuelles.

Cette investigation pourra être menée en s'appuyant sur les documents existants (pour le RRN, la méthode d'évaluation IQRN²), les travaux et réflexions en cours (telles que l'étude GEPUR³ (gestion et entretien du patrimoine urbain et routier)) et une enquête auprès des gestionnaires (par le biais notamment des CoTITA (conférences techniques interdépartementales des transports et de l'aménagement)).

Cette enquête contribuera à :

- mieux connaître les besoins des donneurs d'ordre en matière d'auscultation et de suivi, en distinguant l'urbain de l'interurbain, les types d'infrastructures et les niveaux de service visés (suivant l'importance de la voie) ;
- réaliser un retour d'expériences sur l'auscultation de différents réseaux, ou différentes sections de chaussées, afin d'évaluer les possibilités et les limites des moyens d'auscultation existants, et d'orienter les travaux de recherche et d'optimisation de ces outils.

-Photo 1-
Nouveaux capteurs
pour nouvelles méthodes
d'auscultation : le SYMAN
de Vectra.





© PHOTOGRAPH COURTESY OF FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION

–Photo 2–
Matériels de mesure de déflexion. De gauche à droite : Traffic Speed Deflectometer (TSD), curviamètre, et Rolling Wheel Deflectometer (RWD).

PROGRAMME DE TRAVAIL

Il conviendra ensuite de sélectionner, avec les maîtres d'ouvrage participant au projet, plusieurs types de réseaux sur lesquels des investigations détaillées seront réalisées, en couplant des auscultations en surface (en comparant éventuellement plusieurs méthodes) et l'observation des matériaux après carottage.

Ces investigations viseront à établir un diagnostic complet comprenant le relevé de dégradation, les caractéristiques structurelles et les caractéristiques de surface afin de :

- définir les programmes d'auscultation (type de mesures, fréquence, phasage...) les mieux adaptés à différents types de réseaux, en intégrant les facteurs coût et rentabilité des études menées ;
- constituer une base de données de mesures, qui servira de base pour la construction d'indicateurs de l'état des réseaux.

L'étude se fera sur plusieurs types de réseaux, urbains et interurbains, pour des catégories de voies correspondant à des niveaux de service différents. Certains départements, comme l'Eure, l'Oise et le Puy-de-Dôme par exemple, se sont d'ores et déjà proposés pour fournir des données.

MÉTHODES DE MESURE ET D'AUSCULTATION IN SITU

OBJECTIFS ET PARTENAIRES

Cette deuxième partie du projet vise à travailler sur la mise au point et l'amélioration de différentes méthodes d'auscultation, qui semblent les plus pertinentes pour l'évaluation de l'état structurel des chaussées. Le travail proposé portera sur :

- L'amélioration des méthodes existantes les plus utilisées : les relevés des dégradations de surface et les mesures de déflexion. L'évolution des techniques de relevé de ces dégradations et des outils de traitement des données nécessitent de les modifier.
- La mise au point et l'évaluation d'autres méthodes non destructives pour la détection de défauts structurels, tels que des décollements ou des fissures internes.
- La recherche de solutions alternatives d'auscultation, adaptées notamment aux réseaux secondaires, s'appuyant sur l'utilisation de véhicules traceurs.

Il s'agit d'évaluer l'état d'un réseau en utilisant non plus des véhicules d'auscultation dédiés, mais des véhicules traceurs (flotte d'une entreprise, d'un service technique de département...), équipés de capteurs d'un coût relativement limité, qui, lors de leurs déplacements, fournissent des mesures sur l'état du réseau parcouru.

RELEVÉS DE DÉGRADATIONS

Les relevés de dégradations sont actuellement réalisés conformément à la méthode d'essai LPC n° 38-2 « Relevé des dégradations de surface des chaussées »⁴, rédigée en 1997, qui fait la distinction entre 7 modes opératoires en fonction de l'objectif du relevé : étude de renforcement, programmation de travaux, évaluation de réseau...

Cette dernière doit être actualisée au regard de l'évolution des méthodes de relevé des dégradations (notamment les méthodes automatiques de relevé par capteurs laser), mais aussi des outils de mesure des déformations transversales. Cette actualisation s'attachera à définir des indicateurs plus en adéquation avec les modes d'endommagement des chaussées observés en France au cours des dernières années, à redéfinir les exigences en matière de répétabilité et de reproductibilité des relevés, et à actualiser les différents modes opératoires au regard des besoins des maîtres d'ouvrage, préalablement définis.

Par ailleurs, les méthodes plus performantes, automatiques, de relevé des dégradations permettent de réaliser des analyses plus fines de la fissuration (largeur des fissures, orientation...) et de la texture des revêtements (arrachements notamment), et ainsi de mieux caractériser l'état de dégradation de la chaussée et ses défauts structurels. Dans ce contexte, l'Ifsttar développe et teste depuis plusieurs années, en partenariat avec le Cerema, des méthodes automatiques de détection de la fissuration à partir d'images numériques. Elles seront utilisées, en liaison avec les outils de relevé de dégradations, pour le calcul d'une segmentation automatique des fissures et l'estimation de caractéristiques de la fissuration (épaisseur, orientation). À partir de ces mesures, des indicateurs de l'état de fissuration seront proposés et comparés aux indicateurs de dégradations de la méthode LPC n° 38-2. Une recherche d'autres indicateurs que ceux basés sur la fissuration sera également engagée.

DÉFLEXIONS

Sur ce sujet, le projet DVDC a pour objectif de travailler sur l'amélioration des mesures de déflexion, en analysant des bassins de déflexion complets. Cela devrait contribuer à définir des indicateurs plus sensibles à l'état de dommage de la chaussée que la déflexion maximale et le rayon de courbure, notamment sur des réseaux structurants où le niveau de déflexion maximale est faible. Différentes méthodes de mesure seront étudiées :

- les méthodes de mesure à grand rendement (déflectographe, curviamètre) ;
- le FWD (*Falling Weight Deflectometer*), destiné à des mesures plus ponctuelles ;
- les nouveaux appareils de mesure de déflexion à grande vitesse, tels que le TSD (*Traffic Speed Deflectometer*, **photo 2**), dont l'usage se développe. Le projet suivra les travaux réalisés à l'étranger avec cet appareil et permettra de réfléchir à la possibilité de les appliquer au contexte français.

Mesures au déflectographe et au curviamètre

Aujourd'hui, en France, les mesures de déflexion à grand rendement sont réalisées avec le déflectographe ou le curviamètre (**photo 3**). Ces équipements relèvent, tous les 5 m, le bassin de déflexion de la chaussée sous un essieu de 13 t. Actuellement, l'exploitation de ces mesures se limite en général au calcul de la déflexion maximale et, éventuellement, du rayon de courbure. Ces paramètres donnent une idée globale de la rigidité de la structure, mais ne permettent pas un calcul inverse précis des caractéristiques des différentes couches de chaussée, ni une évaluation de leur état d'endommagement.

Les travaux proposés devront contribuer à améliorer l'interprétation des mesures fournies par ces appareils, en travaillant sur l'exploitation des bassins de déflexion complets, à l'échelle d'un itinéraire. Ils seront réalisés en plusieurs étapes :

- Modélisation de la réponse des différents appareils de mesure de déflexion (déflectographe Lacroix, FLASH, curviamètre...) dans différentes conditions de mesure. Ces études viseront notamment à modéliser l'influence des défauts (fissure, décollement) et des conditions expérimentales de mesure (températures en particulier) sur le bassin de déflexion. Elles définiront, à partir des bassins, des indicateurs permettant d'identifier différents types de dégradation des chaussées (décollement d'interfaces, présence de fissures).
- Développement de méthodes de traitement statistique des bassins de déflexion, à l'échelle d'un itinéraire. Ces travaux viseront à classer l'ensemble des mesures de déflexion obtenues en différentes catégories, afin d'aboutir à un découpage en zones structurellement homogènes de cet itinéraire.
- Optimisation des procédures de calcul inverse sur ces typologies de bassin de déflexion pour obtenir les caractéristiques mécaniques des couches et identifier des défauts tels que les décollements.



© BRHC

Les calculs inverses pourront ensuite être utilisés pour réaliser des modélisations des sections de chaussée étudiées, afin de déterminer leur durée de vie résiduelle ou de définir des solutions de travaux à mettre en œuvre.

-Photo 3-

Le curviamètre, appareil de mesure de déflexion à grand rendement, équipé d'une antenne radar à l'avant de l'appareil.

Essais au FWD

Le FWD est largement utilisé pour des analyses fines, à l'échelle d'un projet routier (**photo 4**). Il existe une grande quantité de travaux (en France et surtout à l'étranger) sur l'analyse inverse et la modélisation des mesures au FWD pour le calcul des propriétés des couches de chaussée ou l'établissement de différents indicateurs de performance structurelle. Ces travaux apparaissent en partie transposables aux analyses envisagées des bassins de déflexion mesurés par le curviamètre et le déflectographe.

Le projet DVDC propose donc d'établir une bibliographie détaillée sur ces méthodes de traitement des mesures au FWD pour en dégager ce qui peut être appliqué aux mesures des appareils à grand rendement. Le domaine d'application du FWD, en complément des méthodes à grand rendement, sera également mieux défini.

RADAR

La mesure radar est aujourd'hui largement utilisée dans le domaine des chaussées pour détecter avec une bonne fiabilité les différentes natures de couches (bitumineuses, traitées aux liants hydrauliques, non traitées) et leurs interfaces, les variations d'épaisseurs de ces couches et leurs épaisseurs globales (supérieures à 4 cm), ainsi que la présence de canalisations ou de différents équipements dans la chaussée (voir article p. 30).

Plusieurs points d'amélioration de ces méthodes ont été identifiés :

- L'interprétation des données de caractérisation des interfaces (décollements).
- La caractérisation des couches de surface (couches minces) : il s'agira en particulier de diminuer l'épaisseur des couches détectables et d'améliorer la distinction des couches de même nature (enrobé/enrobé).



© COMMISSION EUROPÉENNE

–Photo 4–
Le FWD est utilisé pour évaluer les propriétés mécaniques des couches de matériaux, en simulant les charges appliquées par les véhicules lourds en vue de déterminer la capacité structurale des chaussées.

- La rapidité d'exploitation et d'interprétation : aujourd'hui, la mesure radar génère une grande quantité d'informations dont l'exploitation nécessite un temps important et une technicité pointue. Ces deux points doivent être améliorés afin de faciliter le recours à la mesure radar.

AUTRES MÉTHODES D'AUSCULTATION PAR PROPAGATION D'ONDES

Les développements technologiques en matière de mesure mettent aujourd'hui à disposition des capteurs ou des appareils qui utilisent des techniques de propagation d'ondes dans le domaine des chaussées. Il est nécessaire de reprendre les principes physiques des différentes méthodes pour définir leur potentiel d'application à l'auscultation des chaussées. Ceci passe par exemple par l'évaluation du principe des nouveaux matériels développés, puis du matériel lui-même pour une adaptation au contexte (matériel impact écho, auscultation par écho d'ondes ultrasonores (*Ultrasonic Pulse Echo* (UPE)), système SASW...).

Les travaux porteront notamment sur les applications de l'UPE. L'Ifsttar a acquis en 2007 un système de mesure par ultrasons, fondé sur le principe de la propagation d'ondes mécaniques en cisaillement. Un module complémentaire utilisant cette fois des ondes de compression a été acquis en 2014. Les travaux consisteront à exploiter conjointement les mesures de cisaillement et de compression de l'UPE pour améliorer la détection et la caractérisation des interfaces de chaussées, mais aussi la caractérisation du matériau (module, coefficient de poisson) à la fréquence d'auscultation. Actuellement, le système de mesure est manuel, mais il pourrait être automatisé, si la mesure est pertinente.

Les évaluations de ces méthodes de mesure pourront être réalisées sur le manège de fatigue de l'Ifsttar à Nantes en faisant varier les conditions de mesure (température, humidité) et sur une ou plusieurs sections de chaussées étudiées dans le projet. Quelques résultats préliminaires sont présentés dans l'article « Nouvelles méthodes non destructives » page 26.

AUSCULTATION PAR VÉHICULES TRACEURS

L'objectif de cette partie du projet DVDC est de travailler sur une méthode d'auscultation s'appuyant sur l'utilisation de véhicules traceurs (flotte de véhicules d'un gestionnaire, par exemple), équipés de capteurs, qui collectent des informations sur l'état du réseau. Ces données doivent être transmises à un serveur, puis agrégées dans une base de données, afin de restituer les informations au gestionnaire. Des travaux préliminaires réalisés au sein de l'Ifsttar ont validé expérimentalement la faisabilité de cette méthode d'auscultation innovante pour la mesure de l'uni longitudinal des chaussées⁵ (figure 1). Les mesures ont été réalisées par le biais des capteurs d'un smartphone (accéléromètre, GPS). Le système a été testé sur la base d'un nombre limité de véhicules traceurs sur une partie d'un réseau départemental. D'autres fonctions d'auscultation (géométrie des infrastructures, détection de nids-de-poule...) pourront être étudiées au moyen de véhicules traceurs.

GESTION DES DONNÉES ET HISTORIQUE DES INTERVENTIONS

L'arrivée de nouveaux matériels d'auscultation à grand rendement (déflexions, imagerie laser appliquée à la fissuration ou aux défauts de surface) ainsi que les méthodes d'auscultation par véhicules traceurs vont générer des téraoctets de données, qu'il faudra structurer, analyser, exploiter et conserver. Ceci pose le problème de l'utilisation des données, de la transition avec les méthodes et indicateurs actuels, des adaptations à faire tant sur l'interprétation des résultats que sur leur utilisation, y compris dans les systèmes de décision automatisée. À l'échelle du réseau, une grande quantité de données devront être stockées et analysées, sauf si elles sont traitées en temps réel, mais, dans ce cas, les données conservées risquent de ne pas être suffisantes pour revenir à l'échelle locale.

Enfin, à ces questions de traitement des données s'ajoutent les problématiques de la qualité et de la précision de mesure de ces nouveaux appareils et de la qualification des appareils et des opérateurs.

INDICES DE SURFACE ET STRUCTURELS

Pour évaluer l'état d'un réseau routier, il convient de travailler à l'échelle des indicateurs élémentaires, quantifiant un phénomène physique, ainsi que sur leur évolution en fonction de différentes variables explicatives (durée, trafic, cycles climatiques...). De nombreux travaux ont été réalisés dans ce domaine. Il reste toutefois à définir des indices structurels, plus globaux, adaptés aux besoins des gestionnaires, pour une gestion optimisée de leur réseau routier et un suivi dans le temps. Par ailleurs, si différentes méthodes existent, notamment la méthodologie

IQRN largement déployée sur le territoire, aucun indice « standard » permettant une comparaison de l'état de différents réseaux routiers n'a été défini. Une comparaison des indices structurels existants sera réalisée. Ce travail s'appuiera sur les résultats des projets internationaux tels que les actions COST 325⁶ et 354⁷, les projets FORMAT (*Fully Optimised Road Maintenance* (2002-2005)) et TRIMM (*Tomorrow's Road Infrastructure Monitoring & Management* (2011-2014)), les comités AIPCR..., ainsi que sur les retours d'expériences de la direction Chaussées et Patrimoine et des partenaires du projet. Il considérera donc de nombreux projets sur différents types de réseaux (projets autoroutiers, concessions, projets sur routes départementales, routes non revêtues, réseau de routes nationales à l'échelle d'un pays).

À partir des méthodes d'auscultation utilisées en France ou à l'étranger, une définition d'indices adaptés aux différents réseaux sera recherchée. Ces nouveaux indices s'appuieront notamment sur les pratiques existantes, la révision des méthodes de relevé de dégradations et les résultats des enquêtes visant à définir les besoins des maîtres d'ouvrage. Parallèlement, afin de permettre aux différents gestionnaires de comparer l'état de leur réseau routier, une définition d'indices « standards » sera recherchée. Ces indices devront porter sur le niveau de service offert par l'infrastructure (indice de surface), mais aussi sur sa valeur patrimoniale (indice structurel). L'objectif à atteindre est de définir des indices simples d'utilisation (données d'entrée, mode de calcul, exploitation) qui pourront aisément être déterminés en plus des indices propres à chaque gestionnaire.

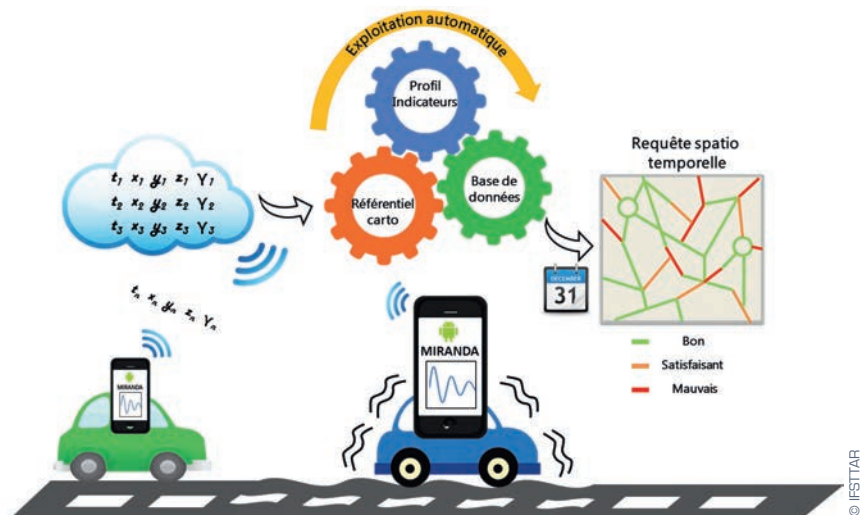
Sur ce sujet, le rapport COST 354 fournit des informations très intéressantes dont les principaux résultats sont l'élaboration d'indicateurs de performance pour des revêtements de chaussées en prenant en compte les besoins des usagers de la route et les attentes des gestionnaires routiers.

Les indicateurs (*Performance Index* (PI)) sont définis pour différents types de structures de chaussée et catégories de routes. Dans un premier temps, ils décrivent une seule caractéristique de l'état des chaussées (uni longitudinal, uni transversal, macrotecture, adhérence, capacité portante, fissuration, bruit, pollution de l'air). Ensuite, ils sont regroupés afin d'obtenir une note globale ou indice dans trois domaines :

- fonctionnel (sécurité et confort) ;
- structurel ;
- environnemental (bruit et pollution de l'air).

In fine, un indice global est élaboré pour décrire l'état général de la chaussée. Il peut être utilisé pour la gestion de la section ou du réseau routier.

Si les indicateurs fonctionnels liés à la sécurité et au confort sont généralement similaires dans le choix des critères retenus, quelle que soit la méthode de



© IFSTTAR

relevé choisie, il n'en est pas de même avec l'indice structurel, pour lequel il existe une grande variété d'approches : relevés de dégradations, prise en compte de la déformabilité de la chaussée, épaisseur équivalente. ...

CONCLUSION

Les méthodes développées répondront à des enjeux économiques clairement établis au cours du projet. D'après l'Iddrim, la valeur patrimoniale à neuf des différents réseaux est estimée en France à plus de 2 000 milliards d'euros. Compte tenu de son importance stratégique et de son rôle pour la compétitivité de l'économie du pays, ce patrimoine doit être entretenu et modernisé. Des niveaux de service, fonction du type et de la hiérarchie de l'itinéraire, doivent être fixés. Aujourd'hui, il n'existe pas de cadre méthodologique défini, et les informations disponibles sont parcellaires et manquent d'homogénéité.

Le thème « auscultation des chaussées » du projet DVDC a pour objectif de faire évoluer les pratiques de manière consensuelle pour une meilleure gestion du patrimoine routier. ■

RÉFÉRENCES

1. Ph. Lepert et al., « Images qualité du réseau routier national », Note d'information n° 110, Sétra, juillet 2000.
2. H. Samri, G. Poirier, S. Wasner, O. Astorgue, « Réseau routier national – La méthode d'évaluation image qualité du réseau national (IQRN) », RGRA n° 878, septembre 2009, p. 26.
3. H. Mangnan, H. Odéon, « GEPUR : démarche originale et méthode collective », RGRA n° 922, août-septembre 2014, p. 37.
4. Ministère de l'Équipement, du Logement, des Transports et du Tourisme, « Relevé de dégradations de surface des chaussées », Méthode d'essai LPC n° 38 version 2, LCPC, mai 1997 ; Ministère de l'Équipement, du Logement et des Transports, Méthode d'essai n° 52 (complément à 38-2), *Catalogue des dégradations de chaussées*, LCPC, mars 1998.
5. J.-M. Martin, F. Menant, D. Meignen, X. Phelippeau, E. Michaud, S. Chauveau, D. Bétaille, M. Ortiz, « Évaluation du réseau secondaire par l'utilisation de véhicules traceurs - L'application Miranda », RGRA n° 929, juillet-août 2015, p. 26.
6. Action COST 325 (1992-1996) : *New pavement monitoring equipment and methods* http://www.cost.eu/COST_Actions/tud/325.
7. Action COST 354 (2004-2008) : *The way forward for pavement performance indicators across Europe – Final Report*, European cooperation in science and technology (COST), 2008, http://www.cost.eu/COST_Actions/tud/354.
8. L.-A. George pour le groupe Chaussées de l'ASFA, « Les indicateurs mis au point par l'ASFA », Journées techniques routes du LCPC, 2008.
9. Ph. Lepert, R. Guillemin, L. Bertrand, D. Renault, « An evaluation of the French national highway network based on surface damage surveys », 3rd International Conference on Managing Pavements, May 21-26 1994, San Antonio, États-Unis.