



MESURES VISANT A AMELIORER LA RESILIENCE DES CHAUSSEES UN RAPPORT TECHNIQUE DE PIARC

COMITÉ TECHNIQUE 4.1 CHAUSSEES

À PROPOS DE PIARC

L'Association mondiale de la Route (PIARC) est une organisation sans but lucratif, fondée en 1909 pour améliorer la coopération internationale et pour encourager les avancées en matière de routes et de transport routier.

L'étude, objet du présent rapport, a été définie dans le [Plan stratégique PIARC 2020-2023](#) approuvé par le Conseil de l'Association mondiale de la Route dont les membres représentent les gouvernements des pays qui en font partie. Les membres du Comité technique chargés de ce rapport ont été choisis par les gouvernements de ces pays pour leurs compétences particulières.

Les opinions, constatations, conclusions et recommandations exprimées dans cette publication sont celles des auteurs et ne reflètent pas nécessairement les vues des organisations ou organismes auxquels ils appartiennent.

Ce rapport est [disponible](http://www.piarc.org) sur le site de l'Association mondiale de la Route (PIARC) : <http://www.piarc.org>

Copyright par l'Association mondiale de la Route. Tous droits réservés.

*Association mondiale de la route (PIARC)
Arche Sud 5° niveau
92055 La Défense cedex, France*

Numéro international normalisé du livre : 978-2-84060-816-5

Couverture © Jostein Aksnes (Administration norvégienne des routes publiques)

MESURES VISANT A AMELIORER LA RESILIENCE DES CHAUSSEES

UN RAPPORT TECHNIQUE DU PIARC

COMITÉ TECHNIQUE 4.1 *CHAUSSEES*

AUTEURS/ REMERCIEMENTS

Ce rapport a été préparé par le comité technique 4.1 *Chaussées de l'Association mondiale de la route (PIARC)*.

Les rédacteurs en chef de ce rapport sont :

- Margo BRIESSINCK (Belgique)
- Leila HASHEMIAN (Canada)

Les personnes qui ont contribué à la préparation de ce rapport sont les suivantes :

- Gina AHLSTROM (USA)
- Joralf AURSTAD (Norvège)
- Zsolt BOROS (Slovaquie)
- Margo BRIESSINCK (Belgique)
- Simona FONTUL (Portugal)
- Mario JAIR (Argentine)
- Venkat LAKKAVALLI (Canada)
- Łukasz NICZKE (Pologne)
- Sébastien PIETTE (Canada)
- Luc RENS (Belgique)
- Mohamed SALEH (Canada)
- Auckpath SAWANGSURIYA (Thaïlande)
- Thierry SEDRAN (France)
- Pahirangan SIVAPATHAM (Allemagne)

La révision linguistique de la version originale anglaise a été effectuée par Leila HASHEMIAN (Canada). La traduction en français de la version originale a été réalisée par Pierre HONTOY (Belgique). La traduction en espagnol de la version originale a été réalisée par Paul GARNICA (Mexique). Gina AHLSTROM (États-Unis), Simona FONTUL (Portugal) et Caroline EVANS (Australie, présidente du CT 1.4) ont été chargées du contrôle de la qualité lors de la préparation de ce rapport.

Le comité technique était présidé par Margo BRIESSINCK (Belgique). Gina AHLSTROM (USA), Aïda BERGAOUI SRIHA (Tunisie), et José DEL CERRO GRAU (Espagne) étaient respectivement les secrétaires anglophone, francophone et hispanophone.



RÉSUMÉ EXÉCUTIF

2023R20FR

MESURES VISANT À AMÉLIORER LA RÉSILIENCE DES CHAUSSEES

UN RAPPORT TECHNIQUE DE PIARC

Ce rapport traite de la résilience des chaussées au regard de divers problèmes de vulnérabilité résultant de perturbations ou de dangers liés au changement climatique, à la circulation automobile et aux catastrophes naturelles ou d'origine humaine. Dans le cadre de ce rapport, la résilience est abordée d'un point de vue ascendant ou au niveau de l'objet.

Les impacts possibles des trois catégories d'agents agressifs des chaussées mentionnées ci-dessus - changement climatique, trafic automobile et catastrophes naturelles ou causées par l'homme - sont décrits. Plusieurs mesures visant à accroître la résilience des chaussées face à ces impacts sont envisagées dans ce rapport. Bien qu'une mesure donnée puisse être une solution utile pour atténuer les effets négatifs multiples de ces facteurs d'agression, les mesures sont décrites séparément pour chaque domaine d'application. Les mesures visant à accroître la résilience sont regroupées par type de chaussée : chaussées en asphalte, chaussées en béton et couches de base.

Ces mesures peuvent être appliquées pendant la phase de conception d'une chaussée en utilisant des matériaux innovants, ou en utilisant une méthode de conception adaptée, prenant en compte des paramètres plus extrêmes tels que l'augmentation des températures et des charges de trafic plus agressives.

CONTENU

1. INTRODUCTION	4
2. MÉTHODOLOGIE	6
3. UN APERÇU DES SOURCES D'AGRESSION POUR LES CHAUSSÉES	7
3.1. FACTEURS D'AGRESSION DES CHAUSSÉES INDUITS PAR LE CHANGEMENT CLIMATIQUE.....	7
3.2. FACTEURS D'AGRESSION DES CHAUSSÉES INDUITS PAR LE TRAFIC AUTOMOBILE..	8
3.3. FACTEUR D'AGRESSION POUR LES CHAUSSÉES INDUIT PAR LES CATASTROPHES NATURELLES ET D'ORIGINE HUMAINE	10
4. FACTEURS D'AGRESSION DES CHAUSSÉES INDUITS PAR LE CHANGEMENT CLIMATIQUE ET MESURES POSSIBLES	13
4.1. AUGMENTATION DE LA TEMPÉRATURE	13
4.2. EXPOSITION ACCRUE À L'EAU.....	13
4.3. CHANGEMENTS DANS LES SCHÉMAS DE GEL ET DE DÉGEL.....	14
4.4. PÉRIODES DE SÉCHERESSE PLUS LONGUES.....	14
5. FACTEURS D'AGRESSION DES CHAUSSÉES INDUITS PAR LE TRAFIC AUTOMOBILE ET MESURES POSSIBLES	15
5.1. AUGMENTATION DU TRAFIC LOURD	15
5.2. AUGMENTATION DE LA CHARGE DES VÉHICULES OU DES ESSIEUX	15
6. FACTEURS D'AGRESSION DES CHAUSSÉES INDUITS PAR LES CATASTROPHES NATURELLES ET HUMAINES ET MESURES POSSIBLES	16
6.1. INCENDIE DE FORÊT.....	16
6.2. GLISSEMENTS DE TERRAIN.....	16
6.3. ACTIVITÉ VOLCANIQUE ET TREMBLEMENTS DE TERRE.....	16
6.4. AVALANCHES	16
6.5. CONFLIT ARMÉ.....	16
7. APERÇU DES MESURES	18
7.1. MESURES POUR LES CHAUSSÉES EN ASPHALTE.....	18

7.2. MESURES POUR LES CHAUSSEES EN BÉTON.....	24
7.3. MESURES POUR LES COUCHES DE BASE	30
7.4. AUTRES MESURES	36
8. CONCLUSIONS	41
9. RECOMMANDATIONS	42
9.1. RECOMMANDATIONS POUR LES DÉCIDEURS	42
9.2. RECOMMANDATIONS POUR PIARC	42
10. GLOSSAIRE.....	43
11. RÉFÉRENCES	44

1. INTRODUCTION

Il existe de nombreuses définitions de la résilience. Une définition clé identifiée par le CT 1.4 "Changement climatique et résilience des réseaux routiers" est [1-1] :

La capacité d'un système, d'une communauté ou d'une société exposée à un événement dangereux, à une tendance ou à une perturbation, à résister, absorber, accommoder, s'adapter, transformer, apprendre et se remettre des effets induits en temps voulu et de manière efficace, tout en conservant sa fonction, son identité et sa structure essentielles.

Dans ce rapport, la résilience est abordée d'un point de vue ascendant ou au niveau de l'objet. Les innovations en matière de matériaux, de conception des chaussées et de méthodes de construction peuvent améliorer la résilience des chaussées face aux risques liés au changement climatique, à l'augmentation du trafic et à l'alourdissement des charges, ainsi qu'aux risques naturels et d'origine humaine. Dans ce rapport, la définition de la résilience se rapporte à l'identification des mesures et des matériaux permettant d'améliorer la résilience de l'infrastructure des éléments spécifiques de la route.

La figure 1-1 montre un exemple de "courbe de fonctionnalité" avec le "triangle de résilience" [1-2]. L'axe horizontal représente le temps et l'axe vertical la performance. Dans ce cas, l'impact de l'événement dangereux sur les performances de la chaussée est supposé être instantané, tandis que le rétablissement évolue linéairement. Le triangle de résilience est un indicateur de la perte de résilience de la chaussée : plus le triangle est petit, plus la chaussée est résiliente. En outre, une mesure introduite pour rendre une chaussée plus résiliente est considérée comme plus efficace si la perte de fonctionnalité est plus faible (par exemple, en appliquant une conception ou une construction plus robuste), si la période de récupération est plus courte, ou une combinaison des deux.

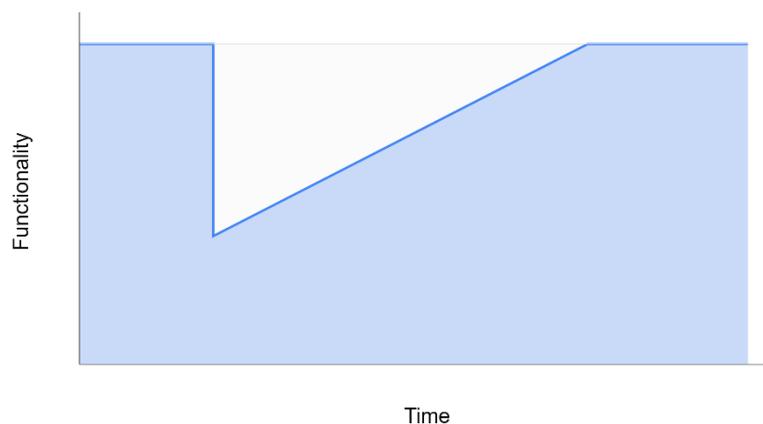


Figure 1-1 : courbe de fonctionnalité et perte de résilience

Ce rapport traite de la résilience des chaussées en mettant l'accent sur les différents problèmes de vulnérabilité résultant des perturbations ou des risques liés au changement climatique, à la circulation des véhicules et aux catastrophes naturelles. En outre, il propose des mesures d'adaptation fondées sur l'ingénierie à l'intention des décideurs et des praticiens de l'ingénierie.

Il convient de noter que le présent rapport ne porte que sur les mesures liées aux chaussées. Les solutions holistiques, telles que la plantation d'arbres pour réduire l'effet d'îlot de chaleur, la construction de barrages plus élevés pour se protéger contre l'élévation du niveau de la mer, etc. ne sont pas abordées. En outre, les mesures relatives aux réseaux - par exemple, les mesures liées à la redondance telles que l'ajout d'un itinéraire de déviation au réseau en cas d'inondation d'une route - ne sont pas abordées.

Le chapitre 3 traite des facteurs d'agression des chaussées suivants :

- le changement climatique,
- la circulation des véhicules,
- les catastrophes naturelles et d'origine humaine.

L'impact de ces facteurs d'agression et les mesures possibles sont examinés dans les chapitres 4 à 6.

Le chapitre 7 donne une brève description des mesures pour les chaussées en asphalte et en béton, des mesures pour les couches de base, ainsi que d'autres mesures plus générales.

2. MÉTHODOLOGIE

Ce rapport passe en revue les développements récents en matière d'adaptation des chaussées afin d'accroître leur résilience face au changement climatique, à la circulation automobile, aux catastrophes naturelles et aux facteurs de stress qui en résultent. Une recherche documentaire a été effectuée dans le contexte de l'ingénierie des chaussées en utilisant les mots-clés pertinents "résilience au changement climatique", "stratégies d'adaptation" et "mesures d'atténuation". La recherche documentaire s'est limitée à des documents fiables et à des bases de données bien établies, notamment Elsevier, ainsi qu'à des sites web d'agences telles que l'Administration fédérale des autoroutes des États-Unis. La recherche documentaire s'est concentrée sur les projets de recherche et les études avec des données et des hypothèses testées dans des articles de journaux évalués par des pairs et des rapports techniques officiels d'agences gouvernementales et fédérales et de départements des transports dans lesquels une mesure physique est recommandée. L'accent a également été mis sur les documents les plus récents, dont la date de publication se situe entre 2010 et 2023 (à quelques exceptions près, le cas échéant).

En complément de la recherche bibliographique, les membres du comité technique 4.1 de PIARC ont organisé une série de séances de réflexion sur les différents aspects de la résilience des chaussées. Cet exercice a permis de dresser une liste exhaustive des différents impacts sur les chaussées, en indiquant pour chaque entrée de la liste le phénomène en question, son impact, les mesures proposées et les approches.

Le CT 4.1 a également compilé un recueil d'études de cas [2-1] décrivant des mesures visant à améliorer la résilience des chaussées. Ces mesures sont fréquemment mentionnées dans le présent rapport.

Ce rapport jette les bases de futurs travaux élargissant le même champ d'application, ainsi que de travaux de recherche expérimentale et de modélisation axés sur des solutions d'adaptation pour les décideurs et les praticiens de l'ingénierie.

3. UN APERÇU DES SOURCES D'AGRESSION POUR LES CHAUSSEES

3.1. FACTEURS D'AGRESSION DES CHAUSSEES INDUITS PAR LE CHANGEMENT CLIMATIQUE

Les événements météorologiques récents ont montré que les infrastructures sont vulnérables aux effets du changement climatique ; ces vulnérabilités augmentent à mesure que le climat change [3.1-1]. Les modèles existants sur le changement climatique mondial, y compris les scénarios optimistes, montrent des projections d'un changement continu à un rythme croissant au cours du siècle prochain [3.1-2]. En fait, le changement climatique a produit un large éventail d'impacts qui ont affecté les infrastructures à grande échelle, bien qu'ils soient sensibles au contexte, ce qui signifie qu'ils sont soumis à diverses influences spécifiques au lieu et à la capacité d'adaptation des gouvernements et des communautés dans une juridiction donnée [3.1-3].

Pour donner une idée approximative de ce à quoi ces changements futurs pourraient ressembler, la figure 3.1-1 montre des exemples d'augmentation générale de la température moyenne de l'air et de variation en pourcentage des précipitations estivales, respectivement, aux États-Unis d'ici à 2050, dérivés de scénarios climatiques spécifiques et de modèles de sensibilité [3.1-4].

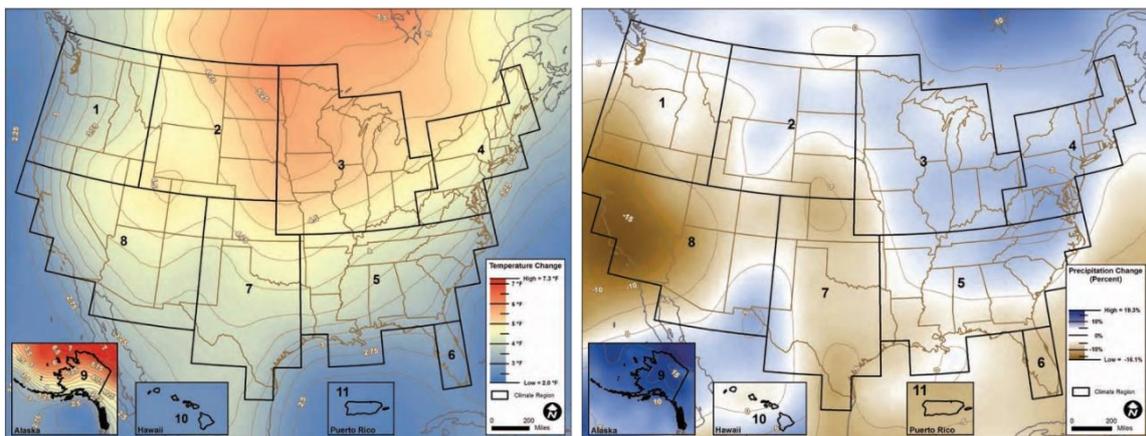


Figure 3.1-1 : augmentation estimée de la température (°F) en 2050 par rapport à 2010 (à gauche) ; variation estimée en pourcentage des précipitations estivales en 2050 par rapport à 2010 (à droite)

Rowan et al [3.1-5] ont documenté la sensibilité des actifs de transport à une série de facteurs d'agression climatiques. Les températures extrêmes, les précipitations, l'élévation du niveau de la mer, les ondes de tempête, la sécheresse, les cycles de gel et de dégel, la vitesse du vent, la couverture nuageuse (ou le pourcentage d'ensoleillement) et l'humidité sont autant de facteurs d'agression susceptibles d'affecter les systèmes de chaussée.

En outre, si la portée de l'analyse des facteurs de stress climatiques est étendue aux sols de fondation, d'autres impacts incluraient des changements dans la profondeur de pénétration du gel, des changements dans les cycles de gel-dégel et d'humidité-sécheresse qui affectent la durabilité à long terme et l'uni de la chaussée, ainsi que les caractéristiques de résistance et de déformation des sols. Les incidences sur le pergélisol, c'est-à-dire tout sol qui reste complètement et continuellement gelé pendant une période d'au moins deux ans (un phénomène plus courant aux latitudes élevées), sont d'une importance similaire. Le dégel du pergélisol peut affecter les

propriétés structurelles du sol support dans les régions froides, entraînant des problèmes de performance tels que la déformation des voies de circulation et des accotements.

Dans ce rapport, les facteurs d'agression suivants sont examinés :

- augmentation de la température,
- une exposition accrue à l'eau,
- les changements dans les cycles de gel et de dégel,
- des périodes de sécheresse plus longues.

3.2. FACTEURS D'AGRESSION DES CHAUSSEES INDUITS PAR LE TRAFIC AUTOMOBILE

La technologie des véhicules évolue également, l'accent étant mis de plus en plus sur l'efficacité énergétique et la durabilité globale en vue d'une économie circulaire. Les dommages structurels causés aux chaussées par les véhicules lourds dépendent du mode de chargement, de la charge par essieu, de la configuration des essieux, de la pression de contact des pneus, des effets de la charge dynamique et de leurs interactions.

Les assemblages de pneus jumelés sont utilisés depuis de nombreuses années dans les poids lourds et offrent de nombreux avantages. Par exemple, il est largement admis que l'utilisation de pneus jumelés améliore le contrôle, assure une bonne répartition du poids et augmente la capacité de charge. Le fait de placer des pneus jumelés aux deux extrémités d'un seul essieu double presque le poids que l'essieu peut supporter, ce qui améliore l'économie de carburant. Cependant, sous la pression croissante de faire "plus avec moins", l'industrie du camionnage s'oriente de plus en plus vers un nouveau type de pneu à large base appelé "super single tyre" (pneu super simple). Le pneu super simple est un pneu à base large à faible profil dont la capacité de charge est égale ou supérieure à celle d'une paire de pneus jumelés conventionnels. Par rapport au système conventionnel à deux pneus, le pneu super simple offre des avantages économiques et environnementaux tels que l'amélioration du rendement énergétique, la réduction des émissions du véhicule, etc. En outre, il a été signalé que le pneu super simple améliore la qualité de conduite du véhicule en raison de son centre de gravité bas. Ces pneus sont également plus durables, plus résistants et plus légers. Des études récentes ont montré que 18 pneus d'un ensemble double standard peuvent être remplacés par seulement 10 pneus super simples [3.2-1, 3.2-2].

Quelques études récentes ont comparé les réactions de la chaussée avec des pneus jumelés et des pneus super simples, concluant qu'avec une augmentation de la pression des pneus, la déformation en traction augmente pour les deux types de configurations de pneus ; cependant, l'augmentation est plus importante dans le cas des pneus super simples. Pour les pneus super simples, avec une augmentation de la vitesse, l'effet de la charge par essieu sur la déformation en traction est plus important, ce qui suggère que les pneus super simples endommagent davantage la chaussée que les pneus jumelés [3.2-2]. En outre, bien que les pneus super simples soient considérés comme une alternative prometteuse aux pneus simples standard, car ils sont censés réduire l'impact sur l'environnement en raison de la diminution de la consommation de carburant, en particulier sur les routes à fort trafic [3.2-3, 3.2-4], quelques études récentes montrent que les contraintes de contact sont différentes et peuvent être plus dommageables pour la chaussée que celles des pneus jumelés standard.

De même, les longueurs supérieures à la norme des camions actuellement introduits pour réduire les coûts d'exploitation des véhicules et les vitesses dans les zones urbaines, et améliorer ainsi la sécurité et la mobilité urbaine, contribuent également à modifier la réponse de la chaussée.

D'autres stratégies à faible émission de carbone comprennent des véhicules à émissions faibles ou nulles qui dépasseront probablement les charges par essieu ou les charges brutes autorisées par la loi, bien que l'ampleur des variations puisse dépendre de l'utilisation du véhicule. L'accent étant mis de plus en plus sur la durabilité du transport routier, la perspective d'une augmentation de la limite légale de charge par essieu pour les camions - qui varie d'un pays à l'autre et influe sur le comportement des chaussées - est désormais envisagée.

À l'avenir, un système de transport décarboné est une étape majeure pour atteindre les objectifs climatiques et les véhicules électriques ou à hydrogène sont une stratégie explorée à l'échelle mondiale. Les véhicules zéro émission peuvent induire des charges par essieu plus lourdes que les véhicules conventionnels à moteur à combustion interne (ICE). Cela s'explique par le poids supplémentaire dû aux unités de stockage externes (c'est-à-dire les batteries/cylindres) dont ces véhicules sont équipés, et c'est un facteur crucial directement responsable de la détérioration des chaussées. À l'avenir, cette transition de phase qui a lieu dans les transports publics et commerciaux entraînera des coûts supplémentaires pour préserver l'état des chaussées [3.2-5, 3.2-6].

Plus précisément, ces charges d'essieu plus lourdes risquent d'endommager davantage les chaussées et d'entraîner une conséquence imprévue : une augmentation des émissions de GES résultant soit de la construction de chaussées plus résistantes pour supporter les charges plus lourdes, soit de l'augmentation des activités d'entretien et de réhabilitation pour conserver l'état fonctionnel existant [3.2-7].

Les agences devraient donc envisager de passer à l'étape suivante, à savoir évaluer la résilience [3.2-8] et la vulnérabilité de leur réseau de chaussées à ces variables en surveillant les tendances et en apportant des ajustements à leurs pratiques, le cas échéant. Les données d'entrée de la conception des mélanges et des chaussées devront être modifiées sur la base de modèles de chaussées simulant les spécifications dynamiques des véhicules.

La chaleur de frottement générée par les pneus des véhicules en mouvement est également considérée comme un facteur important de détérioration des routes. En raison de la chaleur de frottement, la température des traces de roues est légèrement supérieure à la température du reste de la chaussée, ce qui entraîne une distribution non uniforme de la température de surface de la route, qui peut être responsable du développement de fissures et de l'augmentation subséquente de la perméabilité des routes existantes, ainsi que de la diminution de la densité du mélange [3.2-9].

Une augmentation de la durée de chargement des véhicules peut également diminuer le module de résilience. Cela est dû au fait que le béton bitumineux est un matériau viscoélastique, c'est-à-dire qu'il se comporte comme un matériau élastique sous des charges rapides, mais davantage comme un matériau visqueux sous des charges lentes. Par conséquent, une augmentation de la vitesse des véhicules peut entraîner une défaillance prématurée de la chaussée. De même, il a été démontré que la déformation accumulée augmentait avec la largeur de l'impulsion, ce qui indique que les véhicules à faible vitesse peuvent provoquer des déformations permanentes (orniérage) sur les chaussées en asphalte [3.2-10].

Les sollicitations continues des véhicules peuvent également entraîner l'apparition de dégradations de la chaussée, ce qui pourrait indirectement influencer sur la concentration des conducteurs, le fonctionnement du véhicule et les accidents de la route, tout en affectant directement la qualité de la conduite. La rugosité de la chaussée, par exemple, est un facteur qui sera affecté par l'hétérogénéité du trafic et des conditions de chargement [3.2-11]. En outre, la longueur du véhicule a une relation directe avec les contraintes exercées sur la chaussée, bien que cela puisse dépendre de l'espacement ou de la configuration des essieux et de la répartition de la charge sur le véhicule.

Dans ce rapport, les facteurs d'agression induits par le trafic automobile suivants sont examinés :

- augmentation du trafic lourd,
- l'augmentation de la charge des véhicules ou des essieux.

3.3. FACTEUR D'AGRESSION POUR LES CHAUSSEES INDUIT PAR LES CATASTROPHES NATURELLES ET D'ORIGINE HUMAINE

Les infrastructures de transport peuvent être soumises à des forces imprévisibles, qui peuvent être dévastatrices pour les chaussées. Les événements météorologiques, par exemple, constituent un risque pour l'infrastructure des chaussées, en affectant l'intégrité structurelle et fonctionnelle de la chaussée. Ces conditions induisent des contraintes dans la chaussée, ce qui entraîne diverses formes de dégradation de la chaussée telles que la fissuration, l'orniérage et le soulèvement.

Voici quelques exemples de facteurs d'agression induits par les catastrophes naturelles sur les chaussées :

Fractures du sol : Les tremblements de terre peuvent induire des mouvements de terrain qui peuvent à leur tour entraîner le déplacement, la fissuration et la rupture des couches de la chaussée. Ces défaillances du sol peuvent également provoquer des tassements différentiels et une perte de résistance du sol, ce qui entraîne des dommages importants aux chaussées en provoquant des mouvements du sol et des failles qui entraînent des contraintes de cisaillement dans la chaussée et, en fin de compte, une défaillance du support du sol.

Augmentation de la nappe phréatique : On prévoit que le niveau de la mer augmentera dans les années à venir. L'eau de mer peut pénétrer dans les aquifères côtiers et modifier le niveau des nappes phréatiques, menaçant ainsi les chaussées. Les propriétés de résistance de la couche de fondation changeront, ce qui affaiblira la chaussée et réduira ses performances.

L'effet d'îlot de chaleur urbain : Les chaussées conventionnelles en béton et en asphalte absorbent l'énergie solaire, ce qui entraîne un effet d'îlot de chaleur urbain (ICU) et une défaillance prématurée des chaussées.

Inondations : Les inondations peuvent endommager les chaussées en érodant les couches de fondation et de base de la chaussée, ce qui entraîne une perte de support pour la chaussée. Cette érosion peut également entraîner l'infiltration d'eau dans les couches de la chaussée, ce qui

entraîne une perte de support et des dommages structurels. En outre, les débris qui s'écoulent sur la chaussée à la suite d'une inondation peuvent rendre une route temporairement impraticable. Dans l'ensemble, les dommages causés par les inondations peuvent être à court terme (immédiatement après l'inondation) ou à long terme [3.2-10].

- Ouragans et vents violents : Les vents violents des ouragans et d'autres phénomènes météorologiques violents peuvent causer des dommages importants aux chaussées, notamment en créant des forces de soulèvement qui peuvent déplacer les couches de la chaussée.
- Cycles de gel et de dégel : Les cycles répétés de gel et de dégel peuvent entraîner une dilatation et une contraction des matériaux de la chaussée, ce qui provoque des fissures et d'autres formes de détérioration et réduit les performances mécaniques et la durée de vie de la chaussée.
- Incendies : Les incendies ne peuvent pas faire fondre ou endommager directement la chaussée, à moins qu'il n'y ait une fuite de pétrole à l'endroit concerné pour augmenter la température, mais les séquelles - sous forme de fissures, de perte de résistance et de déformations localisées - peuvent être graves. En outre, il y aura une charge accrue de véhicules de lutte contre les incendies sur des segments de route qui n'ont peut-être pas été conçus pour supporter de tels scénarios.
- Pression de l'eau interstitielle : Une nappe phréatique et une pression d'eau interstitielle élevées peuvent conduire à l'érosion et à l'effondrement de la couche de fondation ; dans de tels scénarios, la rigidité structurelle du matériau réduira la durée de vie de la chaussée. En outre, l'échange d'humidité entre l'environnement et la structure de la chaussée peut se produire par les infiltrations de précipitations, à travers les fissures de surface et les remblais, ou par le dessous en raison de la succion capillaire et d'une nappe phréatique élevée [3.3-1].
- Changement climatique : Les changements climatiques fréquents et soudains peuvent affecter la durée de vie de la chaussée [3.3-2]. En cas de précipitations extrêmes, la chaussée perd progressivement sa texture superficielle, ce qui peut entraîner des accidents de la circulation. D'autre part, en cas de températures de surface élevées, le matériau de la chaussée perd progressivement sa rigidité, ce qui peut entraîner une défaillance soudaine lorsque le sol de la couche de fondation ou les matériaux des couches non liées se rétractent sous l'effet d'une baisse soudaine de la température. En raison de ce phénomène, la chaussée commence à présenter des tassements différentiels en fonction de son âge, de son emplacement, de ses caractéristiques actuelles et de son état.

Les catastrophes d'origine humaine telles que les surcharges, les mauvaises constructions, les explosions, les déversements de produits chimiques et le vandalisme ont également un impact sur les performances structurelles ou fonctionnelles de la chaussée, mais le concepteur ne peut pas les contrôler, car il n'existe pas de modèles permettant de prendre en compte ces problèmes dans la conception de la chaussée. Pour cette raison, les facteurs d'agression des chaussées ne peuvent pas être entièrement pris en compte dans la conception, bien qu'ils puissent être atténués dans une certaine mesure grâce à l'utilisation de modèles de prévision climatique [3.3-3].

En résumé, ces catastrophes peuvent avoir un impact critique sur la chaussée, et il est essentiel de prendre en compte les effets potentiels de ces événements dans la conception et l'entretien de l'infrastructure de la chaussée. La conception de chaussées résilientes est la clé du contrôle de ces facteurs d'agression, où des matériaux durables, un drainage adéquat et une inspection et un entretien réguliers pour détecter les problèmes critiques avant qu'ils ne deviennent graves peuvent tous jouer un rôle important.

En outre, des plans de préparation aux catastrophes doivent être mis en place afin d'assurer une réponse rapide pour la réparation du patrimoine routier. Une planification adéquate et la mise en œuvre de stratégies d'atténuation peuvent réduire le risque de dommages et assurer la durabilité à long terme des systèmes de chaussées.

Dans ce rapport, les facteurs d'agression induits par les catastrophes naturelles et d'origine humaine suivants sont examinés :

- incendies de forêt,
- glissements de terrain,
- l'activité volcanique et les tremblements de terre,
- avalanches,
- conflit armé.

4. FACTEURS D'AGRESSION DES CHAUSSEES INDUITS PAR LE CHANGEMENT CLIMATIQUE ET MESURES POSSIBLES

4.1. AUGMENTATION DE LA TEMPÉRATURE

Dans les chaussées en asphalte, une augmentation de la température entraîne une diminution de la rigidité de l'enrobé (module de rigidité plus faible), ce qui se traduit par une augmentation de la fissuration par fatigue ou de l'ondulation (planche à laver). Les mesures possibles pour atténuer ce problème sont les suivantes :

- l'utilisation de liants modifiés pour augmenter la résistance à la fatigue (7.1.1)
- le dimensionnement de la chaussée avec des lois de fatigue adaptées (7.1.7)
- l'utilisation de liants plus durs pour augmenter la rigidité (7.1.2)

Les propriétés viscoélastiques des enrobés dépendent de la température. À des températures plus élevées, l'enrobé peut devenir plus sensible à l'orniérage ou au ressuage (avec une réduction de l'adhérence). Les mesures possibles pour atténuer ce problème sont les suivantes

- l'utilisation de liants modifiés pour augmenter la résistance à l'orniérage ou la rigidité (7.1.1)
- l'utilisation de liants plus durs pour augmenter la rigidité (7.1.2)
- l'utilisation de granulats à albédo élevé pour réduire la température de la chaussée (7.1.4)
- l'utilisation d'un revêtement léger pour diminuer la température de la chaussée (7.1.5)
- l'utilisation d'enrobés spéciaux (7.1.8)
- l'utilisation de revêtements en béton (7.2.2)
- utiliser des matériaux à changement de phase (7.4.5)

Des températures plus élevées peuvent accélérer le vieillissement du bitume, ce qui se traduit par des déformations et des nids-de-poule. Une des mesures possibles pour atténuer ce problème est la suivante:

- l'utilisation de matériaux résistants au vieillissement (7.1.3)

Dans les chaussées en béton (jointoyées), une augmentation de la température accroît les contraintes dans la chaussée. En conséquence, les joints se dilatent et des gonflements peuvent se produire. Les mesures possibles pour atténuer ce problème sont les suivantes

- modification de la conception pour inclure (plus) de(s) joints de dilatation (7.2.4)
- modifications de la conception pour tenir compte de gradients de température plus agressifs (7.2.5)

4.2. EXPOSITION ACCRUE À L'EAU

Cet impact est le résultat de différents phénomènes tels que l'augmentation des précipitations, les crues soudaines, l'élévation du niveau de la mer et les épisodes de fortes pluies ou de neige. Si une chaussée est inondée pendant une longue période, la capacité portante de la structure diminue et les couches de base peuvent s'éroder. Les mesures possibles pour atténuer ces problèmes sont les suivantes

- l'utilisation de structures perméables (7.3.2)

- la prise en compte des inondations majeures dans la conception du système de drainage (7.4.1)
- l'utilisation de couches de base liées (7.3.1)
- l'utilisation de chaussées en béton (7.2.1)

Les chaussées en asphalte peuvent être endommagées par l'humidité, ce qui entraîne un déchaussement ou un décapage. Les mesures possibles pour atténuer ce problème sont les suivantes :

- utilisation des liants modifiés par des polymères (7.1.1)
- la conception d'enrobés résistants à l'eau (7.1.6)

4.3. CHANGEMENTS DANS LES SCHÉMAS DE GEL ET DE DÉGEL

L'augmentation de la fréquence des cycles de gel-dégel nécessite des programmes d'entretien hivernal plus agressifs et des épandages de sel plus fréquents. Les chaussées en béton sont particulièrement vulnérables aux dommages causés par le gel et le dégel. Une des mesures possibles pour atténuer ce problème est la suivante:

- la conception des mélanges de béton pour la résistance au gel et au dégel (7.2.6)

Dans les chaussées endommagées (asphalte), la fissuration peut être accélérée si l'eau peut pénétrer dans la chaussée et se dilater pendant la période de gel, ce qui entraîne une augmentation de l'apparition de nids-de-poule. Une des mesures possibles pour atténuer ce problème est la suivante:

- la conception d'enrobés résistants à l'eau (7.1.6)

Dans les climats plus froids, le dégel ne se produisait historiquement qu'à la fin de l'hiver. Les tendances climatiques récentes ont augmenté les cycles de dégel tout au long de la saison hivernale. Dans de tels scénarios, de courtes périodes (quelques semaines) de basses températures alternent avec des périodes de températures plus élevées, ce qui entraîne un affaiblissement de la structure de la chaussée. Une des mesures possibles pour atténuer ce problème est la suivante:

- l'utilisation de couches de protection contre le gel (7.3.4)

4.4. PÉRIODES DE SÉCHERESSE PLUS LONGUES

Les périodes de sécheresse prolongées se traduisent par une diminution de la nappe phréatique, ce qui peut entraîner un rétrécissement des couches de base non liées ou du sol de fondation. Les mesures possibles pour atténuer ce problème sont les suivantes

- infiltration ou tamponnement des eaux de pluie (7.3.3)
- le remplacement ou la stabilisation de la couche de fondation (7.3.5)

5. FACTEURS D'AGRESSION DES CHAUSSEES INDUITS PAR LE TRAFIC AUTOMOBILE ET MESURES POSSIBLES

5.1. AUGMENTATION DU TRAFIC LOURD

Une augmentation du trafic peut entraîner une défaillance prématurée. Une des mesures possibles pour atténuer ce problème est la suivante:

- la conception de la chaussée en fonction des niveaux de trafic exacts et futurs prévus (7.4.3)

5.2. AUGMENTATION DE LA CHARGE DES VEHICULES OU DES ESSIEUX

Les impacts et mesures suivants sont également applicables à des phénomènes similaires, tels que le trafic canalisé.

Une augmentation de la charge du véhicule a peu d'effet sur la chaussée, à condition que la charge accrue soit répartie sur un plus grand nombre d'essieux. En revanche, une augmentation de la charge par essieu peut entraîner une défaillance prématurée. L'utilisation de pneus super simples, dont la pression de contact est plus élevée, entraîne des contraintes plus importantes sur la chaussée, ce qui conduit à une rupture prématurée par fatigue. Une des mesures possibles pour atténuer ce problème est la suivante:

- la conception de la chaussée pour des charges par essieu précises et prévues (7.4.2)

Pour les chaussées souples, l'augmentation des charges par essieu peut entraîner une déformation plus permanente (orniérage ou ondulation). Les mesures possibles pour atténuer ce problème sont les suivantes :

- l'utilisation de liants plus durs pour augmenter la rigidité (7.1.2)
- l'utilisation d'enrobés spéciaux (7.1.8)
- en utilisant des voies séparées pour les camions, construites avec une chaussée en béton (7.2.3)
- répartir la charge sur la voie afin de réduire l'impact de la canalisation du trafic due à la formation de pelotons (7.4.4)

6. FACTEURS D'AGRESSION DES CHAUSSEES INDUITS PAR LES CATASTROPHES NATURELLES ET HUMAINES ET MESURES POSSIBLES

6.1. INCENDIE DE FORÊT

Les incendies peuvent avoir un impact sur la surface de la chaussée, entraînant un vieillissement du bitume ou un écaillage. Une des mesures possibles pour atténuer ces problèmes est la suivante:

- l'utilisation de matériaux résistant au vieillissement (7.1.3)

6.2. GLISSEMENTS DE TERRAIN

Les glissements de terrain ont un impact sur l'ensemble de la structure routière. Pour connaître les mesures possibles pour atténuer ces problèmes, le lecteur intéressé peut se référer à l'analyse documentaire "Accroître la résilience des ouvrages en terre face aux risques naturels" [6.2-1] ou au recueil d'études de cas "Résilience des ouvrages en terre" par le Comité technique 4.3 (Terrassements) [6.2-2].

6.3. ACTIVITE VOLCANIQUE ET TREMBLEMENTS DE TERRE

L'activité volcanique et les tremblements de terre ont un impact majeur sur l'intégrité d'une chaussée, mais il n'existe pas de mesures connues pour atténuer ces risques.

6.4. AVALANCHES

Si une avalanche endommage l'ensemble de la structure de la route, les conséquences sont comparables à celles d'un glissement de terrain.

6.5. CONFLIT ARMÉ

Les conflits armés peuvent avoir un impact majeur sur l'ensemble de l'infrastructure routière.

Les conflits armés peuvent en effet avoir un impact majeur sur l'ensemble de l'infrastructure routière d'une région ou d'un pays. Les conséquences des conflits armés sur les routes peuvent être dévastatrices, affectant le transport, les activités économiques et le bien-être général de la population touchée. Voici une explication de l'impact des conflits armés sur l'infrastructure routière, ainsi que quelques références à des sources académiques :

Domages physiques :

Pendant les conflits armés, les routes et les ponts peuvent être la cible directe d'attaques ou de dommages collatéraux. Les destructions causées par les bombardements, les tirs d'obus ou d'autres opérations militaires peuvent rendre les routes impraticables et perturber les voies de communication. Cela affecte non seulement la circulation des personnes et des biens, mais entrave également les efforts d'intervention d'urgence [6.5-1].

Manque d'entretien :

Les conflits armés en cours peuvent perturber les activités courantes d'entretien et de réparation des routes. Les

autorités civiles peuvent avoir du mal à allouer des ressources et du personnel à l'entretien des routes en période de conflit, ce qui entraîne une détérioration de l'état des routes au fil du temps [6.5-2].

Mines terrestres et restes explosifs : Dans certaines zones de conflit, des mines terrestres et des restes explosifs de guerre peuvent être laissés sur place après la fin des combats. Ces dangers mortels peuvent constituer une menace sérieuse pour les usagers de la route, entravant l'accès sécurisé des civils et les efforts de reconstruction [6.5-3].

Déplacement de communautés : Les conflits armés obligent souvent les gens à fuir leurs maisons et à chercher des zones plus sûres. Les déplacements massifs peuvent exercer une pression supplémentaire sur les infrastructures routières des régions voisines, car davantage de personnes et de véhicules empruntent des itinéraires alternatifs. Cette augmentation du trafic peut entraîner des embouteillages et la détérioration des routes [6.5-4].

Impact économique : La destruction et la perturbation de l'infrastructure routière peuvent avoir un impact sérieux sur les activités économiques et le commerce. Les entreprises peuvent subir des pertes en raison de l'interruption des chaînes d'approvisionnement, de la diminution de l'accessibilité aux marchés et de l'augmentation des coûts de transport [6.5-5].

Réponse humanitaire : Dans les zones touchées par les conflits, les organisations humanitaires sont confrontées à des difficultés pour acheminer l'aide et l'assistance aux personnes dans le besoin en raison des routes endommagées ou bloquées. L'accès à la nourriture, à l'eau, aux soins de santé et aux abris peut être sévèrement limité pendant les conflits actifs, ce qui affecte le bien-être des populations touchées [6.5-6].

Coûts de reconstruction : Une fois le conflit terminé, la reconstruction et la réhabilitation de l'infrastructure routière peuvent s'avérer une tâche intimidante et coûteuse. Les fonds et les ressources qui auraient pu être utilisés pour d'autres projets de développement peuvent devoir être détournés pour restaurer les réseaux de transport vitaux [6.5-7].

7. APERÇU DES MESURES

7.1. MESURES POUR LES CHAUSSEES EN ASPHALTE

7.1.1. Utilisation de liants modifiés par des polymères

Les bitumes traditionnels, dérivés de la distillation et/ou du soufflage de pétroles bruts, possèdent des propriétés mécaniques satisfaisantes pour une utilisation dans les chaussées bitumineuses dans des conditions de trafic et de climat modérées. L'utilisation de liants oxydés plus durs améliore les performances à haute température, mais peut compromettre les propriétés à basse température. Le bitume modifié, en tant que solution pour augmenter la plage viscoélastique, joue un rôle principal dans la détermination de nombreux aspects de la performance routière. Les modificateurs typiques du bitume sont les polymères, le caoutchouc de pneu récupéré, les fibres (synthétiques et minérales) et les composés chimiques [7.1.1-1]. Le tableau 7.1.1-1 et la figure 7.7.1-1 présentent quelques exemples de ces modificateurs.

Type de modificateur	Exemples	Abréviation
Thermoplastique élastomères	Élastomère styrène-butadiène-styrène (linéaire ou radial)	SBS
	Caoutchouc styrène-butadiène	SBR
	Elastomère styrène-isoprène-styrène	SIS
	Elastomère de styrène-éthylène-butadiène-styrène	SEBS
	Polybutadiène	PBD
	Polyisoprène	PI
Matériau recyclé	Caoutchouc friable	CR
	Plastiques	
Fibres	Lignine	PP
	Cellulose	
	Basalte	
	Fibres de verre	
	Amiante	
	Polypropylène	
Asphalte naturel	Asphalte du lac Trinidad	TLA
	Gilsonite	
Composés chimiques	Améliorations de l'adhérence (amines organiques)	
	Antioxydants (dérivés phénoliques)	
	Cires	

Tableau 7.1.1-1 Exemples d'additifs utilisés pour modifier le bitume



Figure 7.1.1-1 : Modificateurs de bitume : SBS (A) caoutchouc en miettes (B) fibres synthétiques (C) [7.1.1-2, 7.1.1-3].

La modification des polymères est une méthode largement utilisée pour améliorer les propriétés du bitume. Il existe principalement deux classes de polymères - les élastomères et les plastomères - qui sont considérés comme adaptés à la modification du bitume [7.1.1-4]. Les propriétés du bitume modifié par des polymères dépendent des caractéristiques et de la teneur en polymères,

des propriétés du bitume, ainsi que de la nature du processus de mélange. L'élastomère le plus courant est le caoutchouc thermoplastique, obtenu par polymérisation du styrène et du butadiène ou du styrène et de l'isoprène [7.1.1-5]. L'utilisation de caoutchouc thermoplastique augmente le point de ramollissement et la viscosité du bitume. En outre, les composés élastomères améliorent l'élasticité du liant et abaissent son point de rupture. La figure 7.1.1-2 montre la microstructure d'un liant modifié.

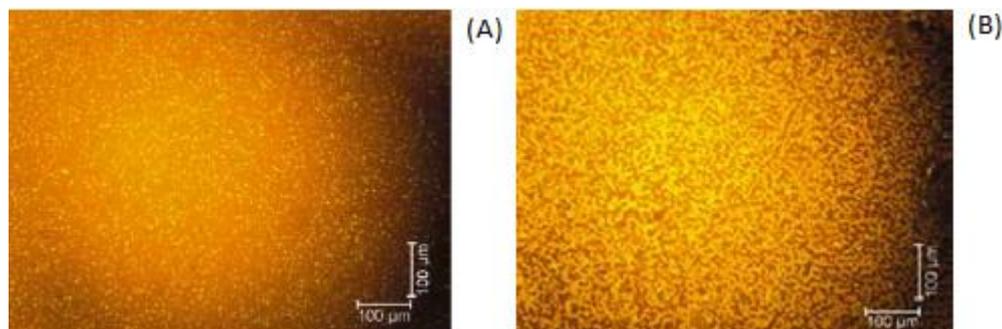
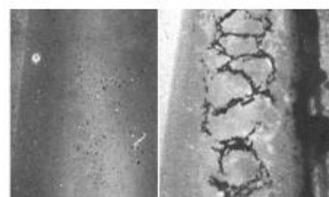


Figure 7.1.1-2 : Microstructure d'un bitume typique modifié par des polymères (A) et microstructure d'un bitume fortement modifié par des polymères (B) [7.1.1-6].

La teneur typique en SBS dans la modification du bitume est de 3 à 5 % en poids. L'utilisation de teneurs plus élevées en polymère (c'est-à-dire plus de 5% en poids) dans la modification du bitume augmente la phase polymérique, ce qui donne un bitume fortement modifié (figure 7.1.1-2). Le bitume fortement modifié a un point de ramollissement supérieur à 80 °C et a une consistance plus dense et plus élastique, ce qui nécessite des températures de compactage et de mélange plus élevées [7.1.1-6]. La modification des polymères a des effets bénéfiques sur les liants bitumineux et donc sur les chaussées routières. Il s'agit notamment d'une diminution de la susceptibilité thermique et de la déformation permanente (orniérage) et d'une résistance accrue à la fissuration à basse température et à la fissuration par fatigue (figure 7.1.1-3).

Le caoutchouc de fragmentation (CR) récupéré à partir de vieux pneus usagés peut être utilisé pour modifier et améliorer les performances du bitume conventionnel tout en fournissant une utilisation pour les pneus mis au rebut. Dans le procédé "humide", le modificateur CR est ajouté au bitume avant la fabrication de l'asphalte chaud. Dans le procédé "sec", le modificateur CR est mélangé directement à l'asphalte préparé de manière conventionnelle au niveau du mélangeur à palettes. La concentration de CR dans le bitume est généralement comprise entre 8 et 15 % [7.1.1-1], mais elle peut être inférieure ou atteindre 22 % en fonction du traitement et du pays [7.1.1-7]. L'ajout de CR dans le bitume vierge induit une augmentation significative de la viscosité du liant. L'ajout de CR dans le bitume, quant à lui, peut permettre d'obtenir un enrobé à chaud (HMA) plus résistant à l'orniérage, à la fissuration par fatigue et à la fissuration thermique [7.1.1-8].



Lane 1	Lane 2
CR-AZ	Control
300,000	100,000

Figure 7.1.1-3 : Dispositif d'essai ALF et comparaison de la section de chaussée en caoutchouc mousse (CR) et de la section de chaussée témoin après la fin du chargement [7.1.1-8].

Les matériaux modifiés par des fibres, tels que les fibres de basalte, les fibres de lignine, les fibres de polyester, les fibres d'amiante et les fibres de carbone, sont couramment utilisés dans les mélanges bitumineux [7.1.1-9]. Les propriétés les plus importantes des fibres en ce qui concerne les applications du bitume et des chaussées sont leur thermostabilité, leurs propriétés physiques et mécaniques et leur stabilité chimique. L'utilisation d'additifs à base de fibres a un effet renforçant et influence de manière significative les performances du liant bitumineux et du mélange bitumineux. Les caractéristiques uniques du bitume renforcé par des fibres augmentent la consistance du liant. Le point de ramollissement augmente avec la teneur en fibres du liant dans le bitume renforcé par des fibres, tandis que la ductilité diminue [7.1.1-10]. Au cours du processus de modification, un réseau de fibres se forme et réduit la sensibilité du liant à la température. L'ajout de fibres peut également améliorer les propriétés du mélange bitumineux, telles que sa stabilité à haute température, sa résistance aux fissures à basse température et sa susceptibilité à l'eau.

Les autres additifs comprennent des composés chimiques et naturels destinés à améliorer l'adhérence aux granulats, à réduire la viscosité, à augmenter la résistance au vieillissement et à l'orniérage. Par exemple, des cires communes ont été utilisées dans la production d'enrobés tièdes pour augmenter la viscosité du liant au-dessus de son point de fusion [7.1.1-11]. En outre, des émulsifiants et des surfactants, qui ne réduisent pas la viscosité du liant mais améliorent l'enrobage des granulats, ont été utilisés comme agents anti-décrochage (c'est-à-dire des dérivés d'amines grasses). Dans certains cas, les propriétés requises peuvent être modifiées en ajoutant du bitume "naturel".

7.1.2. Utiliser des classeurs plus résistants

Les résultats récents de la recherche et du développement montrent que, pour obtenir une résistance élevée à l'agressivité accrue causée par le climat et le trafic, il faut tenir compte à la fois des propriétés du liant ainsi que du type et de la composition des granulats dans le processus d'optimisation.

Les enrobés bitumineux contenant du bitume conventionnel et du bitume modifié par des polymères (par exemple, 25/55- 55 A) comme couche de surface et couche de liaison, respectivement, sont extrêmement sensibles aux fortes contraintes de cisaillement et de déformation. Cela conduit à une déformation plastique et à la rupture des granulats individuels à la surface. Cet enrobé ne convient donc pas aux surfaces de circulation fortement sollicitées.

Dans le cadre d'une étude sur le développement d'enrobés hautement stables, un liant innovant (le bitume modifié par des polymères PmB 10/40-75 A, pour le climat d'Europe centrale) présentant une résistance élevée à la déformation à haute température, une capacité de relaxation suffisante à basse température et une bonne affinité avec le granulats s'est avéré adapté à la couche de roulement et à la couche de liaison de l'enrobé. En effet, l'utilisation du bitume hautement modifié par des polymères, PmB10/40-65 A, augmente de manière significative la teneur en polymères de l'enrobé et améliore considérablement sa résistance à la déformation permanente à des températures élevées. La composition de l'enrobé doit également être optimisée en termes de stabilité (composition riche en pierres concassées) et d'imperméabilité. Des granulats entièrement concassés de la catégorie C100/0 et du sable concassé doivent être utilisés comme agrégats afin d'obtenir une structure granulaire présentant une résistance élevée au cisaillement interne et, par

conséquent, une résistance élevée à la déformation et une capacité portante élevée. En outre, il faut viser un film de bitume épais en augmentant la teneur en liant, de sorte que le mélange, en combinaison avec un bitume dur et une courbe granulométrique optimisée, apporte une durée de vie nettement améliorée.

7.1.3. Utilisation de matériaux résistants au vieillissement

Le vieillissement du bitume est un processus physico-chimique provoqué par l'exposition à l'oxygène, aux UV et/ou à des températures élevées. L'oxydation rend le liant plus dur et plus fragile, ce qui entraîne la fissuration de la chaussée en asphalte. Divers additifs anti-vieillessement - tels qu'un antioxydant, un stabilisateur de polymère, un additif organique ou synthétique pour enrobés tièdes, un modificateur d'enrobé ou un copolymère renforcé par des agents antioxydants, une charge et un antioxydant UV - peuvent être utilisés pour rendre l'enrobé bitumineux plus résistant au vieillissement [7.1.3-1].

Le recueil d'études de cas [2-1] contient un cas similaire en Indonésie, "Resilient and sustainable pavement preservation solutions with Reacted and Activated Rubber" (solutions de préservation des chaussées résilientes et durables avec du caoutchouc réactif et activé).

7.1.4. Utilisation d'agrégats à albédo élevé

Les événements climatiques extrêmes, tels que la combinaison d'une période de chaleur et de nuits tropicales, sont plus fréquents, bien que leur intensité varie fortement d'une région à l'autre. Des changements marqués, notamment en ce qui concerne les températures maximales quotidiennes et l'intensité des périodes, sont observés de plus en plus fréquemment dans le monde entier. La durabilité des chaussées routières est fortement influencée par ces changements climatiques.

Pour contrer les conséquences négatives des changements climatiques, il est possible d'adapter les propriétés thermophysiques et photométriques des matériaux lors de la conception des mélanges et de la production d'enrobés optimisés pour le climat. L'optimisation des propriétés photométriques peut être obtenue en utilisant des agrégats de couleur claire (quartzite) et des liants synthétiques avec des pigments. En ce qui concerne les propriétés thermophysiques, les enrobés à conductivité thermique accrue (quartzite, calcaire) et à conductivité thermique réduite (laitier de four électrique) peuvent être utilisés pour toutes les couches d'asphalte.

Une étude récente de Schroedter et al [7.1.4-1] a montré que les variantes de chaussée bitumineuse comportant une couche de surface de couleur claire et un granulat à conductivité thermique plus élevée ont obtenu le développement d'échauffement le plus faible. Il convient de noter que les augmentations de température dans la couche de base dépendent de la conductivité thermique de la couche de base et de la couche de liant. Dans leur étude, l'échauffement le plus faible a été obtenu par la variante avec une couche de surface en asphalte de couleur claire et conductrice de chaleur sur un liant asphaltique et une couche de base en asphalte à faible conductivité thermique. Dans le tiers inférieur de la température de la couche d'asphalte, des différences de plus de 5 °C ont été observées par rapport à la variante conventionnelle.

Les couches de surface à forte réflectivité sont également très efficaces pour réduire les températures dans l'ensemble de la structure. Ainsi, dans l'étude susmentionnée, les variantes d'asphalte avec une couche de surface foncée, bien qu'elles aient été optimisées en termes de

propriétés thermophysiques des matériaux, n'ont pas permis de réduire de manière significative le développement de la chaleur dans la couche de roulement en asphalte.

En résumé, les effets négatifs des températures extrêmes sur le comportement de performance de l'enrobé peuvent être contrés avec succès de plusieurs façons. Par exemple, les agrégats et les liants mentionnés ci-dessus, tels que le bitume à haute teneur en polymères (PmB H), peuvent être incorporés.

7.1.5. Utilisation d'un revêtement léger

Dans une étude réalisée par Emery et al [7.1.5-1] sur deux voies de circulation de l'aéroport international Pearson (Toronto, Canada), un léger enduit de chaux hydratée a été appliqué sur la couche de surface supérieure de l'AMH fini afin d'augmenter les effets de l'albédo et de la couleur de la surface sur le comportement thermique. L'albédo, ou réflectance solaire, est le pourcentage d'énergie solaire réfléchi par une surface, et c'est le principal déterminant de la température maximale de surface d'un matériau. L'albédo se traduit par une absorption moindre du corps noir et une température plus basse. L'utilisation d'un tel revêtement est donc une adaptation qui pourrait réduire l'impact environnemental du ruissellement des eaux de surface chaudes et réduire les effets d'îlot de chaleur dans les zones urbaines. Une telle mesure aurait également des effets positifs en termes de réduction des coûts et de l'utilisation des ressources énergétiques.

Le recueil d'études de cas [2-1] contient un cas similaire du Japon, "Study on the mitigation of heat island effect achieved by different pavement technologies" (étude sur l'atténuation de l'effet d'îlot de chaleur grâce à différentes technologies de revêtement).

7.1.6. Conception d'enrobés bitumineux résistants à l'eau

Comme solution à moyen terme pour lutter contre l'impact de la fréquence accrue des précipitations intenses, l'Association mondiale de la route [7.1.6-1] a recommandé d'ajuster la conception des enrobés bitumineux pour améliorer la résistance aux dommages causés par l'eau grâce à l'utilisation d'additifs et de matériaux de remplissage spéciaux. Il a également été suggéré d'atténuer les effets des précipitations en développant des revêtements hydrophobes utilisables au niveau micromécanique et/ou du revêtement de la chaussée. La discussion s'étend à la lixiviation possible de substances nocives. Il est recommandé de lier ou d'isoler les matériaux, car l'élévation du niveau des eaux souterraines pourrait entraîner la lixiviation de contaminants.

Le recueil d'études de cas [2-1] contient un cas similaire au Japon, le "revêtement antigèle".

7.1.7. Conception de la chaussée avec des lois de fatigue adaptées

L'impact du changement climatique sur les routes a été étudié dans le cadre d'un projet de recherche financé par les administrations routières partenaires de plusieurs pays européens, intitulé "Pavement Performance and Remediation Requirements following Climate Change" [7.1.7-1]. Une variété de types de chaussées et de zones climatiques représentatives a été incluse, et l'étude a examiné les différences de teneur en humidité résultant du changement climatique. L'étude a conclu que, pour les chaussées ayant une longue durée de vie, les méthodes de conception des routes doivent être mises à jour pour garantir des performances adéquates dans le cadre du changement climatique, en particulier pour les couches inférieures de la chaussée, qui ne peuvent pas être modifiées lors de la réhabilitation et de la reconstruction futures.

Knott et al. [7.1.7-2] ont abordé les tendances de la réponse saisonnière des chaussées dans une étude récente sur la planification de l'adaptation à court terme des chaussées. Leur étude a utilisé une approche hybride ascendante/descendante pour quantifier l'impact d'une augmentation progressive de la température de 0 °C à 5 °C sur une liaison régionale à deux voies dans la région côtière du New Hampshire. Une stratégie d'adaptation simple consistant à augmenter l'épaisseur des couches de la chaussée a ensuite été étudiée. Les principaux mécanismes de dégradation ont été supposés être la fissuration par fatigue et l'orniérage, tandis que la fissuration thermique n'a pas été prise en compte. L'étude a conclu que, pour que la chaussée atteigne sa durée de vie nominale avec une fiabilité minimale (85 %), une augmentation de l'ordre de 7 % à 32 % de l'épaisseur de la couche HMA serait nécessaire (pour assurer l'intégrité des couches de base et de fondation). Cette recommandation est basée sur l'augmentation de la température prévue d'ici 2080 (avec un intervalle de confiance de 95 %) et sur l'hypothèse que l'épaisseur de la couche de base (406 mm de gravier) est maintenue constante. L'étude a également examiné l'épaisseur requise de la couche de base en gravier en supposant que la couche HMA est maintenue constante à 140 mm.

Comme le suggère l'étude précédente, la conception de la chaussée doit prendre en compte la température de conception, principalement en ce qui concerne la loi de fatigue, et doit l'actualiser en fonction de l'augmentation de la température de l'air au fil du temps.

7.1.8. Utilisation d'enrobés spéciaux

Les mélanges traditionnels pour les couches de roulement, tels que le "Stone Mastic Asphalt" (enrobé à squelette pierreux, SMA) ou l'asphalte poreux (PA), présentent une résistance élevée à la déformation permanente [7.1.8-1]. Cette résistance provient du pourcentage élevé de granulats grossiers (80 % ou plus). Ce squelette de gros cailloux a plus de contact pierre à pierre qu'un enrobé dense, ce qui lui confère un haut degré de stabilité.

Une couche de roulement composite (CSC) combine la conception sans joints de l'asphalte avec un mortier à base de ciment à haute résistance. Il est ainsi possible de produire des couches de roulement capables de résister à des charges mécaniques élevées. Par rapport au béton, le CSC peut supporter des charges ponctuelles plus élevées pour des épaisseurs de pose plus faibles. La microstructure dense du mortier permet également d'obtenir une imperméabilité et une résistance élevées aux substances chimiques. En outre, le CSC peut généralement être produit sans joints [7.1.8-2].

Le CSC se compose d'une couche d'asphalte poreuse ouverte avec un grand volume de vides d'air (25-30% en volume) et d'un mortier spécial fluide. Pendant la construction, la couche d'asphalte poreuse ouverte produite lors des premières étapes est remblayée avec le mortier lors d'une opération ultérieure le jour suivant. Les composants individuels - c'est-à-dire la couche d'asphalte poreuse ouverte et le mortier - sont combinés pour former la couche de roulement composite (semi-rigide).

Les couches de surface composites sont utilisées comme couches de roulement dans les zones de circulation soumises à des charges particulièrement lourdes, par exemple les aires de stationnement pour véhicules lourds, les arrêts de bus/terminaux et les zones industrielles, comme le montre la figure 7.1.8-1. En outre, cette couche est imperméable à l'eau et peut être utilisée pour les chaussées dans les zones de manutention de substances polluantes.



Figure 7.1.8-1 : gare routière, Wuppertal, Allemagne (Photo : Sivapatham)

La pose d'un CCF nécessite une base appropriée. En général, le CCF est posé sur une base d'asphalte ou sur une couche de base à liant hydraulique. Dans tous les cas, la base doit être collée, stable, portante, propre et uniforme. Pour éviter la ségrégation et la pénétration du mortier dans la couche de base, les vides d'air dans la couche de base ne doivent pas être trop élevés (recommandation < 6 % en volume). Pour assurer une pose correcte de la surface composite, il est impératif que les vides accessibles de l'asphalte poreux ouvert soient remplis de mortier sur toute l'épaisseur de la couche. À cet égard, le remplissage des vides d'air devient difficile à mesure que l'épaisseur de la couche augmente. C'est pourquoi il est recommandé de choisir une épaisseur de pose comprise entre 40 et 60 mm. En outre, la forme des particules influence considérablement le remplissage des vides d'air.

Le mélange recommandé pour un asphalte poreux ouvert se compose d'un agrégat grossier (une taille de produit d'agrégat : 8/11 ou 11/16), d'une charge, d'un bitume de pavage ou d'un bitume modifié par des polymères en tant que liant et d'une fibre en tant que support de liant. La viscosité du mortier doit en tout cas être telle qu'il remplisse les vides accessibles de l'asphalte poreux ouvert sur toute l'épaisseur de la couche par l'effet de son seul poids, c'est-à-dire sans vibration supplémentaire.

Enfin, le projet Climate Resilient Sustainable Road Pavement Surfacing (CRISPS), destiné aux pays à faible revenu, a étudié trois types de technologies de revêtement routier. Son objectif était de réaliser une route abordable à grand volume, résiliente au changement climatique et aux exigences de la circulation. Les revêtements étudiés sont les joints d'étanchéité en résine époxy modifiée (MECS), les revêtements en résine époxy modifiée (MEAS) et le bitume fibré (FMA) [7.1.8-3].

7.2. MESURES POUR LES CHAUSSEES EN BETON

7.2.1. Utilisation de chaussées en béton

Plusieurs études ont montré que les chaussées plus rigides, parce qu'elles sont moins susceptibles d'être endommagées lorsque la plate-forme/base est inondée, sont plus résistantes. Par rapport aux chaussées souples, elles présentent (1) une baisse moins prononcée des performances dans le temps ; (2) un temps d'ouverture plus rapide, (3) un temps de récupération structurelle plus court, et (4) une moindre susceptibilité aux dommages secondaires.



Figure 7.2.1-1 : Inondation de l'I-95, 11-12-2020 (photo : Greg Dean, ACPA)

Les chaussées en béton ont une longue durée de vie et sont construites pour résister aux changements de température ou d'humidité [7.2.1-1], car la rigidité du béton reste constante dans toute une gamme de conditions ambiantes. En outre, le béton n'est pas sensible au ramollissement ou à l'orniérage, et peut résister à la chaleur des incendies de forêt ou autres. Les routes en béton sont également moins sensibles au gonflement ou au rétrécissement de la couche de fondation que les chaussées souples, et sont donc mieux adaptées aux sols cohésifs tels que l'argile.

Les inondations peuvent avoir un effet néfaste sur la structure de la chaussée (voir figure 7.2.1-1). Parmi les différents types de routes en béton, les chaussées en béton armé continu (BAC) sont considérées comme les plus robustes, notamment en termes de résistance aux inondations [7.2.1-2, 7.2.1-3]. L'armature continue crée un effet de pont, répartissant la charge sur des bases saturées et permettant à la chaussée de résister à un affaissement local. Au Texas, plusieurs sections de BAC ont été soumises à des inondations fréquentes dues à des événements climatiques extrêmes et à des charges de trafic quatre à cinq fois supérieures aux niveaux attendus, tout en supportant des coûts d'entretien annuels minimes, prouvant ainsi la robustesse et la résilience de ce type de chaussée.

Le recueil d'études de cas [2-1] décrit deux cas aux États-Unis, dont le cas susmentionné au Texas :

- En Floride, une nouvelle route en béton est conçue pour minimiser les dégâts causés par les inondations
- Résilience des chaussées en béton armé continu au Texas

7.2.2. Utilisation de revêtements en béton

Les revêtements en béton sont une solution prometteuse pour créer des structures de chaussée plus rigides et plus résistantes.



Figure 7.2.2-1 : Revêtement en béton fibré d'une route locale revêtue d'asphalte Grant County, Indiana, États-Unis, 2020 (photo : ACPA)

Un revêtement en béton sur une chaussée en asphalte existante (abrégé ACO dans la langue vernaculaire américaine) peut être soit un ACO collé (ACO-B), soit un ACO non collé (ACO-U). L'ACO-B est un revêtement en béton de 100 mm à 150 mm placé sur la surface préparée d'une chaussée en asphalte existante (figure 7.2.2-1) [7.2.2-1]. Ces revêtements sont utilisés lorsque l'asphalte existant est en bon état structural mais présente une certaine dégradation en surface. Les revêtements bitumineux collés agissent comme un système de chaussée composite dans lequel le béton et l'asphalte partagent la capacité de charge du système de chaussée. En tant que tel, l'asphalte existant doit être laissé en place sur au moins 75 mm afin d'obtenir une action composite. Ces revêtements contiennent souvent des fibres pour maintenir fermement les petites fissures qui peuvent se développer, et ils utilisent un espacement des joints plus court que les chaussées en béton traditionnelles, généralement de 2 m, afin de minimiser les contraintes environnementales.

Les revêtements d'asphalte en béton non lié ont une épaisseur de 6 pouces (150 mm) ou plus et sont utilisés lorsque la chaussée existante est fortement détériorée ou a une épaisseur inférieure à 3 pouces (75 mm). Dans ce cas, l'asphalte existant est traité comme une couche de base stabilisée et le nouveau revêtement est essentiellement une nouvelle chaussée en béton sur une base solide. Alors que l'épaisseur typique des couches d'asphalte non liées pour les applications à faible trafic se situe entre 125 et 175 mm, elle peut atteindre 325 mm dans le cas d'applications à fort trafic (et même plus pour les applications sur les aéroports).

7.2.3. Utilisation de voies séparées pour les camions, construites avec une chaussée en béton

Comme indiqué ci-dessus, le béton se caractérise par une grande rigidité. Lorsqu'elles sont construites conformément aux exigences données, les chaussées en béton peuvent avoir une longue durée de vie sans déformation et sont donc particulièrement adaptées au trafic lourd.

L'utilisation de l'asphalte comme variante flexible en conjonction avec le béton permet d'obtenir une réduction plus importante du bruit, et la construction et l'entretien peuvent être réalisés plus facilement et plus rapidement. Ces applications sont particulièrement adaptées à des charges par essieu plus faibles.

À mesure que le changement climatique s'accroît, on prévoit des phénomènes météorologiques plus extrêmes et, en particulier, des périodes de chaleur plus longues. Dans ces conditions, et surtout en combinaison avec des charges de trafic élevées, le risque d'orniérage est élevé. Une façon de contrer cet effet et de rendre l'infrastructure routière plus résistante est d'adapter la méthode de construction aux différentes voies de circulation. Par exemple, la voie principale et la bande d'arrêt d'urgence pourraient être construites en béton, tandis que la deuxième voie et les voies suivantes seraient construites en asphalte. Cette approche a déjà donné des résultats prometteurs, notamment sur l'autoroute A61 en Allemagne (figure 7.2.3- 1), où l'on a notamment utilisé des dalles en béton non armé pour la voie en béton et des SMA ou de l'asphalte coulé pour les voies en asphalte.



Figure 7.2.3-1 : site d'essai sur l'autoroute A61 en Allemagne

La jonction longitudinale entre les deux méthodes de construction est essentielle dans cette approche. Dans le cas de l'asphalte, les mouvements de température et les contraintes se produisent continuellement dans le sens longitudinal. Dans le cas des dalles en béton, les mouvements induits par la température (jusqu'à plusieurs millimètres) et les contraintes sont concentrés au niveau des joints transversaux à des intervalles de 5 m. Cela conduit à des pics de contrainte à proximité de chaque joint transversal. Dans les applications pratiques de cette approche, la pratique a consisté jusqu'à présent à ne pas fermer définitivement ce joint. En conséquence, une fente de drainage est pratiquée dans le béton, par laquelle l'eau pénétrante peut être évacuée dans le sous-sol.

La voie en béton peut également être conçue comme une chaussée en béton armé continu. Au lieu de présenter des joints espacés de 5 m, ce type de construction crée des fissures transversales libres espacées d'environ 0,7 m à 2,5 m avec des ouvertures de fissures de seulement 0,5 mm. Cette

conception structurelle permet de réduire considérablement les pics de tension décrits ci-dessus, d'améliorer l'étanchéité du joint longitudinal et de rendre l'ensemble du système (voies adjacentes en asphalte et en béton) beaucoup plus durable. Le premier site d'essai de ce système a été installé sur une autoroute en Allemagne en 2021 (figure 7.2.3-1).

Le recueil d'études de cas [2-1] contient des cas provenant d'Allemagne, "Chaussée en béton armé continu et asphalte coulé en parallèle : site d'essai sur l'autoroute A61".

7.2.4. Modifications de la conception pour inclure (plus) de joints de dilatation

L'une des caractéristiques du béton durci est qu'il est soumis à des mouvements thermiques : il se dilate lorsque la température augmente et se contracte lorsqu'elle diminue. L'ampleur de la dilatation ou de la contraction d'un matériau sous l'influence de la température est déterminée par le coefficient de dilatation thermique, α . Pour le béton, α est d'environ 10^{-5} m/m/°C.

La formule représentant la déformation non confinée est, quant à elle, la suivante

$$\Delta L = L \cdot \alpha \cdot \Delta T$$

où ΔL est la variation de longueur de la dalle en béton ou de la rangée continue de dalles en béton, ΔT est la différence de température considérée, et L est la longueur mobile de la dalle ou de la rangée de dalles en béton. Pour une longue rangée de dalles, ce n'est qu'aux extrémités que le déplacement sera mesuré lors de la dilatation, alors que, plus loin des extrémités, le mouvement de la chaussée en béton est contrecarré par le poids propre des dalles en façade et l'effet de frottement sur la sous-fondation. En outre, le béton est soumis à d'autres formes de retrait dues à la perte d'eau, notamment le retrait hygrométrique ou plastique au cours du premier jour après le coulage et le retrait de séchage ultérieur du béton durci. Un calcul précis des mouvements possibles d'une chaussée en béton doit tenir compte de toutes ces influences.

La dilatation du béton entraîne des contraintes de compression. Cela ne pose pas de problème en soi, car le béton est très résistant à la compression. De plus, elle crée un effet de précontrainte qui s'oppose aux contraintes de flexion et de traction et qui est donc bénéfique pour la durée de vie de la chaussée. Toutefois, cela suppose que la chaussée en béton ait une épaisseur uniforme, en particulier au niveau des joints, ainsi qu'une qualité uniforme. Si ce n'est pas le cas (par exemple, en raison de réparations locales provisoires dans la chaussée), des forces de compression excentriques peuvent apparaître, entraînant des concentrations de contraintes qui provoquent la fragmentation du béton et, finalement, son gauchissement (également appelé "gonflement" de la chaussée). En d'autres termes, les points faibles de la chaussée en béton sont à l'origine de ce type de désordre.

L'une des mesures permettant d'éviter les gonflements des chaussées en béton jointoyé (JPCP), outre l'assurance d'un mélange de béton uniforme et d'un compactage approprié, consiste à ajouter un certain nombre de joints de dilatation, principalement dans la section d'extrémité de la chaussée (figure 7.2.4-1). Cela permet un certain mouvement de la chaussée et, par conséquent, un soulagement des forces de compression. Le nombre de joints de dilatation à inclure doit être calculé en tenant compte de tous les paramètres pertinents, y compris la température au moment de la construction et le frottement attendu avec la couche de fondation [7.2.4- 1].



Figure 7.2.4-1 : une série de joints de dilatation à l'extrémité d'une chaussée en béton jointoyée, Wisconsin, USA (photo : Luc Rens)

7.2.5. Modifications de la conception pour prendre en compte des gradients de température plus agressifs

Les variations de température et d'humidité sur l'épaisseur des chaussées en béton entraînent des comportements de déflexion uniques appelés gondolage et gauchissement. Les modifications répétées de la courbure des dalles dues à l'incurvation et au gauchissement, combinées à la charge de trafic, peuvent accélérer la rupture par fatigue, y compris les fissures transversales, longitudinales et d'angle descendantes et ascendantes [7.2.5-1].

Wistuba et Walther [7.2.5-2] ont mené une étude de paramètres dans six villes européennes pour prendre en compte les effets du changement climatique dans la conception mécaniste d'une chaussée, en s'appuyant sur la théorie multicouche linéaire-élastique. Dans leur travail, ils ont pris en compte chaque heure de la période de conception afin de calculer les contraintes et les déformations induites par la température dans la chaussée. Ils ont conclu que la connaissance de la température locale est d'une importance capitale, car elle influence les résultats de la conception, et que, pour certains climats de la région de l'Europe centrale, il est nécessaire d'adapter la conception structurelle de la chaussée aux exigences futures. L'étude ne contient pas de recommandations détaillées sur les aspects de la conception qui devraient être adaptés.

7.2.6. Conception de mélanges de béton pour la résistance au gel et au dégel

Des cycles de gel-dégel de plus en plus intenses, combinés à une utilisation accrue des sels de déverglaçage, peuvent entraîner une augmentation des dommages de surface (écaillage) des chaussées en béton (figure 7.2.6-1). Ce phénomène peut être contré soit par une teneur appropriée en air entraîné dans le mélange de béton, soit par l'application d'un scellant hydrophobe sur la surface.



Figure 7.2.6-1 : sels de déverglaçage sur du béton, Belgique (photo : Luc Rens)

7.3. MESURES POUR LES COUCHES DE BASE

7.3.1. Utilisation de couches de base liées

Outre les chaussées en béton, les couches de base à liant hydraulique sont également des solutions robustes car elles peuvent mieux résister aux effets des inondations que les couches granulaires non liées. En effet, les mélanges granulaires liés au ciment (figure 7.3.1-1), y compris le béton maigre et le béton compacté au rouleau, sont des matériaux très résistants à l'érosion et au gel pour les couches de base.



Figure 7.3.1-1 : Couche de base liée au ciment, A14, Belgique, 2011 (photo : Luc Rens)

Le recueil d'études de cas [2-1] contient des études de cas des États-Unis, "Pavement Flood Recovery : an Iowa case study", et de Slovaquie, "Homogenization layer - a green, innovative, sustainable, and resilient answer for reconstruction of existing cement-concrete roads" (couche d'homogénéisation - une solution verte, innovante, durable et résistante pour la reconstruction des routes existantes en béton de ciment).

7.3.2. Utilisation de structures perméables

Une solution potentielle pour faire face à l'effet négatif de l'augmentation de l'intensité des précipitations résultant du changement climatique est l'utilisation de chaussées poreuses comme solution résiliente contre les événements météorologiques extrêmes. À cet égard, Zhu et al [7.3.2-1] ont mené une étude pour simuler l'effet d'une chaussée perméable à l'aide d'un modèle de gestion des eaux pluviales (SWMM) sur le contrôle des eaux pluviales et la réduction du ruissellement de surface. Ce type de revêtement s'est avéré capable de réduire de plus de 50 % le délai d'écoulement et certains écoulements de surface. Dans leur étude, il convient de noter qu'un matériau perméable est défini comme une couche de surface poreuse sur une couche de base en agrégats à granulométrie ouverte. Bien que leur étude ne mentionne pas spécifiquement l'adaptation au changement climatique, ce type de structure de chaussée s'est révélé être une mesure d'adaptation potentielle prometteuse, basée sur l'ingénierie, qui peut être adaptée aux facteurs de stress induits par le changement climatique.

En réalisant de telles interventions d'adaptation, il est important d'être conscient des problèmes spécifiques à ce type de chaussée, y compris ceux relatifs à la durabilité et à la fonctionnalité. Par exemple, une étude de Hu et al [7.3.2-2] a étudié expérimentalement la sensibilité à l'humidité et l'évolution de l'endommagement des mélanges bitumineux poreux, et leur principale conclusion est que la sensibilité à l'humidité des mélanges bitumineux poreux est préoccupante en cas d'endommagement par l'humidité à long terme. Ils ont également constaté que la résistance à la traction et le module de résilience diminuaient avec l'augmentation des cycles de chargement et ont noté que, pour prolonger la durée de vie des enrobés bitumineux poreux, un entretien est nécessaire lorsque la diminution de ces propriétés dépasse 60 %. En outre, il a été constaté que les dommages causés par l'humidité avaient une influence significative, et un effet accélérateur, sur l'évolution des dommages des enrobés bitumineux poreux. Le lecteur intéressé pourra se référer à Wu et al. [7.3.2-3] pour une discussion sur la durabilité et la fonctionnalité, ainsi que sur les dégradations courantes des mélanges de couches de roulement à granulométrie ouverte (c'est-à-dire le terme général pour le béton bitumineux poreux).

Le recueil d'études de cas [2-1] contient un cas du Canada, "Permeable pavement to improve resilience of infrastructure" (revêtement perméable pour améliorer la résilience des infrastructures).

7.3.3. Infiltration ou tamponnement des eaux de pluie

Le changement climatique peut avoir des effets négatifs sur la gestion de l'eau. Il a été noté, par exemple, que de longues périodes de sécheresse peuvent faire baisser le niveau des eaux souterraines, au point que le niveau des rivières et des canaux peut devenir si bas que le transport par voie d'eau est perturbé [7.3.3-1]. Lorsque les pluies reviennent, il est crucial de profiter de l'occasion pour élever le niveau de la nappe phréatique autant que possible. C'est pourquoi il faut

éviter d'évacuer immédiatement les eaux de ruissellement des chaussées vers les réseaux d'égouts ou de drainage ou vers les rivières et la mer via les canaux.

Il existe plusieurs méthodes pour infiltrer les eaux de pluie au niveau local :

- infiltration de surface : l'eau de ruissellement de la chaussée s'infiltré directement dans le sol
- infiltration souterraine : les eaux de ruissellement des chaussées s'infiltré dans le sol par le biais d'une infrastructure d'infiltration souterraine spécialisée
- infiltration mixte : une combinaison d'infiltration de surface et d'infiltration souterraine est utilisée

Il est préférable de recourir à l'infiltration de surface (espaces verts, fossés, prairies d'infiltration). Dans ce cas, un mode de construction spécifique n'est pas nécessaire ; l'efficacité du système peut être observée visuellement et, si nécessaire, restaurée, et l'entretien est relativement facile. Cependant, dans certains cas, l'infiltration de surface n'est pas réalisable, comme dans les zones urbaines denses, les zones avec peu de surface disponible pour les espaces verts et les zones industrielles où l'infiltration n'est pas envisageable en raison du risque de pollution.

L'état du sol, en particulier sa perméabilité, qui détermine ses capacités d'infiltration, est crucial pour l'infiltration. Dans les sols très perméables (par exemple, le sable), l'eau de pluie peut facilement s'infiltrer (figure 7.3.3-1). Dans le cas de sols peu perméables (par exemple, l'argile), l'eau doit être tamponnée sous terre avant d'être évacuée tardivement.

Il existe plusieurs solutions d'infiltration souterraine [7.3.3-2] :

- chaussées perméables
- tuyaux d'infiltration horizontaux en matériau synthétique (PVC, HDPE, etc.) dans du béton poreux
- drains d'infiltration verticaux
- boîtes d'infiltration
- renforcement géotextile avec drainage amélioré en plan



Figure 7.3.3-1 : Parking de covoiturage à Kruisem avec prairies d'infiltration, fossés d'infiltration et revêtements bitumineux perméables (photo : Agence des routes et de la circulation, Belgique)

Le recueil d'études de cas [2-1] contient un cas belge, "Rainwater storage in base layers in Flanders" (stockage des eaux de pluie dans les couches de base en Flandre).

7.3.4. Utilisation de couches de protection contre le gel

Lorsque les routes des régions froides sont construites sur des sols sous-jacents sensibles au gel, des précautions particulières doivent être prises. Lors du gel, ces sols peuvent absorber de l'eau supplémentaire dans la zone de gel, ce qui provoque un soulèvement dû au gel et, par conséquent, un effet négatif important sur les conditions de conduite. De plus, lors du cycle de dégel suivant, la teneur en eau plus élevée peut entraîner de graves problèmes de portance, réduisant à la fois l'aptitude à l'emploi et la durée de vie théorique de la route.

Dans ce cas, le gel doit être limité à la superstructure de la route. Ceci peut être réalisé en plaçant une couche supplémentaire de protection contre le gel sous la couche de fondation (figure 7.3.4-1), empêchant ainsi le gel de pénétrer dans le matériau de la couche de fondation. Cette couche sert alors également de couche supplémentaire nécessaire pour satisfaire aux exigences de portance.

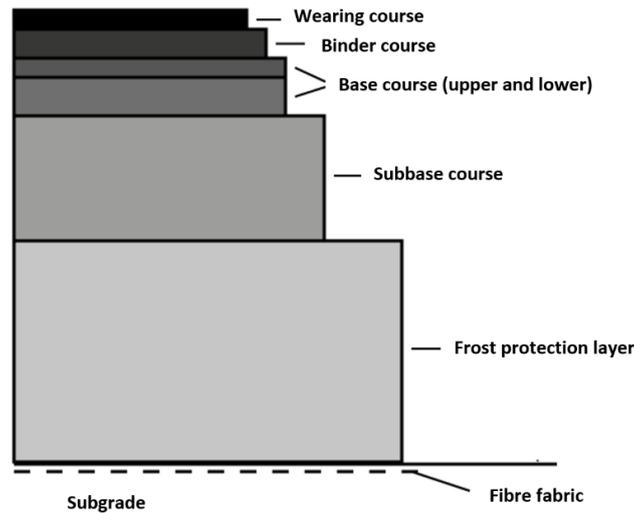


Figure 7.3.4-1 : Construction d'une route norvégienne typique avec couche de protection contre le gel (route à fort trafic, couche de fondation de mauvaise qualité).

Divers matériaux peuvent être utilisés pour la protection contre le gel. En fonction du choix du matériau et des conditions hivernales, l'épaisseur peut varier considérablement de 0,05 m à 1,0 m.

Agrégats naturels ou concassés

L'agrégat utilisé dans cette couche doit être un matériau bien calibré dont la taille des particules ne dépasse pas 200 mm. En termes de protection thermique, le facteur clé est la quantité d'eau que le matériau peut retenir. Il est préférable d'avoir une distribution de particules plus fines et bien calibrées afin d'augmenter le taux de rétention d'eau. Les valeurs typiques de conductivité thermique sont comprises entre 0,5 W/mK et 1,5 W/mK.

Agrégats légers

Il existe deux types d'agrégats légers : la mousse de verre et l'argile expansée. Ces matériaux sont très semblables l'un à l'autre en termes de propriétés isolantes, chacun ayant une conductivité thermique à l'état sec d'environ 0,1 W/mK. Dans les conditions de terrain où les matériaux adsorbent un peu d'eau à la surface des particules, la conductivité thermique est d'environ 0,18 W/mK. L'épaisseur typique d'une couche de protection contre le gel composée d'agrégats légers se situe entre 0,2 et 0,5 m.

Polystyrène extrudé (XPS)

Le polystyrène extrudé (XPS) est le plus efficace de tous les matériaux de protection contre le gel, avec une conductivité thermique d'environ 0,025 W/mK. En raison de sa faible conductivité thermique, l'épaisseur typique de la couche varie de 50 mm à 100 mm. Le XPS doit être installé entre des couches de matériaux fins afin d'éviter tout dommage.

Renforcement géotextile avec drainage amélioré en plan

Le renforcement géotextile avec un drainage amélioré en plan peut réduire la formation de lentilles de glace et le soulèvement de la chaussée grâce à l'élimination rapide de l'infiltration des précipitations (figure 7.3.4-2). Il peut également réduire l'affaiblissement de la plate-forme grâce au renforcement et à l'évacuation rapide de l'eau des lentilles de fonte. Par conséquent, elle aide à

prévenir la saturation de la plate-forme et minimise la formation de lentilles de glace pendant la saison de gel.

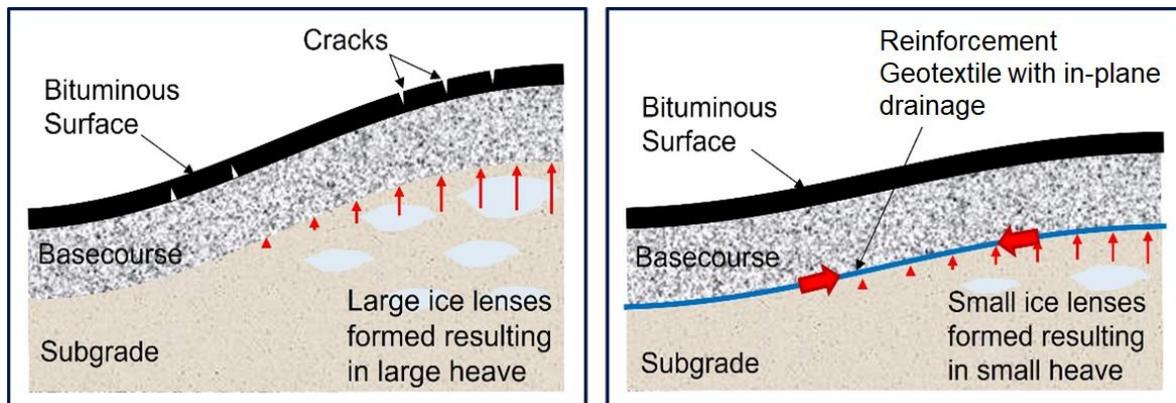


Figure 7.3.4-2 : Reinforcement par géotextile.

Le recueil d'études de cas [2-1] contient des études de cas de Norvège, "Performance des matériaux de protection contre le gel pour la conception des routes", et du Canada, "Performance de différents matériaux d'isolation".

7.3.5. Remplacement ou stabilisation de la couche de fondation

Le rétrécissement de la base non liée et de la couche de fondation résulte généralement des cycles humides et secs dus aux changements climatiques saisonniers, ainsi que de la diminution de la nappe phréatique due à des périodes de sécheresse prolongées. Les variations de la pression de l'eau interstitielle qui en résultent, qu'elles soient positives ou négatives (suction), peuvent induire une déformation plastique et provoquer des fissures de tension sur la chaussée. En outre, l'eau de surface peut pénétrer par les fissures, la résistance au cisaillement mobilisée peut diminuer et une défaillance progressive peut se produire. Les cycles d'humidification et de séchage des sols à retrait-gonflement induisent souvent d'importantes déformations de retrait et de gonflement, entraînant des changements volumétriques et des défaillances correspondantes sous la forme de fissures et de soulèvements. Ces fissures qui se développent dans les chaussées peuvent en outre permettre l'intrusion d'humidité dans la couche de fondation, ce qui entraîne un affaiblissement de la couche de fondation et la perte du support de fondation de la chaussée [7.3.5-1, 7.3.5-2]. Luo et Prozzi [7.3.5-3] ont constaté que les variations non uniformes de la suction matricielle dans la couche de fondation peuvent provoquer des contraintes de retrait dans la couche de fondation et la structure de la chaussée, et que cette concentration de contraintes peut être suffisamment importante pour pousser la fissure à se propager plus loin jusqu'à la surface de la chaussée. Take et Bolton [7.3.5-4] ont observé que les cycles saisonniers de pression interstitielle dans la pente peuvent également entraîner le mécanisme de fluage de la pente, conduisant finalement à une rupture progressive par le développement de fissures vers la crête de la pente et une rupture par cisaillement au pied de la pente. Les facteurs influençant le retrait-gonflement des sols comprennent les propriétés du sol (par exemple, la minéralogie de l'argile, la plasticité, la densité, le taux de vide, etc.), les facteurs environnementaux (par exemple, le climat, les eaux souterraines, la végétation, le drainage, etc.) et l'état de contrainte (par exemple, la contrainte normale nette, la contrainte de suction, etc.).

La stabilisation de la base et de la couche de forme est la mesure la plus efficace lorsqu'il s'agit de sols sensibles au retrait-gonflement sous l'effet des variations de la teneur en eau. L'efficacité de la chaux, du ciment et des cendres volantes pour la stabilisation de la base et de la couche de forme

dépend des caractéristiques physico-chimiques du sol et des additifs. L'application de différents types et quantités d'additifs chimiques peut entraîner des variations de la résistance, de la durabilité et de la performance de la base et de la couche de forme stabilisées. La stabilisation au ciment est plus efficace pour les sols granulaires et peu plastiques, par exemple les sols limoneux et sableux, tandis que la stabilisation à la chaux convient mieux aux sols cohésifs et très plastiques, par exemple les sols argileux, l'argile expansive, etc. La stabilisation par les cendres volantes ne présente pas un degré similaire de résistance, d'ouvrabilité ou de durabilité en raison de sa teneur relativement faible en chaux (ou en calcium). La combinaison de différents additifs peut être plus efficace pour améliorer les sols problématiques. Par exemple, l'ajout de cendres volantes avec de la chaux à des sols expansifs s'est avéré améliorer les performances par rapport aux cendres volantes seules [7.3.5-6], et l'ajout de chaux dans un mélange argile-cendres volantes s'est avéré efficace pour réduire les propriétés de gonflement des sols expansifs [7.3.5-7].

7.4. AUTRES MESURES

7.4.1. Prise en compte des inondations majeures dans la conception du système de drainage

Outre la surcharge, des facteurs environnementaux tels que les températures extrêmes et la présence d'eau, principalement dans la structure de la chaussée, peuvent affecter de manière significative la détérioration de la chaussée. La principale préoccupation à cet égard est qu'une combinaison de ces facteurs (à savoir des routes minces ou non revêtues, une rigidité du béton bitumineux inadaptée à la température de service, un mauvais entretien des routes et une surcharge due à l'absence d'application de la réglementation) peut représenter des scénarios critiques, qui se produisent le plus souvent ensemble dans les pays à faible et moyen revenu. Ces combinaisons de facteurs peuvent réduire la durée de vie de la chaussée à moins de la moitié de la durée de vie prévue [7.4.1-1].

7.4.2. Conception de la chaussée pour des charges par essieu précises

Les charges maximales par essieu sont directement liées aux paramètres de conception de l'infrastructure par la loi de puissance 4th (dans le cas des chaussées souples) et par les lois de puissance 6th à 12th (dans le cas des chaussées semi-rigides et rigides). Ainsi, les dommages subis par l'infrastructure lorsque les limites de conception sont dépassées sont exponentiels. En retour, des dommages supplémentaires (dus à la surcharge) entraînent un besoin accru de réparations et d'entretien [7.4.1-1].

En particulier pour les chaussées souples, qui se caractérisent par des couches de roulement en asphalte mince et une couche de fondation faible, une surcharge croissante ou soutenue peut entraîner une accélération de la fissuration par fatigue et de l'orniérage secondaire. En fait, la défaillance totale (rupture) peut être atteinte en quelques jours seulement dans le cas des chaussées souples (par exemple, les routes secondaires), si les charges de trafic dépassent de manière significative les charges de conception.

En outre, avec l'augmentation des températures, comme indiqué au point 7.1.7, les lois de défaillance des chaussées doivent être adaptées. On peut s'attendre à ce que les mécanismes de détérioration des chaussées deviennent plus importants en raison du changement climatique, car l'orniérage de la couche de roulement et la fissuration rapide du haut vers le bas due au vieillissement accéléré du bitume deviennent plus prononcés.

Toutefois, la résistance des chaussées peut être améliorée si la conception est adaptée aux futures charges par essieu prévues et si le contrôle du poids du trafic peut être assuré de manière adéquate, en utilisant, par exemple, des systèmes de poids en mouvement.

Les changements apportés à l'alimentation électrique avec la mise en œuvre de véhicules lourds à zéro émission (ZEV) devraient augmenter la charge par essieu en raison de l'augmentation du poids des batteries (figure 7.4.2-1) [7.4.2-1]. En outre, la tendance est à l'augmentation du poids et des dimensions des véhicules de transport de marchandises lourdes, ainsi qu'à l'utilisation accrue des systèmes modulaires européens (EMS) pour le transport routier de marchandises. La conception de la chaussée doit tenir compte de ces tendances afin de garantir la résilience de l'infrastructure.

Le recueil d'études de cas [2-1] contient un cas du Portugal, "Simplified pavement solutions for roundabout intersections - standard catalog", et un cas de la République tchèque, "Use of fibreglass grids to improve the durability of repaired low-volume roads" (utilisation de grilles en fibre de verre pour améliorer la durabilité des routes à faible trafic réparées).



Figure 7.4.2-1 Camion à pile à combustible de la prochaine génération (photo : Toyota Motor Corporation, <https://global.toyota/>).

7.4.3. Conception de la chaussée en fonction de niveaux de trafic précis et prévus

L'effet de la surcharge sur la durée de vie résiduelle de la chaussée dépend de divers facteurs, tels que le type de trafic, la répartition de la charge, les roues et la suspension du véhicule, ainsi que le type de chaussée et son état, son épaisseur, son uniformité, sa fissuration, etc. Les conséquences de la surcharge peuvent être atténuées de plusieurs façons, notamment en améliorant les pratiques de chargement des véhicules, en réduisant la fréquence et la gravité des surcharges par un contrôle plus strict, en utilisant des systèmes de suspension respectueux de la route et en appliquant des principes de conception des routes qui tiennent compte des charges de trafic lourdes et des conditions de température locales. Le principe directeur de la conception des infrastructures routières devrait être de tenir compte de la situation réelle, et non d'une situation idéale avec une

conformité parfaite. Cela nécessite bien sûr une bonne compréhension des charges réelles et prévues des véhicules, et donc des pratiques de contrôle efficaces [7.4.1-1].

Aujourd'hui, il est possible de disposer d'un registre complet du trafic sur un tronçon de chaussée donné. Néanmoins, les niveaux de trafic peuvent varier dans le temps sur une section de route donnée. Les informations recueillies au cours de la durée de vie de la route peuvent servir de base à l'adoption de pratiques d'entretien et de réhabilitation adéquates et opportunes, fondées sur des relevés réalistes des niveaux de trafic. Une approche itérative de la conception de la chaussée peut être utilisée pour adapter la conception en tenant compte des niveaux de trafic réels [7.4.3-1].

En outre, il existe des pratiques qui peuvent être appliquées pour prolonger la durée de vie de la chaussée. Il s'agit notamment d'assurer une bonne répartition de la charge entre les essieux du véhicule, d'utiliser des pneus jumelés et - ce qui est le plus important - d'entretenir efficacement les routes afin de minimiser les irrégularités et les ondulations et d'empêcher la stagnation de l'eau à la surface et l'infiltration de l'eau dans la structure de la chaussée.

7.4.4. Répartition de la charge sur la voie pour réduire l'impact du platooning

L'automatisation des véhicules a suscité un intérêt croissant pour la mise en œuvre de camions autonomes connectés en "pelotons" (figure 7.4.4-1). Le platooning vise à réduire la fatigue des conducteurs, les embouteillages, la consommation de carburant et les émissions de gaz à effet de serre, ainsi qu'à améliorer la sécurité routière. Cependant, le peloton génère des configurations de contraintes de charge qui ne sont généralement pas prises en compte dans la conception classique des structures de chaussée. Compte tenu de la nature viscoélastique des couches d'asphalte, la courte distance entre les camions et l'absence de déambulation entre les camions pendant le platooning signifient qu'il y a peu de relaxation des contraintes de charge entre les camions par rapport aux charges de trafic traditionnelles (voir l'augmentation des pics de contrainte illustrée à la figure 7.4.4-1). Ainsi, pour le même nombre de camions, on observera une augmentation des dommages cumulés dus à la fatigue et une réduction de la durée de vie de la chaussée si des mesures ne sont pas prises pour contrer ces effets.

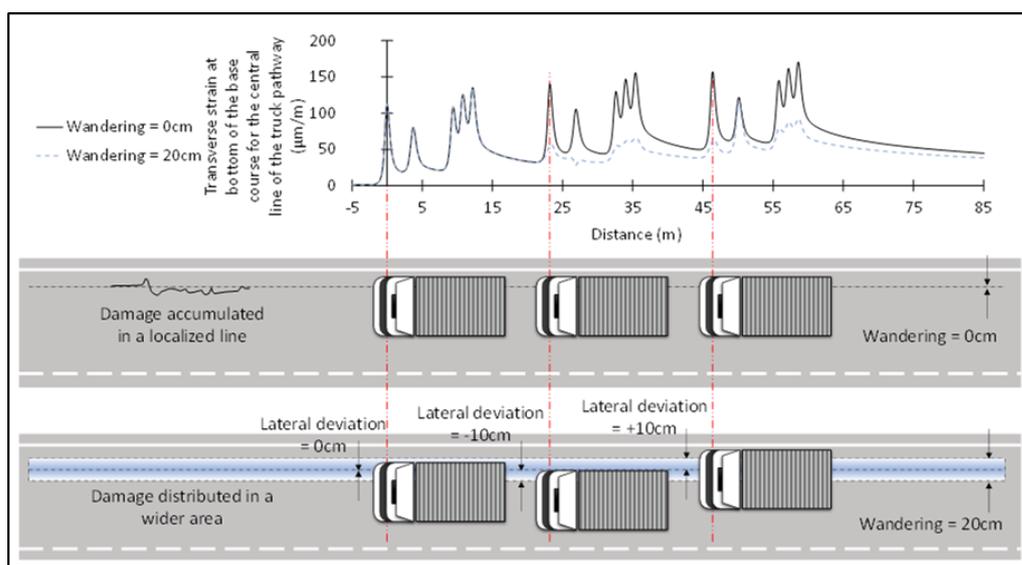


Figure 7.4.4-1 : exemple de schémas de déambulation entre les camions du peloton (vitesse du camion = 80 km/h, température de la chaussée = 35 °C, écart de temps entre les camions = 0,5 s).

Plusieurs études récentes ont évalué l'impact du platooning sur la durée de vie des chaussées. Parmi elles, le module de travail 4 du récent projet européen Ensemble (programme de recherche et d'innovation H2020, convention de subvention n° 769115) a évalué des solutions à grande échelle pour atténuer ce problème et augmenter la résilience des chaussées soumises au platooning. Les effets de paramètres tels que la distribution du trafic au cours d'une année et d'une journée, la part des pelotons dans le trafic global, la charge des camions, le nombre de camions dans la configuration du peloton, la déviation latérale et les distances entre les camions ont tous été évalués. Cette étude a démontré l'importance de configurer soigneusement ces paramètres de manière à assurer la mise en œuvre réussie de l'automatisation des véhicules et de la formation de pelotons sans compromettre de manière significative la durée de vie de la chaussée. Des projections récentes basées sur la modélisation numérique ont déjà montré que l'augmentation du déport latéral des roues et l'augmentation de la distance inter-véhicules peuvent être des stratégies efficaces pour gérer les configurations de pelotonnage. Par exemple, ces études ont révélé que, pour les camions roulant en peloton de trois camions à 80 km/h avec un écart de 0,8 s entre les camions et une déviation latérale de ± 20 cm, les dommages associés à la fatigue de la chaussée seront 58 % plus élevés que lorsqu'on utilise uniquement des camions conduisant individuellement (écarts de temps entre les véhicules de 3 s ou plus). Parallèlement, il a été démontré que, si une déviation latérale plus importante de ± 40 cm est maintenue pour ces pelotons, les dommages liés à la fatigue peuvent être limités à seulement 37 %. Cette analyse montre que l'augmentation de la déviation latérale est une option prometteuse pour atténuer les dommages causés à la chaussée par les pelotons.

L'un des principaux avantages potentiels du platooning est que les autorités routières ont la possibilité d'influencer les paramètres selon lesquels les camions en platooning circulent sur la route. En fonction de l'état de la chaussée et de la situation spécifique, les autorités routières peuvent imposer un certain intervalle, une vitesse maximale, le nombre de camions dans un peloton, des intervalles de temps entre les camions et même un positionnement latéral.

Le recueil d'études de cas [2-1] contient un cas de la France, "Évaluation du platooning des camions sur les structures routières".

7.4.5. Utilisation de matériaux à changement de phase

Les matériaux à changement de phase (MCP) sont des matériaux qui peuvent absorber ou libérer de la chaleur à une certaine température lorsqu'ils fondent ou se solidifient, c'est-à-dire lorsqu'ils changent de phase entre la phase solide et la phase liquide. Il existe différents types de MCP :

- organiques : paraffines ou composés non paraffiniques (éther, glycol, etc.)
- inorganiques : hydrates de sel ou métaux
- Types eutectiques : mélange de différents types de MCP (organique-inorganique, organique-organique ou inorganique-inorganique).

La température de fonctionnement peut être gérée efficacement en sélectionnant le MCP approprié. Il est ainsi possible d'éviter ou de réduire les températures extrêmes dans le matériau.

Les MCP ont été utilisés avec succès à cette fin dans les mélanges d'asphalte [7.4.5-1] et de béton [7.4.5-2]. Il a été démontré que l'incorporation de MCP ayant une température de transition de phase, une enthalpie de changement de phase et un degré de dispersion appropriés dans les mélanges de béton atténuait la fissuration thermique et la détérioration liée au gel et au dégel

[7.4.5-3]. L'utilisation de MCP dans les enrobés bitumineux, quant à elle, peut réduire la température de la chaussée bitumineuse (pour réduire l'orniérage ou l'effet d'îlot de chaleur, par exemple), ou peut être appliquée pour augmenter la température afin d'atténuer la fissuration à basse température.

Il existe plusieurs techniques pour incorporer des MCP dans les mélanges d'asphalte ou de béton :

- l'encapsulation : Les MCP sont encapsulés dans une enveloppe protectrice d'un diamètre de 1 μm à 1 mm (micro-encapsulation) ou supérieur à 1 mm (macro-encapsulation),
- la stabilisation de la forme : Les MCP sont absorbés par des matériaux poreux (par exemple, des agrégats légers),
- l'incorporation directe.

8. CONCLUSIONS

Une chaussée résiliente peut maintenir sa fonction en dépit des contraintes causées par le changement climatique, les charges de trafic élevées et, dans certains cas, les catastrophes naturelles ou causées par l'homme. Plusieurs mesures permettent d'accroître la résilience d'une chaussée aux effets du changement climatique et à l'évolution des charges de trafic. Il est plus difficile de rendre une chaussée résistante aux catastrophes naturelles ou causées par l'homme en raison de l'impact perturbateur extrême de ces événements et de l'âge, de l'état, des caractéristiques et de l'emplacement des chaussées, qui influencent leur vulnérabilité.

Certaines mesures de résilience sont liées au choix du matériau de chaussée lui-même, tandis que d'autres peuvent être liées à la conception et à la construction de la route ou à la manière dont l'infrastructure est gérée et entretenue. Certaines technologies visant à améliorer la résilience, bien que bien établies d'un point de vue technique, n'ont pas encore été acceptées comme pratique standard dans certaines juridictions ou par certains propriétaires d'infrastructures routières. Il s'agit notamment de l'utilisation de couches de base ou de revêtements en béton traités au ciment pour rendre la chaussée plus robuste, et de l'utilisation de bitume modifié par des polymères pour modifier les propriétés des revêtements en asphalte.

Une évaluation ou une prévision précise des facteurs d'agression de la chaussée peut conduire à une méthode de conception adaptée pour l'ensemble de la structure routière, où les adaptations peuvent inclure des températures de conception plus élevées, la conception pour des charges de trafic précises, et la prise en compte de cycles de gel-dégel plus fréquents.

Les mesures proposées dans ce rapport peuvent être appliquées dans tous les pays, qu'il s'agisse des pays à revenu élevé ou des pays à faible revenu, où les facteurs d'agression sont présents.

9. RECOMMANDATIONS

9.1. RECOMMANDATIONS POUR LES DÉCIDEURS

Une structure de chaussée peut être conçue et construite pour être plus résistante au changement climatique, au trafic et aux facteurs de stress naturels ou artificiels :

- en utilisant une méthode de conception adaptée pour prendre en compte les changements futurs du climat et des charges de trafic
- en utilisant des matériaux et des méthodes de construction innovants

Une combinaison de mesures peut s'avérer nécessaire pour traiter de manière adéquate les facteurs de stress multiples et augmenter ainsi la résilience d'une chaussée.

9.2. RECOMMANDATIONS POUR PIARC

Ce rapport se concentre sur les mesures prises lors de la phase de conception pour réduire l'impact d'un danger et modifier sa courbe de fonctionnalité afin de réduire la perte de résistance. Les techniques visant à minimiser le temps de récupération ne sont pas abordées ici et pourraient faire l'objet d'un rapport ultérieur.

10. GLOSSAIRE

Durée	Définition
CR	caoutchouc friable
BAC	chaussée en béton armé continu
EV	véhicule électrique
GES	gaz à effet de serre
HMA	asphalte à chaud
ICU	îlot de chaleur urbain
JPCP	chaussée en béton uni jointoyé
MCP	matériau à changement de phase
PFR-PRI	pays à revenu faible et intermédiaire
PmB	bitume modifié par des polymères
rigidité	la capacité à résister à la déformation

11. RÉFÉRENCES

- [1-1] PIARC (2021) Document interne 2021BN1.4EN, Terminologie sur la résilience et coordination avec les comités techniques connexes de PIARC.
- [1-2] L. F. Gay, S. K. Sinha (2013) Resilience of Civil Infrastructure Systems : Literature Review for Improved Asset Management ; International Journal of Critical Infrastructures, janvier 2013. <https://www.researchgate.net/publication/264437671>
- [2-1] PIARC (2022) Recueil d'études de cas 2022R25EN, Mesures d'amélioration de la résilience des chaussées.
- [3.1-1] A. Choate, B. Dix, A. Wong, B. Rodehorst, W. Jaglom, J. Keller, J. Lennon, C. Dorney, R. Kuchibhotla, J. Mallela (2017) Synthèse des approches de prise en compte de la résilience dans le développement des projets ; Federal Highway Administration : Washington, DC, États-Unis.
- [3.1-2] T. Stocker (2013) Changement climatique 2013 : The Physical Science Basis : Contribution du groupe de travail I au cinquième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat ; Cambridge University Press : Cambridge University Press : Cambridge, UK.
- [3.1-3] S. Muench, T. Van Dam (2015) Climate Change Adaptation for Pavements. [Techbrief] No. FHWA-HIF-15-015 ; Federal Highway Administration : Washington, DC, USA.
- [3.1-4] M. Meyer, M. Flood, J. Keller, J. Lennon, G. McVoy, C. Dorney, K. Leonard, R. Hyman, J. Smith (2014) Strategic Issues Facing Transportation : Climate Change, Extreme Weather Events, and the Highway System : Practitioner's Guide and Research Report ; NCHRP Report 750 ; Transportation Research Board of the National Academies : Washington, DC, USA.
- [3.1-5] E. Rowan, C. Evans, M. Riley-Gilbert, R. Hyman, R. Kafalenos, B. Beucler, B. Rodehorst, A. Choate, P. Schultz (2013) Assessing the Sensitivity of Transportation Assets to Extreme Weather Events and Climate Change ; Transportation Research Record. 2013, 2326, 16-23. <https://doi.org/10.3141/2326-03>
- [3.2-1] G. Wang, R. Roque (2011) Impact of Wide-Based Tires on the Near-Surface Pavement Stress States Based on Three-Dimensional Tire-Pavement Interaction Model ; Road Materials and Pavement Design 12(3), 639-662. <http://dx.doi.org/10.1080/14680629.2011.9695264>
- [3.2-2] R. R. Fedujwar, U. C. Sahoo (2023) Pavement Responses Under Wide Base Tyres Subjected to Moving Loads ; International Journal of Transportation Science and Technology, 12(2), 549-559. <https://doi.org/10.1016/j.ijtst.2022.05.006>
- [3.2-3] J. Ponniah, R. Haas, Z. Jiang, R. Madill (2009) Wide Base Single Tires vs. Dual Tires : Assessment of Impact on Asphalt Pavements ; In Proceedings of the Annual Conference of the Transportation Association of Canada ; Vancouver, British Columbia, Canada.

- [3.2-4] M. M. Nojumi, M. Basavarajappa, L. Hashemian, A. Bayat (2021) Investigation of the Impact of Tire Configurations on Different Pavement Structures Using Finite Element Analysis ; International Journal of Pavement Research and Technology, 15(4), 847-862. <http://dx.doi.org/10.1007/s42947-021-00057-7>
- [3.2-5] J.M. Low, R.S. Haszeldine, G.P. Harrison (2022) The Hidden Cost of Road Maintenance Due to the Increased Weight of Battery and Hydrogen Trucks and Buses - a Perspective ; Clean Technologies and Environmental Policy, 25, 757-770.
- [3.2-6] J.M. Low, S. Haszeldine, G. Harrison (2022). Weight Gain of Battery and Hydrogen Zero Emission Vehicles Over Internal Combustion Vehicles : Consequential Increases in Road Wear ; Preprint. DOI: 10.21203/rs.3.rs-1435405/v1
- [3.2-7] J. Harvey, A. Saboori, M. Miller, C. Kim, M. Jaller, J. Lea, A. Kendall, A. Saboori (2020) Effects of Increased Weights of Alternative Fuel Trucks on Pavement and Bridges, University of California Institute of Transportation Studies, Davis, CA, USA, Report No. UC-ITS-2020-19, 99 pages.
- [3.2-8] CEN (2021) Lignes directrices pour l'évaluation de la résilience des infrastructures de transport face à des événements potentiellement perturbateurs, CWA 17819.
- [3.2-9] M. I. Khan, S. Y. B. Z. Abidin, M. H. Sutanto, F. Wong, M. Bujang (2021) Simulating the Impact of Vehicle Speed on the Life of Bituminous Pavement ; IOP Conference Series : Earth and Environmental Science, Volume 1022, Proceedings of the 6th International Conference on Civil and Environmental Engineering for Sustainability (IConCEES 2021). <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/1022/1/012040>
- [3.2-10] D. Lu, S. Tighe, W.-C. Xie (2018) Impact of Flood Hazards on Pavement Performance ; International Journal of Pavement Engineering 21(6), 746-752. <http://dx.doi.org/10.1080/10298436.2018.1508844>
- [3.2-11] M. O. Popoola, O. A. Apampa, O. Adekitan (2020) Impact of Pavement Roughness on Traffic Safety under Heterogeneous Traffic Conditions ; Nigerian Journal of Technological Development, 17(1). <https://doi.org/10.4314/njtd.v17i1.2>
- [3.3-1] F. Salour, S. Erlingsson (2014) Impact of Groundwater Level on the Mechanical Response of a Flexible Pavement Structure, VTI rapport 808A ; <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:706306/FULLTEXT01.pdf>
- [3.3-2] S. T. Swarna, K. Hossain (2022) Climate Change Impact and Adaptation for Highway Asphalt Pavements : A Literature Review ; Canadian Journal of Civil Engineering, 49(7), 1109-1120. <https://doi.org/10.1139/cjce-2021-0209>
- [3.3-3] C.E. Zapata, D. Andrei, M.W. Witzczak (2007) Incorporation of Environmental Effects in Pavement Design ; Road Materials and Pavement Design, 8(4), 667-693. <http://dx.doi.org/10.1080/14680629.2007.9690094>
- [6.2-1] PIARC (2022) Revue de la littérature, Accroître la résilience des ouvrages en terre face aux aléas naturels.
- [6.2-2] PIARC (2022) Collection d'études de cas, Résilience des ouvrages en terre.

- [6.5-1] S. J. Williams (2017) Infrastructure, Emergency Management, and the Military : Climate and Social Drivers of Vulnerability ; Environment and Planning C : Politics and Space, 35(3), 392-414.
- [6.5-2] R.G. Thompson, R.D. Warburton (2017) The Impacts of Political Instability on Public Service Delivery ; World Development, 96, 128-142.
- [6.5-3] R. Picciotto, C. Dandeker (Eds.) (2018) Roads : An Anthropology of Infrastructure and Expertise ; Cornell University Press.
- [6.5-4] F. Laczko, C. Aghazarm (2009) Migration, Environment and Climate Change : Assessing the Evidence ; Organisation internationale pour les migrations (OIM) Migration Research Series No. 31.
- [6.5-5] Groupe d'évaluation indépendant (2015) World Bank Group Assistance to Low-Income Fragile and Conflict-Affected States : Une évaluation indépendante.
- [6.5-6] L.A. Fast, A.J. Weigert (2016) A Conceptual Framework for Understanding the Direct and Indirect Effects of Natural Disasters and Technological Accidents on Industrial Facilities ; Natural Hazards Review, 17(3), 04016002.
- [6.5-7] Fonds monétaire international (FMI) (2015) Public Investment in a Developing Country : Le cas de l'infrastructure routière au Nigeria.
- [7.1.1-1] R. N. Hunter, A. Self, J. Read, chapitre 8 ; dans le Shell Bitumen Handbook, 6th Edition, pp. 149-180.
- [7.1.1-2] D. Wisniewski, M. Slowik, J. Kempa, A. Lewandowska, J. Malinowska (2020) Assessment of Impact of Aramid Fibre Addition on the Mechanical Properties of Selected Asphalt Mixtures ; Materials, 13(15), 3302.
- [7.1.1-3] H. Zhang, Y. Zhang, J. Chen, W. Liu, W. Wang (2022) Effect of Desulfurization Process Variables on the Properties of Crumb Rubber Modified Asphalt ; Polymers, 14(7), 1365.
- [7.1.1-4] U. Isacson, X. Lu (1999) Characterization of Bitumens Modified with SEBS, EVA and EBA Polymers, Journal of Materials Science, 34, 3737-3745.
<https://doi.org/10.1023/A:1004636329521>
- [7.1.1-5] I. Gawel, M. Kalabinska, J. Pilat (2001) Road bitumen, WKŁ, 2nd Edition, pp. 145-179.
- [7.1.1-6] K. Blazejowski, M. Wojcik-Wisniewska, W. Baranowska (2018) Bitumen Handbook 2018, Orlen Asphalt Sp.
- [7.1.1-7] FHWA (2021) Recycled Tire Rubber-Hybrid GTR Binders and Dry Added GTR - How to use the in Asphalt Pavement Mixtures, Publication Number FHWA-HIF-22-011,
https://www.fhwa.dot.gov/pavement/recycling/Recycle_Tire_Rubber_Mixture.pdf
- [7.1.1-8] L. Santucci (2009) Rubber Roads : Waste Tires Find a Home, Technology transfer program, 1(2).
- [7.1.1-9] S.M. Abtahi, M. Sheikhzadeh, S.M. Hejazi (2010) Fiber-Reinforced Asphalt-Concrete - A Review ; Construction and Building Materials, 24, 871-877.

- [7.1.1-10] F. Gou, R. Li, S. Lu, Y. Bi, H. He (2020) Evaluation of the Effect of Fiber Type, Length, and Content on Asphalt Properties and Asphalt Mixture Performance ; *Materials*, 13(7), 1556.
- [7.1.1-11] P. Caputo, A.A. Abe, V. Loise, M. Porto, P. Calandra, R. Angelico, C.O. Rossi (2020) The Role of Additives in Warm Mix Asphalt Technology : An Insight into Their Mechanisms of Improving an Emerging Technology ; *Nanomaterials*, 10, 1202.
- [7.1.4-1] T. Schroedter, P. Sivapatham (2022) Development of Asphalt Pavement with Regard to the Thermo-physical and Photometric Material Properties ; In Proceedings of the 16th World Winter Service and Road Resilience Congress, PIARC, Calgary, 7-11 February 2022.
- [7.1.3-1] I.G. do Nascimento Camargo, T.B. Dhia, A. Loulizi, B. Hofko, J. Mirwald (2021) Anti-Aging Additives : Proposed Evaluation Process Based on Literature Review ; *Road Materials and Pavement Design*, Volume 22. <https://doi.org/10.1080/14680629.2021.1906738>
- [7.1.5-1] J.J. Emery, P. Guo, D.F. Stolle, J. Hernandez, L. Zhang, (2014) Light-Coloured Grey Asphalt Pavements : From theory to practice ; *International Journal of Pavement Engineering* , 15, 23-35.
- [7.1.6-1] Association mondiale de la route (2013) Dealing with the Effects of Climate Change on Road Pavements ; A Report of Working Group ; Association mondiale de la route : Paris, France ; Volume 5.
- [7.1.7-1] A. Dawson (2010) Pavement Performance and Remediation Requirements Following Climate Change (P2R2C2) ; Summary Final Report, ERA-NET ROAD ; University of Nottingham : Nottingham, UK.
- [7.1.7-2] J.F. Knott, J.E. Sias, E.V. Dave, J.M. Jacobs (2019) Seasonal and Long-Term Changes to Pavement Life Caused by Rising Temperatures from Climate Change, *Transportation Research Record*, 2673, 267-278.
- [7.1.8-1] REAAA (2018) Report on FEHRL Scanning Tour to South Korea and Japan : Résilience des infrastructures, <https://www.reaaa.net/report-on-fehrl-scanning-tour-to-south-korea-and-japan-infrastructure-resilience/>
- [7.1.8-2] Association de recherche sur les routes et le trafic (FGSV) (2010) Bulletin technique pour la réalisation de couches de roulement semi-rigides (original en allemand) ; FGSV-Nr : 729, ISBN : 978-3-941790-51-3, Cologne, Allemagne.
- [7.1.8-3] Projet CRISPS (2023) <https://more.bham.ac.uk/hvt-crisps/>
- [7.2.1-1] Higher Resilience (2021) EUPAVE Fact sheet, Bruxelles, disponible sur <https://www.eupave.eu/resources/fact-sheet-climate-resilience/>
- [7.2.1-2] R. Oyediji, S.L. Tighe (2021) Impacts of Flooding on Concrete Pavement ; Proceedings of the 12th ICCP (978-0-578-33418-9).

- [7.2.1-3] J. Mack, G. Dean, L. Wathne (2023) Improving Pavement Resiliency to Flooding : A Case for Concrete Pavements ; In Proceedings of the 14th International Symposium on Concrete Roads, Krakow, Poland.
- [7.2.2-1] G. Fick, J. Gross, M.B. Snyder, D. Harrington, J. Roesler, T. Cackler (2021) Guide to Concrete Overlays, Fourth Edition, A guide from National Concrete Pavement Technology Center and Iowa State University, https://intrans.iastate.edu/app/uploads/2021/11/guide_to_concrete_overlays_4th_Ed_web.pdf.
- [7.2.4-1] L. Rens (2017) Soulèvement de Chaussées en Béton ; FEBELCEM, D/2017/0280/06, Bruxelles.
- [7.2.5-1] H. Ceylan, S. Yang, K. Gopalakrishnan, S. Kim, P. Taylor, A. Alhasan (2016) Impact of Curling and Warping on Concrete Pavement ; Technical Report IHRB Project TR-668. Institute for Transportation, Iowa State University, Ames, IA, USA.
- [7.2.5-2] M.P. Wistuba, A. Walther (2013) Consideration of Climate Change in the Mechanistic Pavement Design ; Road Materials and Pavement Design, 14, 227-241.
- [7.3.2-1] H. Zhu, M. Yu, J. Zhu, H. Lu, R. Cao (2019) Simulation study on effect of permeable pavement on reducing flood risk of urban runoff. International Journal of Transportation Science and Technology, 8, 373-382. <https://doi.org/10.1016/j.ijtst.2018.12.001>
- [7.3.2-2] X. Hu, X. Wang, N. Zheng, Q. Li, J. Shi (2021) Experimental Investigation of Moisture Sensitivity and Damage Evolution of Porous Asphalt Mixtures ; Materials, 14, 7151.
- [7.3.2-3] H. Wu, J. Yu, W. Song, J. Zou, Q. Song, L. Zhou (2020) A Critical State-of-the-Art Review of Durability and Functionality of Open-Graded Friction Course Mixtures. Construction and Building Materials, 237, 117759. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117759>
- [7.3.3-1] Reuters (2022) Low Rhine Water Levels Threaten Germany's Economic Growth, 10 août 2022, disponible en ligne à l'adresse <https://www.reuters.com/markets/commodities/low-rhine-water-levels-another-drain-germanys-economy-2022-08-10/>.
- [7.3.3-2] H. Pötz (2016) Green-Blue Grids, Manuel pour les villes résilientes, ISBN 978-90-9029822-1. Disponible en ligne à l'adresse suivante : <https://www.urbangreenbluegrids.com/>
- [7.3.5-1] A. Jotisankasa, B. Vardhanabhuti, K. Lousuphap, A. Sawangsuriya (2011) Mechanisms of Longitudinal Cracks Along Highway Shoulder in Central Thailand ; In Proceedings of the 5th Asian-Pacific Conf. on Unsaturated Soils, Pattaya, Thailand.
- [7.3.5-2] A. Sawangsuriya, A. Jotisankasa, B. Vardhanabhuti, K. Lousuphap (2011) Identification of Potentially Expansive Soils Causing Longitudinal Cracks Along Pavement Shoulder in Central Thailand ; In Proceedings of the 5th Asian-Pacific Conf. on Unsaturated Soils, Pattaya, Thailand.

- [7.3.5-3] R. Luo, J.A. Prozzi (2008) Development of Longitudinal Cracks on Pavement over Shrinking Subgrade ; In Proceedings of the Transportation Research Board Annual Meeting, Paper No. 08-1034.
- [7.3.5-4] W.A. Take, M.D. Bolton (2004) Identification of Seasonal Slope Behaviour Mechanisms from Centrifuge Case Studies. Advances in Geotechnical Engineering. Dans les actes de la conférence de Skempton, volume 2, T. Telford.
- [7.3.5-5] J.D. Nelson, D.J. Miller (1992) Expansive Soils Problems and Practice in Foundation and Pavement engineering ; John Wiley and Sons, New York, NY, USA.
- [7.3.5-6] P.G. Nicholson, V. Kashyap (1993) Fly Ash Stabilization of Tropical Hawaiian Soils, Fly Ash for Soil Improvement ; Geotechnical Special Publication No. 36, ASCE, pp. 15-29.
- [7.3.5-7] Z. Nalbantoglu, E. Gucbilmez (2001) Improvement of Calcareous Expansive Soils in Semi-Arid Environments ; Journal of Arid Environment, No. 47, pp. 453-463.
- [7.4.1-1] PIARC (2022) Impact des véhicules en surpoids sur l'infrastructure et la sécurité routières ; 2020. 2022SP01FR - Projet spécial de PIARC. Réf. PIARC : 2022SP01. ISBN : 978-2-84060-674-1, Nombre de pages : 139, disponible en ligne à l'adresse suivante : <https://www.piarc.org/en/order-library/36918-en-Overweight%20Vehicles:%20Impact%20On%20Road%20Infrastructure%20And%20Safety>
- [7.4.2-1] J.M. Low, S. Haszeldine, G. Harrison (2022) Weight Gain of Battery and Hydrogen Zero Emission Vehicles over Internal Combustion Vehicles : Consequential Increases in Road Wear ; Research Square. DOI: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1435405/v1>
- [7.4.3-1] C. Torres-Machí, A. Chamorro, C. Videla, E. Pellicer, V. Yepes (2014) An Iterative Approach for the Optimization of Pavement Maintenance Management at the Network Level ; The Scientific World Journal, Article ID 524329, 11 pages. <https://doi.org/10.1155/2014/524329>
- [7.4.5-1] I. Kumalasari, M. Napiah, M.H. Sutanto (2018) A Review on Phase Change Materials Incorporation in Asphalt Pavement ; Indonesian Journal of Science & Technology, 3(2), 171-179. <https://ejournal.upi.edu/index.php/ijost/article/view/12762>
- [7.4.5-2] R. Sharma, J.G. Jang, J.W. Hu (2022) Phase-Change Materials in Concrete : Opportunities and Challenges for Sustainable Construction and Building Materials ; Materials, 15(1), 335. <https://doi.org/10.3390/ma15010335>
- [7.4.5-3] Projet ECLIPS (2018) Enhancing Concrete Life in Infrastructure through Phase-Change Systems. <https://www.infravation.net/projects/ECLIPS>



Copyright par l'Association mondiale de la Route. Tous droits réservés.

Association mondiale de la route (PIARC)

La Grande Arche, Paroi Sud, 5e étage, F-92055 La Défense cedex