

Note sur les Routes Rurales 01 : Guide sur l'application des méthodes de conception des chaussées pour les routes rurales à faible volume



Première édition : Juin 2020

Citation préférée : Rolt, J., Otto, A., Mukura, K., Reeves, S., Hine, J., Musenero, L. TRL Limited (2020). Note sur les Routes Rurales 01 : Guide sur l'application des méthodes de conception des chaussées pour les routes rurales à faible volume. Londres : ReCAP pour DFID.

Photos de couverture par : Abedin, M., Cook, J., OTB Vietnam, et Otto, A.

REMERCIEMENTS

La production de cette note sur les routes rurales a été financée par UK aid par l'intermédiaire du ministère britannique du développement international (DFID) dans le cadre du programme de partenariat de recherche pour l'accès communautaire (ReCAP).

John Rolt, Andrew Otto, Kenneth Mukura, Dr. Sarah Reeves, John Hine et Leah Musenero ont rédigé cette note sur les routes rurales.

Les auteurs remercient les membres du groupe de travail des parties prenantes de la Note sur les Routes Rurales pour leurs contributions :

Dr. Dang Kim Thi Tran

Dr. Jasper Cook

Eng. Michael Pinard

Eng. Nkululeko Leta

Dr. Patrick Bekoe

M. Percival Anthony Greening

Eng. Richard Tonny Mugenyi

Eng. Rubina Normahomed

Contributions de M. Joseph Haule, de l'unité de gestion du programme ReCAP, et des docteurs Michael Burrow et Samuel Ampadu, tous deux du groupe technique ReCAP.

L'examineur indépendant, Eng. Gordon R. Keller du Service des forêts du ministère de l'agriculture des États-Unis, est reconnu pour sa contribution significative à l'amélioration de la ligne directrice pour une plus grande pertinence mondiale, et pour avoir fourni plusieurs figures et diagrammes.

Enfin, les auteurs reconnaissent la contribution des praticiens au sein de la communauté ReCAP.

Première édition : Juin 2020

Des mises à jour du guide seront publiées périodiquement par ReCAP, ou une autre autorité désignée, en réponse aux commentaires reçus des utilisateurs.

Pour de plus amples informations, veuillez contacter : nkululeko.leta@cardno.com ou Andrew Otto (TRL), aotto@trl.co.uk.

Ce document a été financé par l'aide du gouvernement britannique dans le cadre du partenariat de recherche pour l'accès communautaire (ReCAP). Les points de vue ou opinions exprimés dans ce document ne reflètent pas nécessairement ceux du ministère britannique du développement international ou de Cardno Emerging Markets (UK) Ltd.

Le ministère britannique du développement international, Cardno Emerging Markets (UK) Ltd ou TRL Ltd n'acceptent aucune responsabilité contractuelle, délictuelle ou autre quant à son contenu ou aux conséquences découlant de son utilisation. Toute personne utilisant les informations contenues dans le document doit appliquer ses propres compétences et son propre jugement à la question examinée.

AVANT-PROPOS

Cette note sur les routes rurales (RRN) s'adresse aux ingénieurs, aux gestionnaires de routes et aux autres praticiens impliqués dans la planification et la conception de routes rurales à faible trafic dans les pays en développement et émergents en climat tropical et subtropical. Elle vise à fournir des conseils sur les principales considérations relatives à l'utilisation de diverses méthodes de conception des chaussées pour les routes à faible trafic. Le RRN fournit des conseils sur les méthodes de conception de la chaussée utilisées dans la conception des routes rurales à faible trafic, allant des routes en terre, aux routes en terre battues, en passant par les différentes couches de revêtement et de pavage non liées, en pierre naturelle, bitumineuses, à base de ciment et de briques d'argile. Le RRN compile les enseignements tirés de la conception, de la construction, de la supervision et du suivi d'une série de types de chaussées et de revêtement étudiés dans le cadre du Programme d'accès communautaire de l'Asie du Sud-Est (SEACAP) au Cambodge, au Laos et au Vietnam, du Programme d'accès communautaire de l'Afrique (AFCAP 1) et du Partenariat de recherche pour l'accès communautaire (ReCAP), ainsi que les connaissances compilées à partir de diverses études connexes en Afrique australe et en Asie du Sud-Est.

L'un des principes fondamentaux qui sous-tendent les récents résultats de la recherche sur les chaussées pour les routes à faible trafic est la nécessité de trouver des solutions locales en Afrique et en Asie, basées sur les ressources locales disponibles et l'environnement routier local. Au cours des deux dernières décennies, des progrès significatifs ont été réalisés dans la recherche sur les matériaux appropriés pour les routes à faible trafic. Il a été constaté que les matériaux considérés comme impropres à l'utilisation sur les routes à fort trafic, ou connus sous le nom de "matériaux marginaux", ont été jugés aptes à l'usage et appropriés pour les routes à faible trafic et des spécifications pour leur utilisation ont été élaborées. Ces matériaux sont désormais appelés matériaux standard pour les routes à faible circulation. Cette approche est cruciale pour le développement d'une infrastructure routière rurale abordable et durable. Actuellement, des essais de recherche soutenus par ReCAP sont en cours en Afrique et en Asie sur les performances à long terme des chaussées afin d'affiner les spécifications nationales. Les données issues de ces essais sont importantes pour la vérification et l'adoption locale des diverses méthodes de conception des chaussées développées de manière empirique.

Il est souvent difficile de trouver des fonds pour améliorer les routes en terre afin de les rendre conformes aux normes des routes revêtues. La décision de revêtir une route ou de l'entretenir en tant que route en terre doit trouver un équilibre entre un faible coût initial et un entretien à long terme abordable. L'autorité routière doit être en mesure de démontrer que l'option choisie est économiquement justifiée, compte tenu de la disponibilité locale des matériaux et de la technologie de construction, et des avantages sociaux relatifs aux différentes normes d'accès.

Entreprendre des recherches sur les chaussées et les options de revêtement et développer des solutions appropriées ne sont pas suffisants en soi pour obtenir des résultats pratiques. Il doit y avoir un cadre de diffusion dans lequel les solutions peuvent être intégrées. Cela inclut des conseils aux autorités routières sur la manière de choisir la méthode de conception des chaussées la plus appropriée à leurs besoins. Un élément essentiel de ce cadre est la production de notes de route pratiques et localement pertinentes. De nombreuses méthodes de conception des chaussées utilisées pour la conception de routes à faible trafic ont été développées de manière empirique. Il est donc important que les pays utilisent les résultats du suivi des sections d'essai et de la performance des routes existantes pour affiner et adapter en permanence les méthodes à leur climat et à leurs matériaux.

La présente note sur les routes rurales s'appuie principalement sur les recherches et expériences récentes concernant la performance des routes à faible trafic en Afrique subsaharienne et en Asie du Sud-Est. Elle est donc principalement utilisée dans les régions tropicales et subtropicales d'Afrique, d'Asie et d'autres régions du monde présentant des caractéristiques similaires. Il ne contient aucune référence aux conditions particulières régissant la performance des routes rurales dans les climats froids ou autres.

Ce document complet a fait l'objet d'un examen approfondi par les pairs et de consultations lors de son élaboration, et nous aspirons à ce qu'il soit un outil clé et un point de référence pour la conception, la mise en œuvre et l'entretien des routes rurales dans les Pays à Faible Revenu pendant de nombreuses années à venir.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Dave Runganaikaloo', with a long horizontal flourish extending to the right.

Dave Runganaikaloo
Directeur du programme ReCAP

ACRONYMES, UNITÉS ET DEVISES

£	Livre sterling (£ 1,00 ≈ fournit la conversion en monnaie locale)
ΔSN	Différence entre le Nombre structural existant et le nombre structural requis
AASHO	American Association State Highway Officials (Association américaine des fonctionnaires des routes d'État)
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials (Association américaine des fonctionnaires des routes et de transport d'État)
ACV	Valeur d'écrasement des agrégats
AfCAP	Africa Community Access Partnership
ALD	Dimension minimale moyenne de l'agrégat
AsCAP	Asia Community Access Partnership
ASTM	American Standard Test Methods (Méthodes d'essai standard américaines)
BS	British Standards (Normes britanniques)
BSI	British Standards Institution (Institution britannique des Normes)
CBA	Cost Benefit Analysis (Analyse coûts-bénéfices)
CBR	Ratio de portance de Californie
COLTO	Committee of Land Transport Officials, South Africa (Comité des fonctionnaires des transports terrestres de l'Afrique du Sud)
COV	Coûts d'exploitation des véhicules
CS	Crushed Stone (Pierre concassée)
DBM	Dry-bound Macadam (Macadam à sec)
DC	Design Class (Classe de conception)
DCP	Pénétrömètre dynamique à cône
DCP-DN	Taux de pénétrömètre dynamique à cône (DN)
DF	Drainage Factor (Facteur de drainage)
DFID	Ministère du Développement International du Royaume Uni
DN	Nombre de coups de DCP par mm de pénétration du DCP
DN ₄₅₀	DSD Nombre de coups de DCP nécessaires pour atteindre une pénétration de 450 mm

DNX	Le taux moyen de pénétration en mm par coup du DCP pour atteindre une profondeur de x mm
DSD	Double Surface Dressing (Enduit bicouche)
DSN ₁₅₀	Nombre de coups de DCP nécessaires pour atteindre une pénétration de 150 mm
DSN ₈₀₀	Nombre de coups du DCP pour atteindre une profondeur de 800 mm
EIE	Évaluation des incidences sur l'environnement
ENS	Route en terre aménagée
EOD	Conception optimisée sur base environnemental
ESA	Nombre équivalent d'essieux de référence
ETB	Base traitée à l'émulsion)
FACT	Fine Aggregate Crushing Test (Test de broyage d'agrégats fins)
GC	Coefficient granulométrique
GM	Module granulométrique (défini de manière exhaustive au chapitre 6)
gTKP	Partenariat mondial pour la connaissance en matière de transport
HDM-4	Highway Design and Maintenance standards Model – 4 (Modèle de standards de conception et d'entretien des routes – 4)
HMA	Hot mix Asphalt (Enrobé bitumineux à chaud)
HPS	Pierres entassées à la main
HVR	Route à fort trafic
IDA	Agence internationale pour le développement
IMT	Moyens intermédiaires de transport
Ip ou PI	Indice de plasticité
IRI	Indice international de rugosité
kg	Kilogramme
km/h	Kilomètres par heure
l/m ²	Litre par mètre carré
LL	Limite de liquidité
LP	Limite de plasticité

LS	Retrait linéaire
LVR	Route à faible volume
LVRR	Route rurale à faible volume
m	Mètre
MC	Bitume fluide ; fluidifier au pétrole : vitesse de séchage moyenne
MCA	Analyse multicritères
MESA	Millions équivalent d'essieux de référence
mm	Millimètre
mm/yr	Millimètres par année
MO	Main d'œuvre
MPa	Méga Pascal
mph	Miles per hour
NRC	Béton non-armé
OIT	Organisation internationale du travail
ONG	Organisation non gouvernementale
ORN	Overseas Road Note (Note sur les routes d'outre-mer)
PBV	Poids brut du véhicule
PCU	Équivalent d'une voiture particulière
Pen	Pénétration de Bitume, liée à leur classification selon la dureté
PIARC	Association mondiale de la Route
PIB	Produit Intérieur Brut
PM	Module de plasticité
PMU	Project Management Unit (Unité de gestion des projets)
PP	Produit de plasticité
PSD	Distribution granulométrique des particules
QA	Assurance Qualité
RC	Béton armé
ReCAP	Partenariat de recherche pour l'accès communautaire

RED	Road Economic Decision (Décision sur l'économie routière)
RNN	Note sur les routes rurales
RRC	Road Research Centres (Centres de recherche routière)
RSA	Republic of South Africa (République d'Afrique du Sud)
SADC	Southern Africa Development Community (Communauté de développement de l'Afrique australe)
SANS	South African National Standards (Normes nationales sud-africaines)
SATCC	Southern Africa Traffic and Communications Commission (Commission du trafic et des communications de l'Afrique australe)
SBL	Couche de sable de fond
SE	Déclivités
SEACAP	South East Asia Community Access Programme
SNC	Nombre structural modifié (SN avec la contribution du sol support)
SWG	Groupe de travail des parties prenantes
TEM	Teneur en Eau Maximale
TLC	Classe de charge de trafic
TMJ	Trafic moyen journalier
TMJA	Trafic moyen journalier annuel
ToC	Table des matières
ToR	Cahier de charges
TRI	Taux de rendement Interne
TRIE	Taux de rendement interne économique
TRL	Transport Research Laboratory, Royaume Uni
TRPA	Taux de rentabilité de la première année
UCS	Résistance à la compression diamétrale
UK	Royaume uni de la Grande Bretagne et d'Irlande du Nord
UKAid	United Kingdom Aid
UNOPS	United Nations Office for Project Services (Bureau des Nations Unies pour les services d'appui aux projets)
URC	Béton non-armé

USAID	United States Agency for International Development (Agence des États-Unis pour le développement international)
USCS	Système unifié de classification des sols
USD	Dollar américain
VAN	Valeur Actuelle Nette
WBM	Macadam lié à l'eau
WC	Couche de roulement
WLC	Coûts de la vie entière

GLOSSAIRE DES TERMES

Accotements

Partie revêtue ou non revêtue de la chaussée à côté du bord extérieur du trottoir. L'accotement fournit un appui latéral à la chaussée et permet aux véhicules de s'arrêter ou de passer en cas d'urgence.

Agrégat (pour la construction)

Large catégorie de matériaux à grosses particules comprenant le sable, le gravier, la pierre concassée, les scories et les matériaux recyclés qui forment un composant des matériaux composites tels que le béton et l'asphalte pré-mélangé.

Asphalte / Enrobés

Mélange de matières minérales inertes, telles que des agrégats, le filler minérale (si nécessaire) et un liant bitumineux dans des proportions prédéterminées (parfois appelé béton bitumineux, béton asphaltique ou enrobés dense). Généralement pré-mélangé dans une usine avant le transport vers le site pour être posé et compacté. Coûteux et généralement utilisé uniquement sur les routes principales. Également utilisé comme terme alternatif pour le bitume dans certaines régions, et peut être un produit de traitement du pétrole ou être naturellement présent dans les gisements.

Base et fondation de la route

Couches de chaussée entre le revêtement et le sol. La Base et fondation forment les couches d'assise.

Béton

Matériau de construction composé de ciment (le plus souvent du ciment Portland, mais parfois d'autres matériaux cimentaires disponibles comme les cendres volantes et le ciment de laitier), d'agrégats (généralement un agrégat grossier comme le gravier ou la pierre concassée plus un agrégat fin comme le sable), d'eau (et parfois d'adjuvants chimiques pour améliorer les performances ou pour des applications spéciales).

Béton armé

Un mélange d'agrégats de pierre grossiers et fins liés par du ciment et de l'eau et renforcés par des barres d'acier ou des mailles pour une plus grande résistance.

Bitume

Mélange solide ou visqueux non cristallin d'hydrocarbures complexes qui possède des propriétés d'agglomération caractéristiques, se ramollit progressivement lorsqu'il est chauffé, est sensiblement soluble dans le trichloréthylène et est généralement obtenu à partir de pétrole brut par des procédés de raffinage. Appelé asphalte dans certaines régions.

Bitume, fluides

Produit bitumineux liquide obtenu en mélangeant du bitume pur (encore appelé bitume de classe pénétration) avec un solvant volatil pour produire des réductions de durcissement rapide (RC) ou moyen (MC), selon la volatilité du solvant utilisé. Après évaporation du solvant, les propriétés du bitume de pénétration d'origine deviennent opérationnelles.

Bitume, de classe de pénétration

Fraction du pétrole brut restant après les processus de raffinage qui est solide ou presque solide à la température normale de l'air et qui a été mélangée ou transformée en produits de dureté ou de viscosité variable.

Blinding

a) Une couche de béton maigre, généralement de 50 à 100 mm d'épaisseur, placée sur le sol pour le sceller et fournir une surface de travail propre et plane pour construire les fondations d'un mur ou de toute autre structure.

b) Application d'un matériau fin, par exemple du sable, pour combler les vides à la surface d'une couche de revêtement ou de terrassement.

Brique (en argile cuite)

Bloc de matériau dur et durable formé par la combustion (cuisson) d'argile à haute température.

Cambrure

La surface de la route est normalement formée de manière à s'écarter de l'axe de chaque côté. La cambrure est nécessaire pour évacuer l'eau de pluie et réduire le risque de collision entre les véhicules qui passent. La pente de la cambrure est appelée "Crossfall". Dans les virages serrés, la surface de la route doit tomber directement de l'extérieur du virage vers l'intérieur (déclivité).

Cape Seal

Un traitement de surface bitumineux multiple qui consiste en une seule application de liant et de pierre suivie d'une ou deux applications de coulis bitumineux.

Chaussée

Les couches construites de la route sur laquelle les véhicules circulent.

Chaux

La chaux est un matériau dérivé de la combustion du calcaire ou de la craie. On peut normalement l'obtenir sous sa forme "hydratée" (éteinte) sous forme d'hydroxyde de calcium. Elle peut être utilisée pour le séchage, l'amélioration et la stabilisation des sols appropriés, comme agent anti-décapant dans la production de mélanges bitumineux et comme liant dans les mortiers de maçonnerie ou de brique.

Ciment (pour la construction)

Poudre sèche qui, sous l'effet de l'eau (et parfois d'autres additifs), durcit et se solidifie indépendamment pour lier les granulats entre eux et produire du béton. Le ciment peut également être utilisé pour stabiliser certains types de sol. Le ciment est aussi parfois utilisé comme filler dans les mélanges bitumineux.

Compactage

Processus par lequel les particules de sol sont densifiées, par roulage ou par d'autres moyens, pour les tasser plus étroitement les unes contre les autres, augmentant ainsi la densité sèche du sol.

Construction de type Telford

Il s'agit de placer à la main une couche de morceaux de pierres brisées à une profondeur d'environ 75/100 - 175/200mm sur une formation de sol plane préparée et façonnée. Les plus grosses pierres sont placées au centre de la route et les plus petites sur le bord pour créer la pente transversale requise (minimum 1 sur 45). Les pierres plus petites sont ensuite entassées entre elles, selon une technique similaire à celle des pierres emballées à la main. La couche initiale est compactée et une deuxième (100 mm) et une troisième (50 mm) couche sont placées par-dessus avec une épaisseur combinée de 150 mm de pierres concassées calibrées. Une couche blinding de gravier de 40 mm d'épaisseur est ensuite placée comme surface finie

Couche de roulement

Couche supérieure d'un revêtement routier sur laquelle la circulation se déroule et qui est censée s'user sous l'action du trafic. Cela s'applique aux surfaces en terre et de bitume.

Coulis bitumineux (slurry)

Mélange de granulats fins convenablement calibrés, de ciment ou de chaux hydratée, d'émulsion de bitume et d'eau, utilisé pour combler les vides de la couche finale de pierre d'un nouveau traitement de surface ou comme traitement d'entretien (également appelé enduit superficiel de coulis bitumineux).

Distributeur

Véhicule ou appareil tracté comprenant un réservoir isolé, généralement avec des installations de chauffage et de circulation, et une barre de pulvérisation capable d'appliquer une couche de liant mince, uniforme et prédéterminée. L'appareil peut également être équipé d'une lance à main pour la pulvérisation manuelle.

Drainage

Interception et élimination des eaux du sous-sol et des eaux de surface par des moyens artificiels ou naturels.

Drain français (sous-drain)

Forme de système de drainage souterrain, généralement construit dans une tranchée et rempli de roche calibrée ou de gravier perméable, et d'un tuyau perforé pour évacuer l'eau. Le matériau de drainage (généralement du gravier) est souvent enveloppé dans un géotextile pour empêcher le colmatage du gravier tout en laissant l'eau souterraine s'écouler dans le système.

Durabilité

Terme relatif à la capacité d'une structure à durer.

Émulsion de bitume /émulsion

Mélange de bitume et d'eau auquel on ajoute un émulsifiant ou un agent émulsifiant pour assurer la stabilité. L'émulsion conventionnelle la plus couramment utilisée dans les travaux routiers au bitume dispersé dans l'eau. Une émulsion de bitume inversé a l'eau dispersée dans le bitume. Dans la première, le bitume est la phase dispersée et l'eau est la phase continue. Dans la seconde, l'eau est la phase dispersée et le bitume est la phase continue. Le bitume est parfois fluidifié pour abaisser sa viscosité par l'ajout d'un solvant approprié.

Émulsion de bitume, anionique

Émulsion dans laquelle l'émulsifiant est un sel organique alcalin. Les globules de bitume portent une charge électrostatique négative.

Émulsion de bitume, cationique

Émulsion dans laquelle l'émulsifiant est un sel organique acide. Les globules de bitume portent une charge électrostatique positive.

Qualité d'émulsion de bitume

Émulsion de qualité d'enrobages : Émulsion formulée pour être plus stable que l'émulsion de qualité de répandages et adaptée au mélange avec des agrégats de granulométrie moyenne ou grossière, la quantité inférieure à 0,075 mm ne dépassant pas 2 %.

Émulsion de qualité à prise rapide : Émulsion spécialement formulée pour être utilisée avec des agrégats fins de type coulis bitumineux, lorsque l'on souhaite une prise rapide du mélange.

Émulsion de qualité de répandages : Émulsion formulée pour être appliquée au moyen d'un équipement de pulvérisation mécanique dans la construction des enduits superficiels, où aucun mélange avec des agrégats n'est nécessaire.

Émulsion de qualité de Stabilisation : Émulsion formulée pour être mélangée avec des agrégats très fins, du sable et de la poussière de concassage. Principalement utilisée pour les coulis bitumineux à prise lente et les couches d'accrochage.

Enduit superficiels Bicouche

Une application de liant bitumineux et de granulats suivie d'une seconde application de liant et de granulats ou de sable. Le deuxième enduit utilise généralement une taille d'agrégat plus petite pour aider à assembler les couches. Une pulvérisation fine de bitume est parfois appliquée sur la deuxième couche de granulats.

Enduit superficiels monocouche

Application d'un liant bitumineux suivie d'une couche de granulats ou de sable propre.

ENS (Engineered Natural Surface) / Surface en Terre Aménagée

Une route en terre construite à partir du sol en place à l'emplacement de la route, et dotée d'un système de cambrure et de drainage.

Entretien des routes

Des activités régulières et occasionnelles appropriées pour maintenir le revêtement, les accotements, les pentes, les installations de drainage et toutes les autres structures et propriétés sur les bords de route aussi près que possible de leur état de construction ou de rénovation. L'entretien comprend les réparations et améliorations mineures visant à éliminer la cause des défauts et à éviter la répétition excessive des efforts d'entretien.

Équipement intermédiaire

Équipement simple ou intermédiaire, conçu pour des coûts initiaux et de fonctionnement faible, une durabilité et une facilité d'entretien et de réparation dans les conditions typiques d'un environnement à ressources limitées, plutôt que pour une efficacité théorique élevée.

ESA (Equivalent Standard Axle) / Essieux de référence

Un concept de conception permettant de prendre en compte l'effet dommageable d'une gamme et d'un nombre de charges d'essieu différentes dans la conception structurelle d'une chaussée. L'essieu standard équivalent impose une charge de 8 200 kg.

Filler

Matière minérale composée de particules inférieures à 0,075mm.

Fondation

Voir Base.

Formation

La surface façonnée des terrassements, ou sol support, avant la construction des couches de la chaussée.

Fossé (Drain)

Une longue excavation étroite conçue ou destinée à recueillir et à drainer les eaux de surface.

Fosse d'emprunt (gisement)

Une zone où les matériaux sont excavés pour être utilisés dans un autre endroit.

Gabarit

Une planche mince ou un modèle de bois utilisé pour vérifier la forme d'une excavation.

Géocellules

Les systèmes de confinement cellulaire typiques sont fabriqués avec des bandes de polyéthylène haute densité (PEHD) ou de nouveaux alliages polymères soudés par ultrasons, qui sont étendus sur place pour former une structure en nid d'abeille qui peut être remplie de sable, de terre, de roche ou de béton.

Granulats d'enduit superficiels

Des morceaux de pierre propres, résistants et durables, fabriqués par écrasement de la roche ou en la cassant. Les gravillons sont généralement criblés pour obtenir un matériau de petite taille.

Gravier (matériau de construction)

Une roche naturelle, altérée ou transportée naturellement dans une gamme spécifique de taille de particules grossières. Le gravier est généralement utilisé comme couche de chaussée dans son état naturel ou modifié, ou comme couche de roulement de routes en terre battue et en terre. Le gravier approprié peut également être utilisé dans un enduit superficiel comme gravier calibré dans des circonstances appropriées.

Indice de plasticité (Ip) :

Limite de liquidité moins la limite de plasticité, une indication de la teneur en argile des sols ; plus l'Ip est élevé, plus la teneur en argile est importante.

In Situ

Prise en position sur chantier (c'est-à-dire essai effectué sur le matériau dans son état naturel, plutôt qu'un échantillon prélevé pour un essai en laboratoire).

Latérite

Dépôts résiduels formés dans des conditions climatiques tropicales. La latérite est constituée d'oxydes de fer et d'aluminium.

Liant, bitumineux

Les matériaux utilisés dans la construction des routes pour se lier ou pour sceller les particules d'agrégat ou de sol, peuvent être à base de bitume, de ciment ou de polymère.

Limite de liquidité

La teneur en humidité à laquelle un sol passe de l'état liquide à l'état plastique, déterminé par une procédure de l'essai spécifique.

Limite de plasticité

La teneur en humidité à laquelle un sol passe de l'état plastique à l'état semi-solide, tel que déterminé par une procédure d'essai spécifique

Macadam

Mélange de pierres brisées ou concassées de différentes tailles (généralement moins de 60 mm) posées pour former une couche de revêtement routier. Le macadam au bitume utilise un liant bitumineux pour maintenir le matériau en place. Le macadam utilise le goudron pour les mêmes raisons. Les macadams liés sont généralement coûteux pour une utilisation sur les LVR.

Macadam à sec

Une couche de chaussée construite où les vides dans un grand squelette de pierre de taille unique sont remplis d'un agrégat fin, vibré avec un équipement de compactage approprié.

Macadam lié à l'eau

Une couche de couche de chaussée où les vides d'un grand squelette de pierre de taille unique sont remplis d'un sable fin, lavé par l'application d'eau.

Matériau géosynthétique

Un produit planaire fabriqué à partir d'un matériau polymère utilisé avec le sol, la roche et d'autres matériaux liés à l'ingénierie géotechnique comme partie intégrante d'un projet, d'une structure ou d'un système manufacturé. Les fonctions sont d'améliorer la résistance, de fournir une séparation, la filtration, la stabilisation structurelle ou un confinement et de réduire les coûts et le temps de construction.

Module de plasticité

Le produit de l'indice de plasticité (Ip) et de la fraction en pourcentage de matériaux passant au travers d'un tamis de 425 microns.

Otta Seal

Un tapis de granulats calibrés (gravier naturel ou roche concassée) étalé sur un liant bitumineux "mou" (à faible viscosité) fraîchement pulvérisé et roulé à l'aide d'un rouleau lourd.

Pavé (Sett)

Petit morceau de pierre dure taillée à la main en un cube d'environ 100 mm utilisé comme unité de pavage.

Pavé de pierre /pierre de taille

Morceaux de pierre cubiques plus grands que des pavé ou setts, généralement façonnés à la main et intégrés dans une couche de revêtement routier ou une protection de surface.

Pénétration Macadam

Une couche de chaussée constituée d'une ou plusieurs applications de granulats grossiers à granulométrie ouverte (pierre concassée, scories ou graviers) suivies de l'application par pulvérisation d'un liant bitumineux. Elle comprend généralement deux ou trois applications de pierre, chacune de taille de particule décroissante, chacune étant intégrée dans l'application précédente avant le compactage de la couche terminée.

Pente transversale (Crossfall)

Voir Cambrure

Périurbain

Immédiatement contiguës à une zone urbaine ou à une zone villageoise.

Pierre concassée

Une forme d'agrégat de construction, généralement produit en exploitant une carrière de roche approprié et en cassant la roche retirée à la taille souhaitée à l'aide de concasseurs mécaniques, ou manuellement à l'aide de marteaux.

Pierre entassée à la main

Une couche de grosses pierres taillées anguleuses posées à la main avec des pierres plus petites ou du gravier enfoncé dans les espaces entre les pierres pour former une couche de surface de la route.

Pierre taillée

Voir Pavé de pierre

Plateforme de la route

La partie des bords de route, y compris les accotements, destinée à l'usage des véhicules.

Ratio de portance de la Californie (CBR)

La valeur donnée à un essai de pénétration ad hoc où la valeur de 100% s'applique à un échantillon standard de matériau concassé de bonne qualité

Remblai, talus

Travaux de terrassement en dessous de l'horizon de la chaussée mais au-dessus du niveau du sol naturel environnant.

Reseal (Rescellage)

Traitement de surface appliqué à une surface bitumineuse existante.

Ressources locales

Il peut s'agir de ressources humaines, de collectivités locales, d'institutions privées, d'ONG et communautaires, d'entrepreneurs locaux tels que des entrepreneurs, des consultants, des industriels et des artisans, de compétences locales, d'équipements intermédiaires fabriqués localement, de matériaux locaux tels que des agrégats, des briques, du bois et des matériaux standard produits localement pour les LVR, de financements obtenus localement ou de fourniture de matériaux ou de services en nature.

Revêtement

La partie de la route avec laquelle la circulation entre en contact direct.

Routes à faible volume (LVR)

Aux fins de la conception des chaussées, il s'agit de routes conçues pour supporter jusqu'à un million équivalent d'essieux de référence dans une voie dans un sens. Pour des raisons de conception géométrique, ce sont des routes qui transportent environ 300 à 400 véhicules par jour.

Route en la terre

Voir ENS.

Route en terre battue /Route non revêtue/non goudronnée

Une route avec une surface de terre ou de gravier.

Route revêtue

Une route revêtue est une route avec un revêtement en pierre, en bitume, en brique ou en béton.

Routes revêtues à faible volume (LVSR)

Il s'agit de routes à faible trafic qui possèdent un revêtement bitumineux mince, tel qu'un enduit bicouche, comme matériau de revêtement. Ils peuvent également comprendre tout revêtement qui assure l'étanchéité de la chaussée, par exemple le béton de ciment.

Scellage

Terme fréquemment utilisé à la place de " Rescellage " ou "traitement de surface". Également utilisé dans le contexte du "bicouche" et d' "enduit superficiel de sable" où le sable est utilisé à la place de la pierre.

Séchage

Processus consistant à maintenir humide le béton fraîchement posé/placé ou le sol stabilisé afin d'éviter une évaporation excessive avec le risque de perte de résistance ou de fissuration qui en découle. De même, avec des couches stabilisées au ciment ou à la chaux.

Sett

Voir. Pavé

Sol expansif

Généralement, un sol argileux qui subit de grandes modifications de volume en réponse directe aux changements d'humidité.

Sol support

Matériau naturel ou de terrassement sous l'arase de terrassement constituant le support de la chaussée.

Talus / Pente

Surface naturelle ou aménagée formant un angle par rapport à l'horizontale.

Traitement de surface

Terme général qui englobe les Enduits superficiels, les coulis bitumineux, les micro-surfaces ou les pulvérisations fines de bitume.

Vitesse prescrite

La vitesse maximale de sécurité évaluée qui peut être maintenue sur une section de route donnée lorsque les conditions sont si favorables que les caractéristiques de conception de la route régissent la vitesse.

Voie de circulation

Le revêtement de la chaussée ou du tablier du pont sur lequel les véhicules circulent.

TABLE DE MATIERES

ACRONYMES, UNITÉS ET DEVICES	v
GLOSSAIRE DES TERMES.....	i
1 INTRODUCTION	1
1.1 Contexte	1
1.2 Objectif	1
1.3 Définition des routes rurales à faible volume (LVRR)	1
1.4 Hiérarchie de LVRR	2
1.5 Champ d'application.....	2
1.6 Principes de la note sur les routes rurales	3
1.7 Le cycle de la chaussée.....	4
1.8 L'environnement routier	4
1.9 Conception optimisée pour l'environnement (EOD).....	6
1.10 Structure de la note sur les routes rurales.....	8
2 CONCEPTION DU DRAINAGE ET RÉSILIENCE CLIMATIQUE.....	9
2.1 Contexte	9
2.2 Objectif et portée	9
2.3 Drainage externe	9
2.4 Drainage interne et de Sous-sol	13
2.5 Changement climatique et conception des chaussées	16
2.6 Adopter une approche fondée sur le risque	17
2.7 Méthodes d'évaluation des risques	18
2.8 Principes de l'intégration du changement climatique dans la conception des routes	19
2.9 Choisir la mesure d'adaptation la plus appropriée	24
2.10 Améliorer la résilience des chaussées et des structures de drainage existantes	24
2.11 Résumé	25
3 CHOIX DE MATÉRIAUX.....	29
3.1 Objectif et portée	29
3.2 Approche de l'utilisation des matériaux.....	29
3.3 Méthodes d'essai.....	30
3.4 Lignes directrices pour la sélection et l'utilisation des matériaux	30
3.5 Matériaux à haute plasticité.....	31
3.6 Matériaux granulométriquement mal calibrés	33
3.7 Matériaux de mauvaise forme	35
3.8 Matériaux à faible teneur en particules	36
3.9 Matériaux de faible durabilité	38
3.10 Une approche fondée sur le risque pour la sélection des matériaux pour les routes revêtues.....	39
3.11 Macadam and Telford Materials	39
3.12 Évaluation en laboratoire des matériaux de chaussée	40
3.13 Spécifications des matériaux pour les méthodes de conception des chaussées basées sur le CBR	41
3.14 Spécification des matériaux pour la méthode de conception DCP-DN	46
4 LES PRINCIPALES MÉTHODES DE CONCEPTION STRUCTURELLE DES CHAUSSÉES POUR LES LVRS	49
4.1 Contexte et portée	49
4.2 Élaboration des abaques de conception	49

4.3	Décisions clés.....	51
4.4	La méthode AASHTO	53
4.5	La méthode du TRL Overseas Road Note 31	54
4.6	La méthode Foundation Class	56
4.7	La méthode TRL-SADC	56
4.8	Le TRL Overseas Road Note 18 Méthode DCP-CBR.....	57
4.9	La méthode DCP-DN	57
5	MÉTHODES DE CONCEPTION POUR LES ROUTES REVÊTUES	60
5.1	Objectif et Portée	60
5.2	Méthodes basées sur le CBR	60
5.3	Les méthodes basées sur le DCP	72
5.4	Risque lié à la performance des chaussées en général	83
5.5	Structures revêtues alternatives	84
5.6	Résumé des décisions clés.....	89
5.7	Résumé des points forts et des limites des méthodes de conception.....	92
6	CONCEPTION DE ROUTES NON REVÊTUES.....	98
6.1	Contexte	98
6.2	Objectif et portée	98
6.3	Principes de bonne conception des routes non revêtues.....	99
6.4	Surfaces naturelles aménagées (ENS)	100
6.5	Exigences en matière de conception des matériaux couche de roulement en gravier	101
6.6	Conception de l'épaisseur des routes en terre	106
7	SÉLECTION DE REVÊTEMENTS	111
7.1	Objectif et portée	111
7.2	Description des revêtements communs.....	111
7.3	Choix des revêtements en fonction de la disponibilité des matériaux.....	117
8	ÉVALUATION ÉCONOMIQUE DES RÉSULTATS DE LA CONCEPTION DES CHAUSSÉES	122
8.1	Contexte	122
8.2	Objectif et portée	122
8.3	Classement et critères de rentabilité	122
8.4	Critères de décision économique (VAN, TRI, TRPA, VAN/C)	123
8.5	Choix de l'outil économique approprié	124
8.6	Analyse du coût du cycle de vie (LCCA)	125
8.7	Le Road Economic Decision Model (RED).....	127
8.8	Le modèle de développement et de gestion des routes (HDM-4).....	128
8.9	Données clés pour une analyse économique des transports	128
8.10	Un exemple d'analyse économique utilisant le modèle	132
8.11	Avantages sociaux, sécurité routière et coûts et avantages environnementaux	136
9	FACTEURS ET CONSIDÉRATIONS ACCESSOIRES.....	139
9.1	Introduction.....	139
9.2	Quelques considérations d'ingénierie géotechnique pour les LVR.....	139
9.3	Considérations relatives à la conception des remblais et des déblais	145
9.4	Gestion de la fosse d'emprunt	150
9.5	Compactage	153
9.6	Amélioration des tableaux de conception des chaussées	154
9.7	Sections sur le rendement à long terme des chaussées	154

FIGURES

Figure 1-1: Le cycle de vie des chaussées	4
Figure 1-2: Schéma de l'impact relatif des facteurs environnementaux et du trafic	8
Figure 2-1: Hauteur de la couronne pour les routes revêtues par rapport à la profondeur du fossé de drainage	10
Figure 2-2: Mauvais - Écart entre le revêtement de surface et le revêtement du drain	12
Figure 2-3: Bon - Revêtement de drainage relié au bord du revêtement	12
Figure 2-4: Illustration d'un drain français	15
Figure 2-5: Système de drainage du sous-sol (<i>uniquement pour de courts tronçons de route</i>)	15
Figure 2-6: Illustration d'une couverture de drainage (<i>uniquement pour de courts tronçons de route</i>)	16
Figure 2-7: Illustration de la simulation de flux	23
Figure 2-8: Structure monolithique - ponceau en caisson	23
Figure 3-1: Illustration des problèmes posés la granulométrie mal calibrés	34
Figure 3-2: Profil en travers de la chaussée en macadam	40
Figure 3-3: La chaussée de Telford	40
Figure 5-1: Diagramme de décision de la conception des chaussées	67
Figure 5-2: Exemple d'abaque de la méthode des classes de fondation du Kenya Pavement Design Guideline	71
Figure 5-3: Diagrammes types de résistance des couches calculés dans le cadre de UK DCP Program	73
Figure 5-4: Calculation of SN/SNC in the UK DCP Program	74
Figure 5-5: Relation entre le DCP-CBR in-situ et le CBR trempé	75
Figure 5-6: Résultats typiques des essais DCP en laboratoire	80
Figure 5-7: Résultat typique de l'analyse d'une section uniforme	81
Figure 5-8: Pavés en béton et pierres entassées à la main	88
Figure 6-1: Profil en travers détaillé d'une ENS	101
Figure 6-2 : Tableau de sélection pour les graviers des route en terre utilisant le PP et GM	102
Figure 6-3: Tableau de sélection pour des graviers pour les routes en terre utilisant SP et GC (<i>Source: Paige-Green 1989</i>)	103
Figure 6-4: Choix du gravier de la couche de roulement par produit de plasticité et la condition climatique	105
Figure 6-5: Méthode de granulométrique pour choisir le matériau de la couche de roulement en fonction des conditions climatiques	106
Figure 8-1-: Rugosité de la route et fréquence de nivellement pour une route en terre battue	132
Figure 9-1: Procédure recommandée pour l'enlèvement des déblais et le stockage	151
Figure 9-2: Un exemple de plan de développement d'une fosse d'emprunt	152
Figure 9-3: Avantages du compactage au refus	154

TABLES

Tableau 1-1: Facteurs d'impact environnementaux de l'ingénierie routière	5
Tableau 1-2: Facteurs environnementaux propices à la route	6
Tableau 2-1: Mécanismes d'entrée et d'évacuation de l'eau dans les chaussées	10
Tableau 2-2: Hauteur recommandée de la couronne, h_{\min} (m), par-dessus le fossé de drainage inverse	11
Tableau 3-1: Groupes matériaux.....	30
Tableau 3-2: Répartition de la taille des particules de la couche de base de Macadam.....	39
Tableau 3-3: Exemple de matrice d'essai pour le compactage et l'évaluation de la résistance des matériaux	41
Tableau 3-4: Exemple de spécifications des matériaux de chaussée	42
Tableau 3-5: Exemple de spécification de la taille des particules pour les bases routières en gravier naturel	43
Tableau 3-6: Spécifications de plasticité de base pour les bases routières en gravier naturel.....	44
Tableau 3-7: Exemple de définitions de classes inférieures	45
Tableau 3-8: Spécification s'il s'y est d'importantes matières de base de gravier latéritique en Afrique de l'Est	45
Tableau 4-1: Décisions clés requises pour la conception structurelle	52
Tableau 4-2: Résumé des caractéristiques de l'essai routier de l'AASHTO	53
Tableau 4-3: Résumé des caractéristiques des routes étudiées (ORN 31)	56
Tableau 4-4: Résumé des caractéristiques des routes étudiées (TRL-SADC).....	57
Tableau 4-5: Résumé des caractéristiques de l'étude de Transvaal (méthode DCP-DN).....	58
Tableau 5-1: Coefficients de résistance des couches de chaussée.....	62
Tableau 5-2: Facteurs de conception (exemple du Vietnam utilisant la méthode AASHTO).....	63
Tableau 5-3: Exemple de conception de la chaussée bitumée Abaque 1 (Zones climatiques humides)5	69
Tableau 5-4: Exemple d'abaque - Conception de la chaussée bitumeuse Abaque 2 (Zones climatiques modérées)5	69
Tableau 5-5: Nombres structurels pour la conception de la chaussée Abaque 1 -Zones humides.....	75
Tableau 5-6: Nombres structurels pour la conception de la chaussée Abaque 2 - Zones mod/sèches5.....	75
Tableau 5-7: Percentile de conception pour les classes de circulation	76
Tableau 5-8: Critères de carence structurelle.....	77
Tableau 5-9: Étapes du processus.....	78
Tableau 5-10: programme des essais DN en laboratoire pour la détermination de la résistance à la conception des sol supports5.....	80
Tableau 5-11: Profil de résistance de couche en format tabulaire.....	81
Tableau 5-12: Abaque de conception DCP-DN pour différentes classes de charge de trafic (TLC)5.....	82
Tableau 5-13: Réduction des risques	84
Tableau 5-14: Épaisseurs conçues pour les pavés en pierre concassée à la main (HPS) (mm)	85
Tableau 5-15: Dimensionnement d'épaisseurs pour divers revêtements à éléments modulaires (mm)	87
Tableau 5-16: Sélection de la résistance du sol pour la conception.....	90
Tableau 5-17: Résumé des points forts et des limites des méthodes de conception des chaussées	92
Tableau 6-1 Classes de trafic pour la conception des routes en terre	99
Tableau 6-2: Hauteur minimale (h_{\min}) entre le sommet de la route et le niveau d'inversion du drain.	100
Tableau 6-3: Spécifications recommandées pour le revêtement de gravier basé sur GM.....	101

Tableau 6-4: Spécifications recommandées pour le revêtement de gravier en fonction du GC	103
Tableau 6-5: Perte de gravier typique.....	104
Tableau 6-6: Épaisseur de base des principales routes en terre battue - Gravier moyen (CBR trempé à 20 %)	107
Tableau 6-7: Épaisseur de base des principales routes en terre battue - Gravier faible résistance (CBR trempé à 15 %)	108
Tableau 7-1: Caractéristiques générales des revêtements bitumineux	111
Tableau 7-2: Adéquation de divers revêtements pour les LVR.....	115
Tableau 7-3: Résoudre les problèmes liés aux puces électroniques	117
Tableau 7-4: Sélection des revêtements en fonction de la disponibilité des matériaux.....	118
Tableau 7-5: Sélection des revêtements en fonction du trafic et des régimes d'érosion	119
Tableau 7-6: Définition du régime indicatif de trafic	120
Tableau 7-7: Définition du potentiel d'érosion.....	120
Tableau 8-1: Exemple d'analyse multicritères	123
Tableau 8-2: Un exemple d'analyse du coût du cycle de vie (<i>Source US DoT</i>)	125
Tableau 8-3: Analyse des coûts du cycle de vie montrant les coûts actualisés	127
Tableau 8-4: Coûts comparatifs de la base de données ROCKS (version 2.3)	131
Tableau 8-5: Données d'entrée des véhicules	133
Tableau 8-6: Données de trafic	133
Tableau 8-7: Données d'investissement	134
Tableau 8-8: Entretien information	134
Tableau 8-9: Coûts d'exploitation des véhicules et données de sortie sur la vitesse des véhicules RED.....	134
Tableau 8-10: Analyse économique pour l'amélioration de 10 km de route en terre/terre battue en mauvais état (IRI 15) en route en terre battue en bon état (IRI 10)	135
Tableau 8-11: Analyse économique pour la transformation de 10 km de route en terre/ terre battue en mauvais état (IRI 15) en route revêtue (IRI 4)	136
Tableau 9-1: Résumé des techniques d'amélioration des sols	141
Tableau 9-2: Études sur le terrain et en laboratoire pour la conception et l'analyse des pentes et des remblais	144
Tableau 9-3: Angles de talus recommandés pour les conditions de sol et de roche*5-	146
Tableau 9-4: Mesures de protection des talus	147
Tableau 9-5: Exemples d'espèces végétales communes pour la protection des talus par la bio-ingénierie	149

1 INTRODUCTION

1.1 Contexte

Le coût de la mise en place d'une infrastructure routière à faible volume basée sur des normes élevées traditionnelles et des méthodes de conception développées pour les routes à fort volume peut être prohibitif. En effet, ces routes visent à assurer la mobilité alors que la principale exigence du transport rural local est l'accès. Par conséquent, les conceptions de routes basées sur des normes traditionnelles sont généralement trop coûteuses pour être appliquées dans un grand réseau rural. En réponse à ce défi, le ministère britannique du développement international (DFID) et d'autres partenaires et agences de développement ont soutenu la recherche et le transfert de connaissances sur divers aspects des infrastructures rurales, dans le but spécifique de réduire les coûts et d'accroître l'efficacité durable de la fourniture d'un accès routier pour les communautés rurales et périurbaines. En général, la recherche s'est concentrée sur les routes rurales à faible volume, bien que certains éléments soient également applicables aux conditions urbaines. La plupart de ces recherches ciblées ont été couronnées de succès et ont débouché sur des approches innovantes qui peuvent fournir des solutions très bénéfiques et rentables pour l'accès rural à faible volume, par exemple grâce à l'utilisation de matériaux de construction routière appropriés et de méthodes de construction à forte intensité de main-d'œuvre. Bon nombre des méthodes de conception des chaussées utilisées pour la conception des routes à faible trafic ont été développées de manière empirique. Il est donc important que les pays utilisent les résultats du suivi des sections d'essai et de la performance des routes existantes pour affiner et adapter en permanence les méthodes à leur climat et à leurs matériaux.

1.2 Objectif

La présente note sur les routes rurales concerne la conception structurelle des routes rurales à faible volume (LVRR) et fournit des orientations sur :

- l'historique des différentes méthodes de conception actuellement utilisées pour les LVRR et les principaux points forts et limites de leur utilisation;
- les décisions initiales nécessaires pour choisir une conception et un revêtement de chaussée appropriés;
- les principales questions relatives à la sélection d'un matériau approprié pour les routes rurales à faible trafic;
- les principales questions relatives à la sélection d'une méthode appropriée de conception des chaussées ;
- les considérations relatives à la résilience climatique et à l'impact environnemental;
- l'analyse économique nécessaire pour choisir les options de conception de la chaussée les plus économiques ou pour justifier l'option choisie.

La note sur les routes rurales s'adresse aux fonctionnaires qui sont chargés de formuler la politique et la planification de la conception structurelle des LVRR et aux ingénieurs qui sont chargés de préparer les conceptions des routes. Elle s'adresse également aux consultants chargés de la préparation et de la conception de projets routiers et aux universitaires qui participent à la formation d'ingénieurs dans le domaine des routes et de l'ingénierie routière.

1.3 Définition des routes rurales à faible volume (LVRR)

Aux fins de la conception des chaussées, une route à faible trafic est définie comme une route conçue pour supporter une charge de trafic cumulée pouvant atteindre environ 1 million d'essieux standard équivalents (MESA) par voie pendant sa durée de vie. Les LVRR sont construits à l'aide de matériaux naturels disponibles localement qui peuvent être modifiés pour répondre aux normes indiquées dans les abaques de conception des LVR et peuvent être non revêtues ou revêtue avec des enduits superficiels bitumineux ou des revêtements à éléments modulaires.

Des recherches récentes menées dans le cadre du projet ReCAP "Élaboration de lignes directrices et de spécifications pour les routes à faible volume d'asphalte par analyse rétrospective" montrent que les matériaux naturels à partir desquels les routes à faible volume d'asphalte sont fabriquées peuvent souvent supporter plus de 3 MESA, en particulier lorsqu'un bon drainage est assuré et que l'entretien du revêtement est effectué en temps utile.

Un certain nombre de pays définissent également les LVRR en fonction du nombre maximum de véhicules commerciaux qui utilisent la route par jour (cvd) au moment de la conception. La limite supérieure est généralement de 300 à 400 véhicules à quatre roues par jour dont jusqu'à 25 % sont des véhicules commerciaux. Mais la conception structurelle nécessite des informations sur la charge par essieu, c'est pourquoi les données cvd seules sont insuffisantes.

1.4 Hiérarchie de LVRR

Dans de nombreux pays, les routes sont classées en fonction de leurs fonctions. On accorde peu d'importance à la classification en fonction du volume de trafic transporté à un moment donné, car cela aurait pour conséquence que certaines routes changent de classe d'une année sur l'autre. Les principales classifications fonctionnelles sont les suivantes :

- les routes de transit : elles relient les villes aux centres d'importance internationale et aux frontières internationales ;
- les routes principales : elles relient les centres d'importance nationale et internationale tels que les principales villes et les centres urbains ;
- Routes secondaires : elles relient les centres d'importance provinciale ou les routes principales ;
- Routes tertiaires/collectrices : elles relient les centres d'importance locale entre eux ou à un centre plus important ou à une route de classe supérieure; et
- Routes de desserte et d'accès : elles relient des centres mineurs, tels qu'un marché de village, à d'autres parties du réseau, et des villages à des exploitations agricoles.

Dans de nombreux pays, les routes appelées LVRR sont incluses dans les classes des routes tertiaires et des routes de desserte. Dans certains cas, les routes secondaires sont conçues selon les normes LVRR parce que la charge de trafic est faible. Certaines routes très LVRR entrent dans la catégorie des "pistes motorisées" avec une largeur de 2 à 3 mètres seulement. Elles peuvent être revêtues pour permettre un accès par tous les temps.

En Afrique, il est courant de trouver des LVRR dans les trois catégories suivantes : secondaire, tertiaire et de desserte, alors qu'en Asie, les LVRR ont tendance à n'appartenir qu'à la catégorie tertiaire et de desserte.

1.5 Champ d'application

Cette note sur les routes rurales concerne principalement la conception structurelle des chaussées pour les routes rurales de faible volume. Elle fournit des conseils sur la conception structurelle des nouvelles routes et la mise à niveau des routes existantes. Partant du principe que toutes les couches d'une chaussée font partie de la structure, y compris le revêtement, cette note sur les routes de rurales comprend également des conseils sur le choix du type de revêtement.

Les six méthodes courantes de conception des chaussées décrites dans ce RRN sont les suivantes :

- A Méthodes basées sur la CBR
- 1) La méthode de conception AASHTO
 - 2) La méthode TRL Overseas Road Note 31
 - 3) La méthode TRL-SADC
 - 4) La méthode de la classe de base
- B Méthodes basées sur le DCP

- 1) Le TRL Overseas Road Note 18 DCP-CBR
- 2) La méthode DCP -DN.

Les méthodes sont classées comme étant soit basées sur la CBR, soit sur la DCP, selon la méthode initiale utilisée pour déterminer la résistance du sol.

Les origines et le champ d'application de ces méthodes de conception sont décrits au chapitre 4, mais les détails de leur utilisation sont traités dans les chapitres 5. D'autres méthodes sont brièvement décrites : Les méthodes empiriques pures telles que les chaussées à éléments modulaires, les chaussées Macadam et Telford ; et les chaussées rigides.

La qualité des routes fournies dépend normalement de leur classification fonctionnelle. Cela va des routes de desserte dont la fonction principale est de fournir un accès aux routes principales qui relient les villes principales et les postes frontalières. Les routes construites principalement pour l'accès supportent normalement un faible volume de trafic quotidien et relativement peu de véhicules lourds. Cependant, il est un principe établi que les routes doivent être conçues pour la tâche qu'elles doivent accomplir, et ceci est défini par leur fonction et le niveau et les caractéristiques du trafic qu'elles doivent transporter. Ainsi, bien que la fonction et le niveau de trafic soient généralement étroitement corrélés, les routes classées comme à faible volume sont principalement des routes dont la fonction principale est l'accès mais comprennent également certaines routes dont la fonction principale est la mobilité, selon les définitions de chaque pays.

La note sur les routes rurales s'applique à un large éventail de pays ; il serait donc peu pratique et inapproprié de fournir des solutions recettes pour des situations spécifiques. L'accent a plutôt été mis sur l'orientation du praticien vers l'évaluation des options alternatives et l'examen de leurs applications et de leurs limites comme base de décision et d'application à des situations spécifiques à la région et sur une base projet par projet. Pour ce faire, on a rassemblé dans un seul document des conseils sur l'application de solutions éprouvées, nouvelles et innovantes dans tous les aspects de la conception structurelle des chaussées en LVRR. En outre, des références pertinentes sont citées pour des informations plus approfondies.

Le RRN s'occupe de toute une gamme de types de routes rurales, des pistes en terre aux routes bitumées et comprend des routes revêtues d'éléments modulaires tels que des pavés et des blocs de pavage (revêtements semi-rigides) et donne également quelques conseils sur les chaussées rigides. Le RRN ne traite pas spécifiquement de la conception des LVR urbains mais certains aspects, par exemple la conception structurelle des sections de route avec des revêtements à éléments modulaires, sont également applicables dans les zones urbaines.

L'estimation du trafic de conception n'est pas couverte dans ce RRN car le sujet est bien traité dans les manuels nationaux existants.

1.6 Principes de la note sur les routes rurales

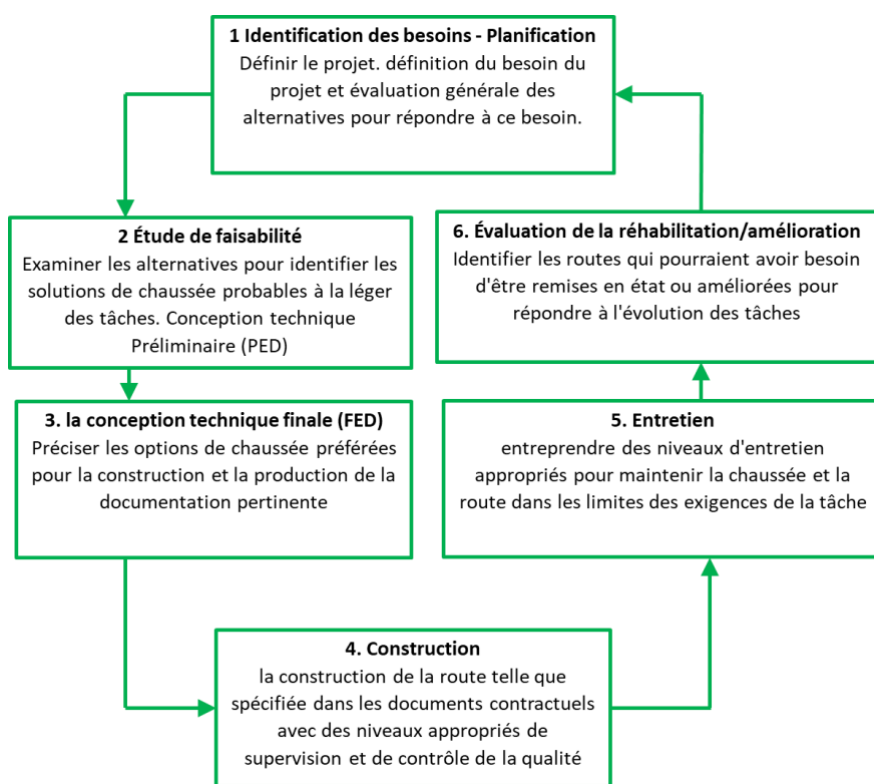
L'objectif est de fournir aux praticiens de la route, y compris aux décideurs non ingénieurs, un document de référence pratique sur le choix de la méthode de conception des chaussées la plus appropriée pour les LVRR pour chaque situation, qui soit à la fois documenté et contemporain. En tant que tel, il établit un cadre essentiel, définit les questions clés et indique clairement les procédures qui peuvent être utilement suivies afin de répondre aux défis régionaux et spécifiques aux usagers. Cette note sur les routes rurales s'inscrit dans le cadre du principe selon lequel les routes doivent être conçues de manière à être compatibles avec les facteurs de gouvernance locaux, comme indiqué ci-dessous et illustré dans le cycle du projet (figure 1 1). Les routes sont conçues pour une longue durée de vie, mais elles se détériorent avec le temps et la circulation et doivent alors être réparées ou reconstruites. Ainsi, la vie d'une route peut être décrite comme un cycle, comme le montre la figure 1-1. La conception des routes à faible volume en général est basée sur les principes suivants :

1. **Basé sur les tâches** : Les routes doivent être adaptées à leur fonction identifiée et à la nature du trafic (les personnes comme les véhicules) qui les traversera, en appliquant des normes appropriées.
2. **Compatibilité avec l'environnement** : La conception doit être adaptée à l'environnement routier local.

- Basé sur les ressources locales** : Les orientations en matière de conception routière doivent être compatibles avec les capacités des ingénieurs et des techniciens qui concevront les routes et des entrepreneurs et des ouvriers qui les construiront, utiliser des matériaux de construction facilement disponibles et faire en sorte que les routes soient à la portée des communautés ou des organisations locales pour leur entretien.

1.7 Le cycle de la chaussée

Une série de décisions importantes doivent être prises dès les premières étapes de l'élaboration d'un projet de route rurale. Ces décisions doivent être prises dans un ordre particulier. Le processus de décision peut être développé et étendu à ce que l'on peut appeler le "cycle de vie de la chaussée", Figure 1-1. Le cycle de vie des chaussées est un cadre permettant de présenter des orientations et des recommandations. Le cycle de vie des chaussées agit comme une carte de route vers les connaissances pertinentes et les niveaux appropriés d'informations et de procédures nécessaires pour prendre des décisions fondées sur la connaissance. L'utilisation du cycle de vie des chaussées offre également aux praticiens une certaine souplesse en termes de point d'entrée. La présente note sur les routes rurales concerne la conception structurelle des chaussées et, par conséquent, les encadrés 3 et 6 de la Figure 1-1.



Source : Cook et al 2013 - voir référence au chapitre 6.

Figure 1-1: Le cycle de vie des chaussées

1.8 L'environnement routier

Pour parvenir à une conception durable des routes, il convient de procéder à une évaluation précoce de l'environnement routier afin de déterminer si les revêtements non étanches conviennent et si d'autres options sont souhaitables. Les recherches ont montré que les précipitations, la pente, les matériaux, les pratiques de construction et le régime d'entretien ont des répercussions importantes sur la durabilité des routes en terre non revêtues. L'évaluation environnementale présentée dans le Tableau 1-1 est nécessaire pour comprendre l'environnement technique de la route en question.

Tableau 1-1: Facteurs d'impact environnementaux de l'ingénierie routière

Facteur d'impact	Description
Climat/précipitations	Le climat influence l'approvisionnement et le mouvement de l'eau et a des répercussions sur la route en termes d'érosion directe par le ruissellement, la production de poussière et les influences du régime des eaux souterraines. Les indices climatiques ont une influence significative sur le choix des options de chaussée et leur conception pour des conditions « humides » ou « sèches ». Les performances de surface non revêtues sont particulièrement influencées par la quantité et l'intensité des précipitations, ainsi que par les arrangements de ruissellement.
Hydrologie de surface et de surface	Le mouvement de l'eau à l'intérieur et à côté de la structure de la route a un impact majeur sur la performance de la chaussée et le revêtement. Les variations saisonnières de l'humidité influencent le comportement de la chaussée à côté des accotements non revêtus. Les changements dans l'état d'humidité en surface sont le déclencheur d'importants changements de Sol support et de volume de terrassement dans les chaussées recouvertes de matériaux d'argile « expansifs ».
Terrain	Le terrain reflète l'histoire géologique et géomorphologique. Outre son influence évidente sur la géométrie (grade et alignement) des exigences en matière de routes et de terrassement, les caractéristiques du terrain reflètent et influencent également la disponibilité des matériaux et des ressources.
Propriétés des matériaux	La nature, les propriétés d'ingénierie et l'emplacement des matériaux de construction sont des aspects clés de l'environnement routier. Pour les LVR, lorsque l'utilisation de matériaux locaux est une priorité, la question clé devrait être la suivante : « quelles options de conception sont compatibles avec les matériaux disponibles ? » plutôt que de chercher à trouver des matériaux qui répondent aux spécifications standard, comme c'est le cas pour les routes de niveau supérieur. Les spécifications doivent être adaptées à l'environnement local et aux matériaux disponibles localement.
Sol support	Le sol support est la couche de fondation de la chaussée. L'évaluation de son état en service est essentielle à la conception de la chaussée.
Trafic	Bien que la recherche indique que l'influence relative du trafic sur les LVR est souvent inférieure à celle d'autres facteurs liés à l'environnement routier, il faut tenir compte de l'influence de la circulation et, en particulier, du risque de surcharge des véhicules. La circulation est une influence majeure sur les performances des surfaces de route non revêtues et revêtues ou Bitumées.
Régime de construction	Le régime de construction régit si la conception de la route est appliquée de façon appropriée ou non. Les éléments clés sont les suivants : <ul style="list-style-type: none"> • Cadre contractuel approprié ; • Expérience des entrepreneurs ou des groupes de construction ; • Compétences et formation de la main-d'œuvre et des superviseurs ; • Disponibilité, utilisation, état et adéquation de l'usine de construction ; • Sélection, manipulation et placement des matériaux ; Et • Assurance de la qualité, échantillonnage et essais, et respect des spécifications.
Régime d'entretien	Toutes les routes, qu'elles soient conçues et construites, nécessitent un entretien régulier pour s'assurer que leur fonction de base est assurée tout au long de leur vie de conception. Cet objectif dépend des stratégies d'entretien adoptées, de la rapidité des interventions, de la capacité locale et du financement disponible pour identifier et réaliser les travaux nécessaires. Lors de la sélection d'une option de conception de route, il est essentiel d'évaluer le régime d'entretien qui sera en place pendant la durée de conception de la route afin que les conceptions puissent être ajustées en conséquence, ou le régime d'entretien amélioré. UNE ROUTE NE DOIT PAS ÊTRE CONSTRUITE SANS UNE STRATÉGIE D'ENTRETIEN À LONG TERME !

Source : Cook et al. 2013 - voir référence au chapitre 6.

D'autres facteurs qui influencent le choix de la technologie à appliquer jouent également un rôle important dans l'aménagement des routes. Ils sont résumés dans le Tableau 1-2. Un choix éclairé de l'approche ne devrait être entrepris qu'après une compréhension complète des facteurs techniques et des facteurs favorables.

Tableau 1-2: Facteurs environnementaux propices à la route

Facteur d'impact	Description
Politiques	Les politiques nationales ou locales comprennent des priorités et des lignes directrices pour les processus décisionnels. Il y a aussi des exigences légales qui doivent être respectées.
Classification	Les classifications routières fondées sur la tâche ou la fonction fournissent aux planificateurs et aux concepteurs de routes un cadre d'orientation pratique pour choisir d'abord une option routière appropriée et en estimer le coût. Le fait d'avoir une classification claire des routes rurales liée aux normes pertinentes facilite la conception et la construction selon des critères de rendement acceptables.
Normes (géométrie et sécurité)	Les normes géométriques influencent le confort et la sécurité des usagers de la route, l'impact de la gestion de l'eau sur et en face de la route, et l'exigence de travaux de terrassement qui peuvent affecter l'environnement local. Les LVR accueillent un large éventail d'usagers, des piétons aux camions. Le mélange de circulation doit être pris en compte dans la géométrie de base de la route, par exemple l'utilisation d'accotements plus larges où le flux des piétons, des bicyclettes et d'autres usagers non motorisés est élevé. Dans les zones urbaines, la circulation des piétons devrait être prise en compte le long des routes.
Spécifications techniques	Les spécifications techniques définissent les exigences minimales pour la construction de la chaussée et le revêtement. Les spécifications doivent être adaptées à l'environnement routier et au cadre de classification des routes en vigueur.
Modalités de financement	Le financement a une influence excessive sur l'ampleur et la nature de l'aménagement des routes, y compris les exigences en cours pour la gestion et l'entretien des routes.
Régime de passation des marchés	La nature du régime général de passation des marchés peut influencer sur un projet routier à travers les questions suivantes : <ol style="list-style-type: none"> 1. Législation locale et documentation contractuelle ; 2. Gouvernance et niveau de bureaucratie ; 3. Des entrepreneurs publics ou privés ; 4. Les entrepreneurs nationaux ou internationaux ; 5. - Dispositions pour aider les PME locales ; Et 6. Ressources locales et approches à faible capital.
L'environnement « vert »	La construction et l'utilisation et l'entretien continus des routes ont un impact sur l'environnement naturel, y compris la flore, la faune, l'hydrologie, la stabilité des talus, le contrôle de l'érosion, la santé et la sécurité. Ces impacts doivent être évalués et atténuer les effets négatifs dans la mesure du possible par des procédures de conception et de construction appropriées. Les questions clés comprennent la protection de la qualité de l'eau (et parfois la collecte), le mouvement et la connectivité de la faune, peut-être le passage des poissons, la minimisation des mouvements d'espèces envahissantes et les besoins sociaux.

Source : Cook et coll. 2013 – voir référence au chapitre 6.

1.9 Conception optimisée pour l'environnement (EOD)

La plupart des routes rurales sont conçues selon des plans nationaux standard sur toute leur longueur. Toutefois, cela peut être coûteux et ne répond parfois pas aux besoins de tous les usagers de la route. L'approche EOD permet de choisir des conceptions de chaussée différentes en fonction de l'évolution des facteurs de l'environnement routier le long d'un tracé. Chaque route ou tronçon de route est conçu pour répondre à ses conditions d'environnement spécifiques, ce qui permet de concentrer les ressources budgétaires disponibles sur des domaines qui peuvent, par exemple ;

- être exposés à des risques techniques élevés, par exemple en raison d'un mouillage fréquent ;
- présenter des problèmes de sécurité importants ;
- présentent des responsabilités élevées en matière de maintenance ; ou
- ont une priorité socio-économique élevée.

Lors de la sélection des solutions optimisées, les facteurs du Tableau 1-1 et du Tableau 1-2 doivent être considérés comme un tout. L'EOD couvre un éventail de solutions pour améliorer ou créer un accès rural à faible volume pour différentes longueurs de route, notamment :

- 1) Améliorations ponctuelles - traitement de zones critiques individuelles sur une liaison routière qui ne sont pas reliées entre elles. L'amélioration ponctuelle est basée sur l'ingénierie et implique des options de revêtement et d'autres solutions compatibles avec la durée de vie de la route ; elle ne doit pas être confondue avec l'entretien ou les réparations d'urgence.
- 2) Fournir une conception appropriée pour les différents segments du tracé routier.
- 3) Amélioration de la longueur totale.

L'approche EOD garantit que les spécifications et les conceptions soutiennent la fonction requise de chaque section de route différente. Elle offre une solution pragmatique pour l'utilisation de ressources limitées afin de fournir un niveau de service acceptable.

Dans le cadre de l'option d'amélioration ponctuelle, les améliorations de la route peuvent être classées par ordre de priorité en fonction de certains critères, généralement l'importance d'un accès sûr et fiable, ou d'une route sans poussière traversant un village. Un tronçon de route non aménagée qui permet l'accès et qui n'est pas critique peut, par exemple, ne recevoir qu'un entretien minimal alors que d'autres sites sont améliorés. Une route peut comprendre des tronçons de voie non formée, des tronçons gravillonnés et un tronçon de chaussée revêtue, en béton ou en blocs, en haut d'une colline, par exemple, suite à des "améliorations ponctuelles". Cette approche permet d'équilibrer les solutions de revêtement à faible coût, comme le gravier et les surfaces naturelles aménagées pour les zones à faible risque, avec des solutions plus coûteuses pour les zones à haut risque. Cette approche peut être utilisée pour garantir un accès de base lorsque les ressources d'investissement sont très limitées.

L'approche optimisée sur le plan environnemental pour la conception des routes rurales est un élément clé de la note sur les routes rurales. Elle peut être appliquée aux interventions qui portent sur des sections critiques individuelles ou sur la longueur totale d'une liaison routière. Dans ce dernier cas, elle peut comprendre différentes options de conception sur la longueur totale de la route.

En outre, il convient de noter que pour les matériaux naturels utilisés dans de nombreuses routes à faible volume, les facteurs environnementaux (principalement climatiques) jouent un rôle clé dans leur performance. L'influence relative des facteurs environnementaux et du trafic varie de manière schématique, comme le montre la Figure 1-2. Le croisement réel entre les facteurs varie en fonction du climat, des matériaux utilisés et de la configuration de la chaussée. Cela signifie qu'il convient de veiller tout particulièrement à ce que le drainage soit bien conçu et entretenu si l'on veut que ces matériaux aient de bonnes performances.

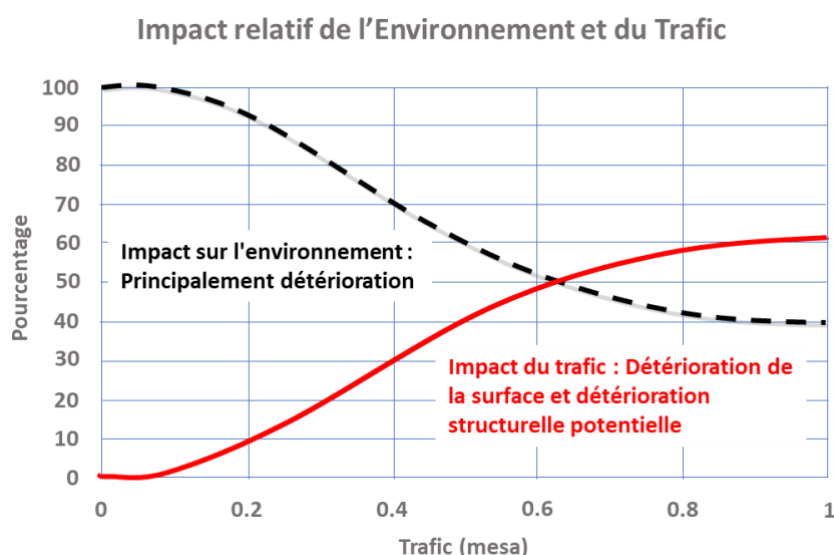


Figure 1-2: Schéma de l'impact relatif des facteurs environnementaux et du trafic

1.10 Structure de la note sur les routes rurales

La note sur les routes rurales est organisée de telle sorte que les considérations clés qui sont communes à toutes les méthodes de conception des chaussées et qui ont une forte incidence sur la performance de toute conception, telles que le drainage, la résistance au climat et le choix des matériaux, sont examinées en premier lieu. Ensuite, les méthodes de conception des chaussées et la sélection des types de revêtement appropriés sont examinées. Enfin, l'analyse économique et les considérations accessoires sont abordées.

Le Chapitre 2 aborde les principales considérations relatives à la conception du drainage et les défis créés par le changement climatique.

Le Chapitre 3 concerne les caractéristiques et les spécifications des matériaux utilisés pour la construction de la route et les différences entre les méthodes de conception de la chaussée.

Le Chapitre 4 présente le contexte des méthodes de conception des chaussées envisagées.

Les méthodes de conception des chaussées pour les routes à faible trafic sont décrites en détail dans les Chapitres 5 et la conception des routes à faible trafic et des routes principales à revêtement en gravier est examinée dans le Chapitre 6.

Il existe de nombreux revêtements différents adaptés aux routes rurales à faible volume et leur sélection constitue le contenu du Chapitre 7.

Le Chapitre 8 traite de l'analyse économique pour la comparaison des différentes options de conception des revêtements.

Les facteurs qui influent sur la conception et les performances des chaussées, mais qui ne sont pas traités dans la plupart des manuels de conception des RVL, sont abordés dans un contexte général au Chapitre 9. Il s'agit notamment de l'amélioration des sols, de la stabilité des talus pour les déblais et les remblais, de la gestion des bancs d'emprunt et du compactage. En outre, un aperçu est fourni sur la manière d'intégrer les résultats de certaines des récentes recherches ReCAP et les résultats des recherches en cours dans les manuels existants.

L'annexe A comprend des tableaux qui aident à sélectionner les matériaux à utiliser sur les routes à faible trafic.

2 CONCEPTION DU DRAINAGE ET RÉSILIENCE CLIMATIQUE

2.1 Contexte

La plupart des LVR sont construits à partir de matériaux naturels, souvent non transformés, qui ont tendance à être sensibles à l'humidité. Cela met l'accent sur le drainage et le contrôle de l'humidité pour obtenir une durée de vie satisfaisante de la chaussée. Quelle que soit la région climatique, si le site dispose de drains latéraux efficaces et d'une hauteur de couronne adéquate, l'humidité de la couche de fondation in situ restera probablement à la teneur en eau optimale (TEO) ou en dessous. Si le drainage est médiocre, l'humidité in situ augmentera au-dessus de la TMO avec une perte de résistance correspondante. En outre, les problèmes liés au changement climatique sont particulièrement pertinents pour la conception du drainage.

La conception d'une infrastructure de drainage résistante au climat est basée sur cinq principes clés.

- 1) Connaître la quantité d'eau que le système de drainage doit traiter. Ceci est essentiellement basé sur la connaissance du climat et de l'hydrologie.
- 2) Empêcher l'eau d'entrer dans les structures routières en les rendant étanches et en détournant l'eau qui coule de la route.
- 3) Minimiser la perte de résistance en cas d'immersion - les chaussées et les structures de drainage ne doivent pas perdre une résistance significative lorsqu'elles sont trempées.
- 4) Assurer une stabilité adéquate contre les mouvements. Les infrastructures routières doivent être suffisamment stables et robustes pour résister aux forces de l'eau qui tente de les déplacer.
- 5) Éliminer rapidement l'eau de la chaussée et de la surface grâce à de fréquents drains transversaux de décharge, des drains latéraux, des fossés de décharge et la pente de la surface de la route (couronne ou pente transversale).

Ce chapitre porte sur les questions d'ingénierie que le concepteur de la route doit prendre en compte pour fournir une structure de drainage routière satisfaisante. Par commodité, la conception du drainage est généralement subdivisée en deux composantes, à savoir le drainage externe et le drainage interne.

2.2 Objectif et portée

L'humidité est le facteur le plus important qui affecte la performance de la chaussée et son entretien à long terme. Ainsi, l'un des défis majeurs auxquels est confronté le concepteur est de fournir une structure de chaussée dans laquelle les effets néfastes de l'humidité sont atténués dans des limites acceptables en fonction de la charge de trafic, de la nature des matériaux utilisés, des dispositions de construction et d'entretien et du degré de risque acceptable. Par conséquent, bien que le drainage ne fasse pas partie de la conception structurelle, il est d'une importance vitale pour le succès de la conception structurelle et des performances de la route et, à ce titre, les deux sujets sont traités en parallèle.

L'objectif de ce chapitre est de donner un aperçu des aspects clés du drainage et de la résilience climatique qui doivent être pris en compte afin de fournir une chaussée robuste qui sera en mesure de remplir sa fonction de manière durable. Le chapitre ne couvre pas l'hydrologie détaillée et la conception du drainage (ceux-ci peuvent être trouvés dans les manuels des pays respectifs). Les détails des évaluations de la vulnérabilité climatique et des mesures d'ingénierie sont contenus dans les manuels inclus dans la liste de référence. Néanmoins, pour les routes à faible trafic, le drainage et la résilience climatique sont souvent liés.

2.3 Drainage externe

Le rôle du drainage externe est d'éloigner l'eau de la route. Il comprend donc les fossés de drainage, les ponceaux, les revêtements, les accotements, la Profil en travers de la route et, dans une certaine mesure, l'alignement. Le Tableau 2-1 montre comment l'eau peut entrer ou s'écouler d'un revêtement routier. Cette section est suivie par les méthodes permettant d'empêcher l'eau de pénétrer dans la route, puis par les méthodes permettant d'évacuer l'eau qui parvient à pénétrer dans la chaussée.

Tableau 2-1: Mécanismes d'entrée et d'évacuation de l'eau dans les chaussées

Moyens d'entrée dans l'eau	Explication
À travers la surface de la chaussée	Par des fissures dues à une défaillance de la chaussée
	Pénétration par des couches intactes
Du Sol support	Tête artésienne dans le Sol support
	Action de pompage au niveau de la formation
	Action capillaire dans la fondation
Des marges de la route	Infiltration à partir de terrains plus élevés, en particulier dans les boutures
	Chutes inversées au niveau de la formation
	Surcharge de drain latéral/médian
	Action capillaire dans la fondation
	Grâce à un accotement non revêtu collecte chaussée et ruissellement au sol
Grâce à l'hydrogénèse (l'effet de puits aérien)	Condensation et collecte de l'eau de la phase de vapeur sur le dessous d'une surface imperméable
Dans le Sol support	Action Soakaway
	Aspiration sous-dégradée
Vers les marges routières	Dans les drains latéraux/médians sous le flux gravitationnel de la fondation
	Dans les drains positifs par des drains croisés agissant comme collecteurs

2.3.1 Entrée par les drains latéraux et les marges routières

Pour obtenir un drainage extérieur adéquat, la route doit être surélevée par rapport au niveau du sol existant de telle sorte que la hauteur du sommet de la route (c'est-à-dire la distance verticale entre le bas du drain latéral et le niveau de la route finie au niveau de la ligne centrale) soit maintenue à une hauteur minimale, h_{min} . Cette hauteur doit être suffisante pour empêcher l'infiltration d'humidité dans la voie de roulement extérieure de la chaussée, potentiellement vulnérable (Figure 2-1), ainsi que dans toute la section structurelle.

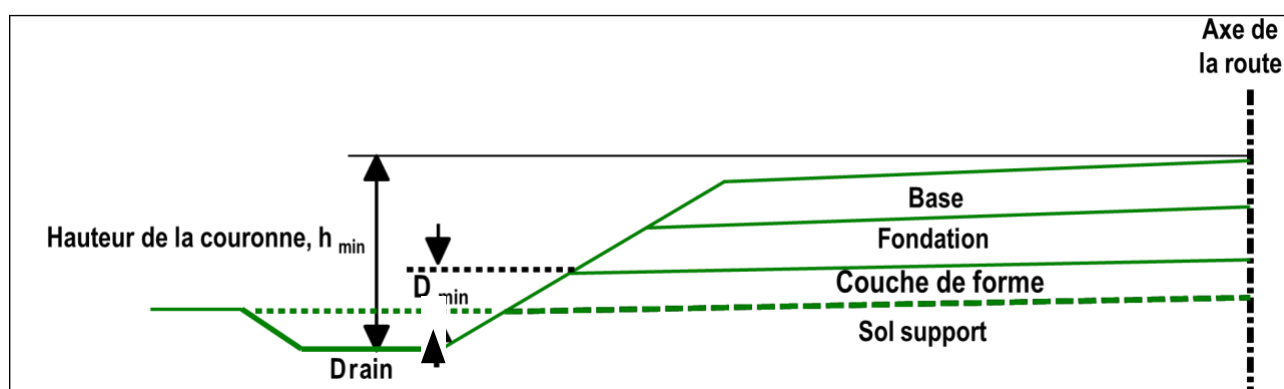


Figure 2-1: Hauteur de la couronne pour les routes revêtues par rapport à la profondeur du fossé de drainage

La hauteur minimale recommandée de 0,75 m pour le sommet s'applique aux routes dont les drains ne sont pas revêtus sur un terrain relativement plat (pente longitudinale inférieure à 1 %). Les valeurs recommandées pour les terrains en pente (pente > 1 %) ou lorsque des drains revêtus sont utilisés, par exemple, dans les zones urbaines ou périurbaines, sont indiquées dans le Tableau 2-2.

La capacité du drain doit répondre aux exigences relatives à la période de retour de la tempête.

Tableau 2-2: Hauteur recommandée de la couronne, h_{\min} (m), par-dessus le fossé de drainage inverse

Drains non doublés		Drains doublés	
Gradient < 1%	Gradient > 1%	Gradient < 1%	Gradient > 1%
0.75	0.65	0.65	0.50

Les drains latéraux sont conçus pour accueillir les eaux de ruissellement provenant de la surface de la route et du sol environnant. Lors de la crue de conception, une profondeur maximale d'écoulement est autorisée et cela, combiné aux caractéristiques du canal, permet de calculer la capacité du drain. La profondeur d'écoulement crée à son tour le gradient hydraulique qui fait que l'eau s'infiltré des drains latéraux dans la chaussée. La quantité d'eau qui s'infiltré à travers les pentes latérales des drains et sa portée à l'intérieur de la chaussée dépend de la perméabilité des matériaux de la chaussée et du niveau de compactage. L'importance de l'infiltration détermine son influence sur la performance de la chaussée.

Pour minimiser l'infiltration d'eau dans la chaussée depuis le côté de la route, il faut limiter la hauteur du niveau de l'eau dans le drain à un niveau inférieur à la base pour les routes à forte circulation et à un niveau inférieur à la base pour les routes à faible circulation. La première est recommandée pour les routes secondaires et la seconde pour les routes tertiaires et vicinales. Ceci est basé sur le niveau de risque et la taille du projet.

Il est fortement recommandé que les ingénieurs procèdent à la conception du drainage de chaque élément de la route, quelles que soient les conditions climatiques. L'hydrologie et la conception du drainage doivent être effectuées de manière détaillée pour déterminer le ruissellement et concevoir les évacuations de crues afin de s'assurer que les conditions de profondeur maximale de l'eau mentionnées ci-dessus sont satisfaites. Cela permettra de garantir une hauteur de couronne adéquate.

Outre le respect des exigences en matière de hauteur de couronne, il est également important de veiller à ce que le fond de la couche de fondation soit maintenu à une hauteur d'au moins 150 mm au-dessus du niveau du sol existant (distance d_{\min} indiquée dans la Figure 2-1 et appelée "profondeur de radier") afin de minimiser la probabilité de mouillage de cette couche de chaussée par l'infiltration d'humidité provenant du drain.

2.3.2 Entrée par le revêtement

Aucune route n'est imperméable en permanence en raison du durcissement par oxydation et de la fissuration qui s'ensuit et qui se développera inévitablement dans le revêtement et les couches supérieures de la chaussée à un moment donné de sa vie utile, à moins que des rescallages ne soient appliqués au moment où la fissuration commence. Bien que l'on pense généralement que les joints bitumineux sont imperméables au début de leur vie, les enrobés à froid à granulométrie ouverte ont tendance à être perméables, et la plupart des chaussées deviennent quelque peu perméables avec le temps (Cedergren 1977). De nombreux revêtements bitumineux minces mal construits, en particulier ceux qui font appel à des coulis bitumineux, peuvent également souffrir de ce problème.

Lors de la conception de LVR étanches, il est important de tenir compte de l'infiltration d'eau à travers la surface pour évaluer le risque d'utiliser des matériaux dans la chaussée qui sont sensibles à l'humidité dans les zones à fortes précipitations. Une fois que la surface est percée et que l'eau y pénètre, l'adoucissement de la base peut entraîner une détérioration accélérée par des fissures et des poinçonnements progressifs conduisant à la formation de nids de poule. Il est recommandé d'utiliser un revêtement à faible perméabilité tel que le cape seal, le double Otta Seal, le double Surface Dressing, ou des mélanges denses à froid dans les zones humides ; à moins que la base n'ait un produit à faible plasticité (PP). Un régime d'entretien approprié, soutenu par un bon système de gestion de réseau, est nécessaire pour garantir que les revêtements sont entretenus, rajeunis ou rescallés en temps utile. Un géotextile et une couche intermédiaire de bitume peuvent assurer une bonne étanchéité. Il est également recommandé que les régimes d'entretien soient adaptés aux différents types de revêtements, car leurs performances et leur résilience peuvent différer sensiblement.

2.3.3 Entrée par l'accotement de la route

Les accotements non revêtus sont souvent construites avec les mêmes matériaux que la couche de base. Ces matériaux ont tendance à être non plastiques ou légèrement plastiques. Dans les cas où des matériaux hautement plastiques (module de plasticité supérieur à 300) sont utilisés dans les couches de base, si les accotements ne sont pas revêtus, l'eau s'infiltrera facilement à travers les accotements dans la couche de base et provoquera un affaiblissement.

Il est recommandé de sceller les accotements. Des exceptions peuvent être faites dans les situations où les fonds sont limités ou lorsque la route se trouve dans une zone à faible pluviométrie, c'est-à-dire semi-aride et aride.

Les accotements revêtus offrent des avantages significatifs en termes d'amélioration des performances structurelles de la chaussée. L'étanchéité empêche l'infiltration de l'eau de pluie dans les couches de la chaussée juste en dessous de la voie extérieure des roues, ce qui permet d'obtenir un environnement plus sec. La zone de fluctuation de l'humidité est éloignée de la trajectoire des roues. Si l'ingénieur concepteur peut ainsi estimer avec précision l'état d'humidité, des matériaux plus faibles (sensibles à l'humidité) que ceux qui seraient nécessaires lorsque les accotements sont non revêtus, peuvent être utilisés en toute sécurité dans les couches supérieures de la chaussée. La résistance de ces matériaux (quelle que soit la méthode de conception de la chaussée), dans ces circonstances, peut-être la résistance évaluée à cette teneur en humidité. Dans tous les cas, si le concepteur n'utilise pas de matériaux plus faibles, des accotements revêtus permettront néanmoins d'obtenir une meilleure performance de la chaussée.

En outre, les accotements permettent au trafic non motorisé d'emprunter la route en toute sécurité, à l'écart du trafic motorisé rapide.

Gourley et Greening (1999) ont montré que les avantages (grâce aux économies réalisées en utilisant des matériaux moins performants) de l'étanchéité des accotements l'emportent sur l'option des accotements non étanches. Ils recommandent une largeur d'accotement revêtu telle que la voie de roulement extérieure se trouve à plus de 1,5 mètre du bord de la zone revêtu. La manière la plus simple d'y parvenir est de prolonger le joint de la chaussée jusqu'aux accotements, de préférence jusqu'au bord de l'évacuation latérale.

Il faut éviter autant que possible de laisser un espace non revêtu entre le drain d'étanchéité (Figure 2-2). Le revêtement du drain doit se raccorder au bord du revêtement comme indiqué sur la Figure 2-3.



Figure 2-2: Mauvais - Écart entre le revêtement de surface et le revêtement du drain



Figure 2-3: Bon - Revêtement de drainage relié au bord du revêtement

D'autres aspects importants qui doivent être abordés sont l'inclusion de contrôles de récurage, de drains à onglet, de drains de prise d'eau et de goulottes. Tous ces aspects sont abordés dans les manuels LVRR qui sont actuellement utilisés (voir la bibliographie).

2.3.4 *Prévention de l'infiltration d'eau dans la chaussée*

Les mesures suivantes doivent être envisagées pour prévenir l'infiltration d'eau dans la chaussée :

- 1) Construire un joint qui empêche la pénétration de l'eau. Ces joints doivent être bien entretenus pour minimiser ou retarder la formation de fissures, en utilisant par exemple des vaporisateurs de brouillard et des rescellages.
- 2) Utiliser des joints imperméables tels que Otta Seal, Cape Seal, et un revêtement dense, par exemple un mélange à froid à granulométrie dense ou une couche d'asphalte avec une couche intermédiaire géotextile imprégnée de bitume.
- 3) Utiliser une base dense de matériaux bien calibrés avec des niveaux de compactage élevés.
- 4) Empêcher la pénétration de l'humidité par les bords de la chaussée en scellant les accotements, en surélevant le talus, en doublant le drain latéral, etc.

2.3.5 *Drainage de l'eau des zones environnantes*

L'eau des zones environnantes est évacuée par des drains latéraux, des collecteurs d'eaux usées, des coupes et des puisards. La procédure de conception comprend une analyse hydrologique et une conception hydraulique pour déterminer les caractéristiques du débit des eaux pluviales.

Les éléments clés de la conception sont la capacité d'évacuation et la prévention de l'affouillement. La capacité du système de drainage est déterminée en utilisant la période de retour de l'orage pour calculer le débit et en utilisant l'intensité des précipitations. Les niveaux d'inondation maximums sont parfois prédéterminés sur la base de critères tels que le niveau maximum admissible (par exemple, à un niveau ne dépassant pas le fond de la couche de fondation). Le potentiel d'affouillement doit être calculé dans le but de minimiser les dommages causés par les tempêtes. Lorsque le potentiel d'affouillement est élevé, il convient de mettre en place des contre-mesures telles que des drainages transversaux ou des drains à onglet fréquents, des revêtements de drainage, des mesures de bio-ingénierie ou de dissipation d'énergie ou des modifications des caractéristiques du canal et du débit pour éviter un affouillement excessif.

2.3.6 *Drainage de l'eau de la surface de la route*

Les mesures suivantes doivent être mises en place :

- 1) Un carrossage positif doit être conçu pour permettre l'évacuation rapide des eaux d'orage de la chaussée. Les routes revêtues doivent avoir une cambrure minimale de 2 %. Les routes non revêtues doivent avoir un carrossage de 4 à 6 % par rapport à la couronne et à la chaussée.
- 2) Le drainage des eaux d'orage doit être conçu de manière à empêcher l'eau de s'accumuler sur les accotements ou les bordures et de s'écouler sur la surface de circulation. Le drainage des eaux pluviales doit être conçu en fonction de la capacité d'évacuation requise, sur la base des caractéristiques de l'écoulement. Les éléments du drainage des eaux pluviales comprennent les bordures et les canaux, les goulottes, les cascades, le drainage des bords et du milieu, les fosses de drainage, les réseaux de tuyaux et les entrées grillagées.

2.4 *Drainage interne et de sous-sol*

Le drainage interne concerne le mouvement de l'eau qui pénètre dans la chaussée malgré un système de drainage externe efficace et fonctionnel. Cela se fait généralement par infiltration, par capillarité et par le revêtement.

2.4.1 *Pente transversale des accotements*

Lorsque des matériaux de base perméables sont utilisés, une attention particulière doit être accordée au drainage de cette couche. Dans l'idéal, la base et la sous-fondation de la route devraient s'étendre sur les accotements jusqu'aux fossés de drainage. En outre, une pente transversale est nécessaire pour faciliter l'évacuation de l'eau dans les drains latéraux. Une pente d'environ 4 à 6 % est recommandée pour les accotements. Toutefois, il n'est généralement pas possible d'obtenir une pente plus importante sur les accotements que sur la chaussée et tous les efforts doivent être faits pendant la construction pour s'assurer que la pente de la surface de roulement de la route est correcte, de préférence à la limite supérieure (3 %)

de la plage spécifiée. Cela permet de garantir que, même avec un léger orniérage, les eaux de surface continuent à s'écouler de la chaussée. La pente transversale de la chaussée des routes non revêtues doit être de 4 à 6 %.

Le drainage latéral peut être encouragé en construisant les couches inférieures de la chaussée avec une inclinaison transversale exagérée, en particulier lorsqu'il y a inversion de la perméabilité (diminution de la perméabilité au fur et à mesure que l'on descend dans les couches de la chaussée, section 2.5.2). Cela peut se faire en construisant le haut du remblai ou la couche inférieure de la chaussée avec une pente transversale de 4 à 5 %). Bien que cela puisse entraîner des difficultés lors de la mise en place de la construction, il est utile d'y réfléchir, d'autant plus que le drainage complet sous la chaussée est rarement justifié économiquement pour les LVR. En outre, il permet d'augmenter quelque peu la résistance de la chaussée en raison de l'épaisseur légèrement plus importante du matériau de la chaussée au niveau de la voie extérieure des roues, où la structure est plus vulnérable aux dommages. Toutefois, ce dispositif de drainage idéal est plus difficile à réaliser dans la pratique que la construction de toutes les couches avec la même pente transversale.

Il ne faut en aucun cas utiliser une Profil en travers de type tranchée (ou en caisson) dans laquelle les couches de chaussée sont confinées entre des accotements continus et imperméables. Ce type de construction a l'effet indésirable d'emprisonner l'eau à l'interface chaussée/accotement et d'empêcher l'écoulement de l'eau dans les fossés de drainage, ce qui, à son tour, facilite l'endommagement des accotements et une éventuelle défaillance, même en cas de faible trafic.

S'il est trop coûteux d'étendre la base et le matériau de la sous-fondation à travers l'accotement, des canaux de drainage à intervalles de 3 à 5 m doivent être creusés à travers l'accotement jusqu'à une profondeur de 50 mm sous le niveau de la sous-fondation. Ces canaux doivent être remblayés avec un matériau de qualité de base, mais plus perméable que la base elle-même, et ils doivent présenter une pente de 1 sur 10. Une autre solution consiste à poser une couche continue de matériau perméable d'une épaisseur de 75 à 100 mm sous l'accotement, de sorte que le fond de la couche de drainage se trouve au niveau du haut de la sous-fondation, avec des points de décharge réguliers dans le drain latéral.

2.4.2 Éviter l'inversion de la perméabilité

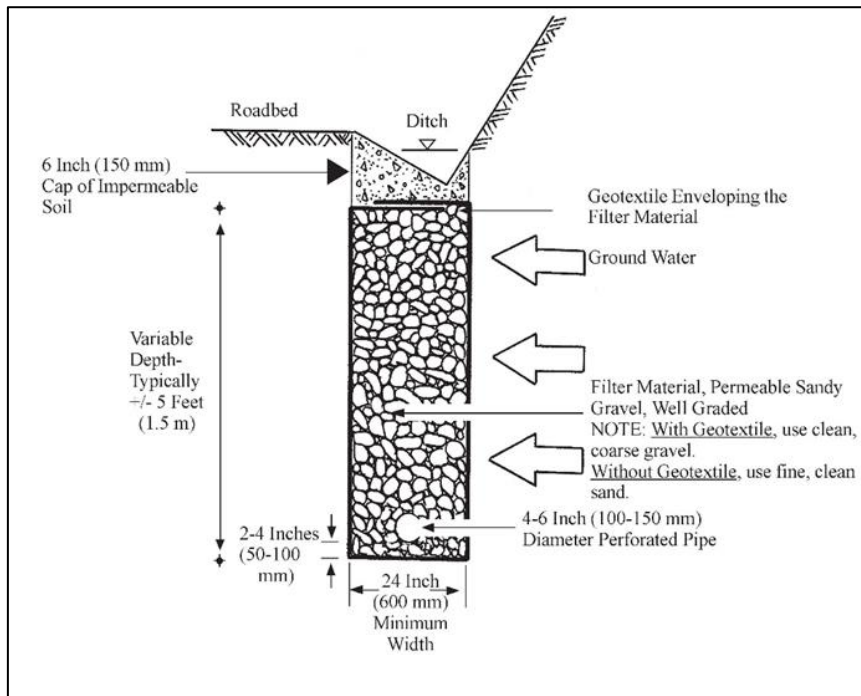
Une inversion de la perméabilité se produit lorsque la perméabilité des couches de la chaussée et de l'infrastructure diminue avec la profondeur. Sous l'effet de l'infiltration de l'eau de pluie, il existe un potentiel d'accumulation d'humidité à l'interface des couches. La création d'une telle nappe phréatique perchée entraîne souvent un mouillage latéral rapide sous le joint. Cela peut conduire à une saturation de la base ou de la sous-fondation dans la voie de roulement extérieure et entraîner une défaillance catastrophique de la couche de base lors de la circulation.

Une inversion de la perméabilité se produit souvent à l'interface entre la sous-fondation et le sol, car de nombreuses sous-fondations sont constituées de matériaux à grains fins cohésifs et relativement imperméables. Dans ces circonstances, une approche de conception plus conservatrice est nécessaire pour répondre spécifiquement à ces conditions, par exemple, en concevant pour des conditions de sous-sol plus humides ou en plaçant une fine couche drainante/perméable au-dessus du sous-sol.

Il est possible d'éviter une inversion de la perméabilité en veillant à ce que la perméabilité des couches de la chaussée et du sol de fondation soit au moins égale ou augmente avec la profondeur. Par exemple, la perméabilité de la base doit être inférieure ou égale à la perméabilité de la sous-fondation dans un système à trois couches. Toutefois, pour les LVR, il existe rarement un large choix de matériaux et si l'inversion de la perméabilité est inévitable, alors l'accotement de la route doit être revêtu sur une largeur appropriée pour garantir que le front de mouillage latéral ne s'étende pas sous la voie de roulement extérieure.

2.4.3 Drainage de l'eau de la chaussée par un système de drainage souterrain

Les systèmes de drainage souterrain tels que les drains français (Figure 2-4), les drains de fond, les drains de bordure, les puits, les drains d'interception, les couches filtrantes ou les couvertures de drainage, doivent être placés dans ou sous la chaussée pour évacuer l'eau là où le niveau de la nappe phréatique est élevé. Voir la Figure 2-5 et la Figure 2-6.



Source : Keller and Sherar, 2003

Figure 2-4: Illustration d'un drain français

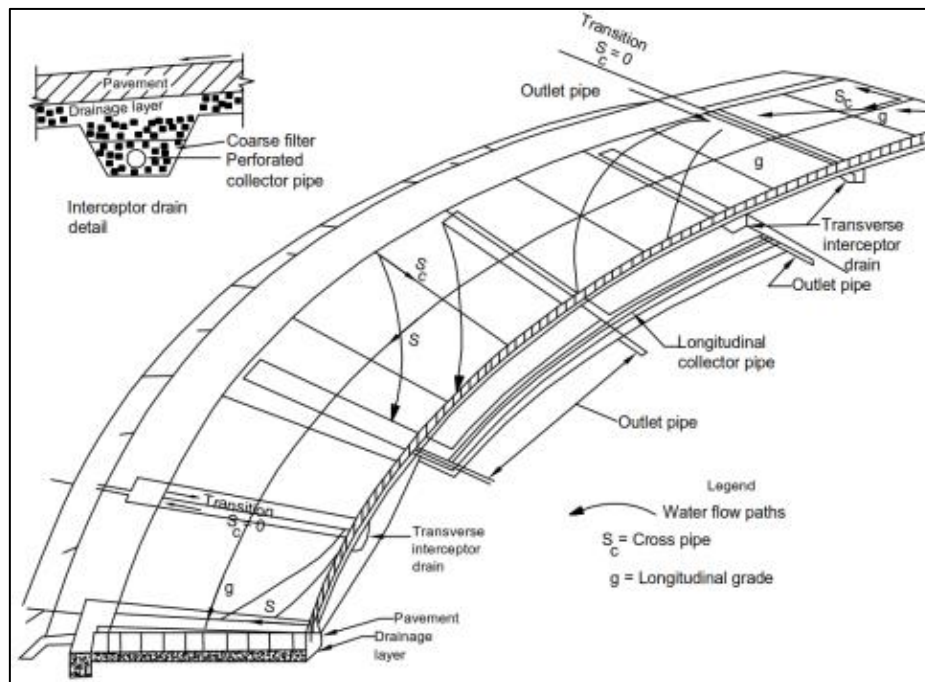


Figure 2-5: Système de drainage du sous-sol (uniquement pour de courts tronçons de route)

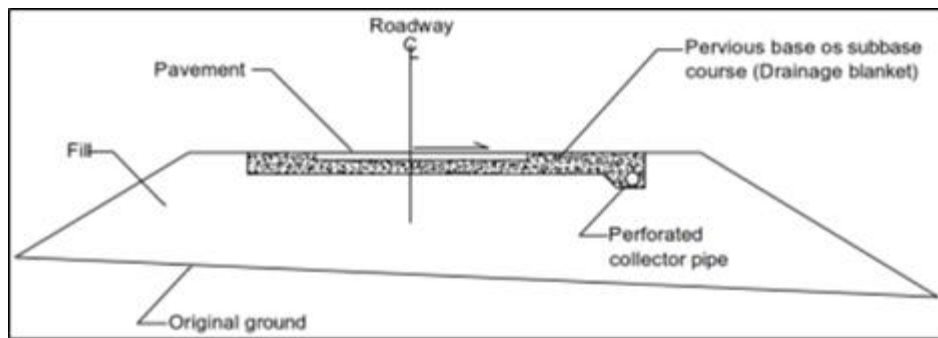


Figure 2-6: Illustration d'une couverture de drainage (uniquement pour de courts tronçons de route)

2.5 Changement climatique et conception des chaussées

Les ingénieurs routiers sont habitués à concevoir des infrastructures pour un type de climat spécifique, mais le climat pour lequel ils conçoivent n'est plus fixe. Le climat change, ce qui signifie qu'il ne suffit plus de baser les conceptions sur des modèles et des moyennes historiques. Les informations sur le climat futur doivent être prises en compte. Le type et l'ampleur exacts des changements futurs varieront en fonction de la région géographique et du volume des futures émissions mondiales de gaz à effet de serre. Toutefois, les types de changements attendus, et qui commencent déjà à se manifester, sont les suivants :

- Les précipitations sont plus susceptibles de tomber sous forme de pluies plus intenses
- Changements dans le calendrier des saisons humides/sèches
- Moins de précipitations dans certaines régions et plus dans d'autres
- élévation du niveau de la mer
- Des périodes de sécheresse plus longues et des cycles de sécheresse et d'inondations
- Des températures moyennes annuelles plus élevées et des températures maximales plus élevées
- Des vagues de chaleur plus fréquentes et plus intenses

Ces changements auront un impact sur l'infrastructure routière de plusieurs façons, notamment :

- Dommages causés par les inondations / emportement sur les chaussées et les structures routières (par exemple, les ponts et les ponceaux) ;
- Affouillement et emportement des ponts, des ponceaux et des chaussées ;
- Inondation des routes côtières ;
- Glissements de terrain provoqués par de fortes pluies ;
- Dommages causés par la chaleur aux routes en asphalte et en béton ;
- Érosion des routes en terre et des drains de bord de route ;
- Modification de l'humidité du sol déstabilisant les travaux de terrassement ;
- Dommages causés aux structures par les tempêtes et le vent, et projection de débris/arbres sur la route
- Difficultés à planifier les contrats et les travaux de maintenance
- Plus de poussière et besoin de stabilisation des sols ou de palliatifs contre la poussière.

Outre les effets plus catastrophiques des phénomènes météorologiques extrêmes, il est probable que les changements progressifs entraîneront une augmentation de la cote de détérioration des routes et des structures. Par exemple, une augmentation des cotes d'oxydation du bitume dans les revêtements d'asphalte en raison de températures moyennes plus élevées ou une plus grande érosion des routes non revêtues due à des périodes de sécheresse/humidité plus extrêmes.

L'adaptation de la conception des chaussées aux changements climatiques prévus et l'examen de la manière dont la conception peut être utilisée pour améliorer la résilience future contribueront à réduire les effets du changement climatique sur le réseau routier, en améliorant la sécurité, en maintenant l'accès et en réduisant les coûts de réparation et d'entretien futurs. La conception des infrastructures clés ou essentielles doit tenir compte de risques plus faibles et de conceptions plus conservatrices.

2.6 Adopter une approche fondée sur le risque

Le risque est la probabilité ou la vraisemblance qu'un danger se produise, multipliée par l'ampleur de l'impact s'il se produit. Pour faire face aux effets du changement climatique sur les routes de manière appropriée et rentable, il est essentiel d'adopter une approche fondée sur le risque. Une meilleure compréhension des dangers pertinents, du risque qui leur est associé et de la manière dont ils évoluent dans le temps permet aux autorités routières de prendre des décisions en connaissance de cause et de hiérarchiser les ressources. Les éléments qui composent le risque et les termes associés tels que la vulnérabilité, la résilience, la susceptibilité et la criticité sont souvent définis différemment par différentes personnes, mais les principaux points à prendre en considération sont les mêmes. Pour les besoins de ce RRN, le risque a été divisé en (1) exposition, (2) danger et (3) vulnérabilité car cela reflète le manuel ReCAP sur l'adaptation au changement climatique (Head et al, 2019).

2.6.1 Exposition

Un facteur déterminant du risque est la quantité et le type de biens tels que les routes revêtues, les routes non revêtues, le drainage, les structures, les terrassements, etc. présents dans un endroit où ils pourraient être affectés par un danger. Des informations telles que la localisation des différents types d'actifs (par exemple, provenant des systèmes de gestion des actifs routiers) et d'autres informations spatiales telles que les cartes topographiques, hydrologiques et géologiques sont utiles pour déterminer cet aspect du risque. Le SIG peut être un outil précieux pour comprendre l'exposition ou l'étendue des biens menacés par différents dangers.

2.6.2 Danger

Un danger est un événement ayant un impact potentiellement négatif. Dans ce contexte, il s'agit des risques liés au climat, qu'ils soient directs, comme les températures élevées, ou indirects, comme les inondations fluviales ou les glissements de terrain, qui sont déclenchés par les conditions météorologiques. La fréquence d'occurrence et l'ampleur de l'événement climatique dépendront du lieu mais changeront également au fil du temps en raison du changement climatique. La durée de vie nominale de l'actif évalué déterminera la période d'intérêt.

Les informations sur les risques actuels peuvent être obtenues à partir de la localisation et de la fréquence des événements historiques, des tendances des données météorologiques récentes, des données hydrologiques, des cartes géologiques et des connaissances locales. Les informations sur les risques météorologiques futurs peuvent être obtenues à partir de projections climatiques. Les climatologues modélisent le climat mondial et, grâce à une technique appelée "downscaling", fournissent des informations sur le type de climat auquel une région peut s'attendre à l'avenir. Les projections climatiques varient en termes de résolution spatiale et temporelle, mais des données à résolution encore plus faible donnent un aperçu des tendances futures et de l'ampleur des changements auxquels on peut s'attendre. Les ingénieurs routiers doivent s'adresser à leurs instituts météorologiques nationaux pour obtenir les informations disponibles pour leur pays. Même si les informations produites au niveau national sont limitées, cela devrait permettre de conseiller et d'orienter les ingénieurs vers une source internationale appropriée d'informations régionales comme celles produites par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC, 2014), la Banque mondiale et le PNUD. Les climatologues travaillent en permanence à l'amélioration des informations sur le climat et il convient donc d'utiliser les informations les plus récentes disponibles.

2.6.3 Vulnérabilité

La vulnérabilité est la propension des actifs exposés à être affectés négativement. Elle dépend de la susceptibilité ou de la sensibilité de l'infrastructure et du degré d'impact sur la collectivité. Les

caractéristiques et l'état d'une route influent sur sa sensibilité aux différents types d'impacts du changement climatique. En général, une route revêtue est moins sensible qu'une route en terre, et une route en bon état est moins sensible qu'une route en mauvais état. Des connaissances en ingénierie sont nécessaires pour évaluer la sensibilité d'un actif spécifique à un type spécifique de mécanisme de défaillance. Le manuel ReCAP sur l'adaptation au changement climatique fournit des informations sur la manière de réaliser une évaluation visuelle (Paige-Green et al, 2019b).

Toutefois, la contre-mesure la plus importante et la plus rentable pour relever les défis d'un climat en évolution et pour réduire la vulnérabilité, consiste à fournir le financement nécessaire et à effectuer un entretien régulier et périodique conformément aux meilleures pratiques internationales. Cela permettra de garantir que de grandes parties du réseau d'infrastructures seront fonctionnelles et fourniront le service prévu la plupart du temps. Les équipes de maintenance de l'Agence, les entrepreneurs locaux et les organisations de maintenance des communautés locales peuvent tous contribuer à assurer la maintenance nécessaire en temps voulu.

L'ampleur des conséquences si la route est fermée ou si des restrictions sont mises en place à la suite d'un événement climatique est liée aux caractéristiques de l'actif telles que le flux de trafic, la criticité ou l'importance de l'itinéraire et la disponibilité d'itinéraires alternatifs. Par exemple, si une route donne accès à un hôpital ou à une grande ville, est la seule voie d'accès à un village ou fait partie d'un corridor commercial international, le niveau de risque sera plus élevé.

Un autre aspect à considérer est la capacité de l'autorité routière et de la communauté à faire face aux événements s'ils se produisent. Si l'autorité routière n'a pas les ressources (équipement, personnel formé, budget) pour réparer et se remettre des événements et si la communauté est très vulnérable, par exemple avec un degré élevé de pauvreté et dépend fortement de la route pour sa subsistance, cet élément de risque sera plus élevé. Lorsque l'on considère les routes rurales à faible trafic, il est particulièrement important de prendre en compte les impacts sociaux et économiques plutôt que d'utiliser uniquement le flux de trafic pour évaluer l'impact.

2.7 Méthodes d'évaluation des risques

Le risque doit être évalué de manière cohérente et structurée afin d'établir des comparaisons solides entre les lieux et dans le temps. Les méthodes d'évaluation des risques peuvent être qualitatives, par exemple en s'appuyant sur l'avis d'experts, quantitatives, par exemple par modélisation mathématique, ou semi-quantitatives. L'approche la plus couramment utilisée pour examiner le risque de changement climatique sur les routes est une méthode d'indicateur semi-quantitative. Les indicateurs sont définis pour les facteurs affectant les différents éléments du risque (exposition, danger, vulnérabilité), et ceux-ci sont notés en fonction de différents seuils. Les éléments à risque sont ensuite combinés pour donner un score globale. L'évaluation des risques doit être étayée par des données, afin que les résultats soient aussi solides que possible. Les données requises comprennent des informations sur :

- 1) la localisation des actifs,
- 2) les caractéristiques et l'état des biens,
- 3) l'hydrologie,
- 4) la géologie
- 5) la typographie,
- 6) la fluidité du trafic,
- 7) l'utilisation des terres,
- 8) les communautés locales
- 9) le climat.

En cas de lacunes dans les données, le jugement des experts concernés peut être utilisé pour noter les indicateurs. D'autres changements futurs, tels que l'augmentation du trafic ou de nouveaux développements, doivent également être pris en compte.

Une évaluation des risques climatiques peut être effectuée à différents niveaux :

- - Organisationnel - pour identifier le risque pour les différentes activités qu'une autorité routière exerce.
- - Réseau - pour identifier les sections du réseau/les actifs présentant le risque le plus élevé afin de donner la priorité aux mesures d'adaptation.
- - Actifs ou projets individuels - pour aider à identifier les modifications à apporter aux actifs ou aux conceptions afin de minimiser le risque.

Une évaluation des risques donne une appréciation cohérente et objective permettant de faire des comparaisons et de fournir les éléments nécessaires à l'adoption de mesures d'adaptation. Elle peut être utilisée pour planifier et hiérarchiser les mises à niveau et la maintenance des actifs les plus risqués, modifier la politique ou les normes en cas de vulnérabilité à l'échelle du réseau et aider à élaborer l'analyse de rentabilité pour un financement supplémentaire. Les risques à évaluer doivent inclure à la fois les risques historiques et les risques potentiels futurs, par exemple si une route n'est pas actuellement affectée par des inondations côtières, mais que l'élévation future du niveau de la mer signifie qu'elle pourrait l'être à l'avenir, ce risque doit être inclus dans l'évaluation. Dans l'idéal, l'évaluation des risques liés aux infrastructures est effectuée dans un cadre interdisciplinaire comprenant un personnel bien informé en matière de conception et d'entretien des routes, des spécialistes des ressources, des organisations concernées et des citoyens intéressés. Les résultats de l'évaluation des risques doivent être replacés dans le contexte de l'appétit pour le risque de l'autorité routière, qui sera différent pour chaque autorité routière, en fonction, par exemple, de ses propres politiques organisationnelles, du budget disponible et des attentes des usagers du réseau routier.

De plus amples informations sur l'évaluation des risques sont disponibles dans les Notes routières sur les menaces et la vulnérabilité du manuel d'adaptation au changement climatique de l'AfCAP (Le Roux et. al. 2019). Cela couvre à la fois les routes nouvelles et existantes.

2.8 Principes de l'intégration du changement climatique dans la conception des routes

Lorsque l'on considère la résilience climatique dans la conception des chaussées, l'objectif est de déterminer comment le risque futur pour la chaussée lié aux effets du changement climatique peut être minimisé autant que possible. Il faut pour cela prendre en compte tous les éléments de risque : exposition, danger et vulnérabilité. Toutefois, le principal domaine dans lequel la conception des chaussées peut influencer le niveau de risque est la vulnérabilité, en particulier la sensibilité de l'infrastructure aux dangers identifiés comme étant pertinents pour son emplacement et sa durée de vie prévue. La réduction de l'impact est principalement le rôle de la gestion des catastrophes/incidents, bien que les concepteurs doivent envisager comment permettre une meilleure gestion du trafic et un rétablissement rapide en cas de conditions météorologiques extrêmes. En fait, une approche consiste à concevoir des infrastructures pour une réparation rapide plutôt que pour résister à des conditions extrêmes. Cette solution peut s'avérer plus rentable, notamment pour les infrastructures moins critiques. Il faut également comprendre que la maintenance a un rôle important à jouer dans la réduction de la vulnérabilité, mais cette note sur les routes de rurales est axée sur la conception plutôt que sur la gestion des actifs, et n'est donc pas abordée ici.

Des mesures d'adaptation spécifiques (mesures techniques et non techniques) visant à réduire les risques peuvent être trouvées dans la section des notes techniques ReCAP du Manuel d'adaptation au climat ou dans d'autres publications telles que la base de données ROADAPT (CEDR, 2015). La conception des installations de drainage est un élément très important pour améliorer la résilience des infrastructures routières au changement climatique.

2.8.1 Évaluation précoce du changement climatique

Plus le changement climatique est pris en compte tôt dans le processus de conception, plus il est possible d'influencer la résilience de la conception. Il est recommandé de procéder à une évaluation des risques au niveau du projet/système dès le début de la conception. Les résultats de l'évaluation des risques doivent éclairer la conception. Les différents dangers seront plus pertinents en fonction du niveau de risque, et le montant du budget que l'autorité alloue à leur atténuation doit être en rapport avec le niveau de risque. Des preuves doivent être recueillies pour étayer l'évaluation des risques, et des spécialistes tels que des climatologues, des ingénieurs, des géologues, des hydrologues, etc. et les parties prenantes doivent être impliqués dans ce processus. Plus la durée de vie prévue de l'actif est longue, plus la période de projection climatique considérée doit être éloignée dans le futur. Des évaluations des risques peuvent être réalisées pour la mise à niveau des routes existantes ou les plans de routes futures. Il est normalement plus simple et moins coûteux sur le plan technique d'inclure l'adaptation pendant la construction plutôt que la mise à niveau dans le futur.

2.8.2 Conception de la flexibilité future

Une approche qui peut être utilisée consiste à concevoir en gardant à l'esprit la flexibilité afin de faciliter la mise à niveau de l'infrastructure à l'avenir. Des options potentielles pour accroître la résilience sont identifiées, mais ne sont pas mises en œuvre. Au lieu de cela, la conception est ajustée de manière à laisser ces options ouvertes pour l'avenir, par exemple en laissant de l'espace pour un drainage supplémentaire à ajouter si nécessaire à une date ultérieure ou en achetant un droit de passage supplémentaire si un alignement doit être modifié à l'avenir. Cette approche est particulièrement utile lorsque les conditions futures sont très incertaines et que les options d'adaptation sont coûteuses. Dans le même ordre d'idées, une approche appelée "voies d'adaptation flexibles" (climateXchange, 2012) consiste à établir un calendrier pour les différentes options et à fixer des points de décision qui permettraient de mettre en œuvre l'option à temps pour maintenir le niveau de risque convenu. Les conditions sont contrôlées et lorsque certains seuils sont dépassés, ou lorsque des informations supplémentaires sont disponibles, les options sont réexaminées. Par exemple, les options pour protéger une route côtière pourraient inclure l'élévation du niveau de la route ou la construction de défenses contre la mer, deux options coûteuses avec de longs délais d'exécution. Si les prévisions d'élévation du niveau de la mer sont incertaines, la décision d'adaptation pourrait être reportée jusqu'à ce qu'un certain niveau ou une certaine cote d'élévation soit observé. Cela permet à l'autorité d'éviter de s'engager dans une adaptation inutile mais de mettre en œuvre les changements nécessaires avant que les inondations ou l'érosion côtière n'empêchent l'accès.

2.8.3 Améliorer les conceptions de la réhabilitation

En cas de défaillance d'une infrastructure, sa conception doit être revue afin de définir des mesures visant à accroître la résilience plutôt qu'à remplacer des éléments similaires. Par exemple, la taille et la capacité d'un ponceau défaillant devraient être augmentées ou des grilles de protection devraient être ajoutées pour empêcher son colmatage. Cela est particulièrement important lorsque les projections climatiques indiquent que le danger qui a causé la défaillance augmentera en fréquence et en intensité à l'avenir.

2.8.4 Inclure les mesures d'adaptation dans les autres travaux

L'intégration des mesures d'adaptation dans les mises à niveau prévues et la maintenance de routine plutôt que de les mettre en œuvre en tant qu'activités individuelles peut réduire les coûts. L'adaptation au changement climatique doit être intégrée dans les opérations normales chaque fois que cela est possible.

2.8.5 Choisir des matériaux plus robustes

Dans la mesure du possible, utilisez des matériaux plus robustes et mieux à même de résister aux conditions plus humides, ou plus sèches, ou plus chaudes et changeantes prévues dans le futur. Par exemple, l'utilisation de roches concassées de qualité pour la base des routes dans les sections vulnérables.

2.8.6 Révision des Normes

Le changement climatique est un sujet en évolution et les informations disponibles vont donc changer assez rapidement. Les normes de conception doivent donc être régulièrement révisées pour refléter la compréhension actuelle du changement climatique et de ses impacts potentiels. Les modifications potentielles comprennent :

- l'ajout de capacité supplémentaire (par exemple 15 à 30 %) lors de la conception du drainage requis, pour tenir compte de l'augmentation du volume des précipitations,
- augmenter la pente transversale de la chaussée afin que l'eau s'écoule efficacement et ne s'accumule pas, ce qui entraînerait l'adoucissement des routes non revêtues ou l'hydroplanage des routes revêtues, ou permettre le débordement de sections spécifiques en mettant en place les mesures nécessaires de protection contre l'érosion au lieu de construire un talus qui peut être rompu et créer une érosion plus grave, mais qui, surtout, peut prendre du temps à être réparé, prolongeant ainsi l'inaccessibilité.
- Modifier la conception des mélanges d'asphalte pour tenir compte des températures plus élevées et empêcher l'orniérage et le saignement.

2.8.7 Incorporer dans les marchés publics

La conception peut être développée par des entrepreneurs, auquel cas les exigences relatives à la conception résistante au climat doivent être incluses dans la passation de marché, de sorte qu'elles soient transmises en aval de la chaîne d'approvisionnement. Les actions pourraient inclure l'évaluation des connaissances et des compétences d'un soumissionnaire en matière d'adaptation au changement climatique au stade de l'évaluation des offres, l'inclusion d'exigences relatives à une évaluation des risques liés au changement climatique dans le cahier des charges et la mise en place de mécanismes de garantie pour s'assurer que le changement climatique est pris en compte dans la conception.

2.8.8 Mesures supplémentaires pour assurer la durabilité des chaussées

Les mesures supplémentaires suivantes sont recommandées pour assurer la durabilité des chaussées en ce qui concerne le drainage et le changement climatique.

- 1) Si un matériau approprié est disponible, les couches de revêtement doivent être réalisées avec un matériau drainant libre. Cela permet de réduire le temps nécessaire pour retrouver sa pleine résistance après une inondation.
- 2) Le blindage améliore les performances des couches de base faibles et empêche les charges de pénétrer dans la couche de base. Le blindage consiste à marteler une couche de granulats très grossiers (40-60 mm) dans une base partiellement compactée à l'aide de lourds rouleaux vibrants en acier fonctionnant à haute amplitude. L'agrégat est martelé jusqu'à refus.
- 3) La submersion de la route peut souvent entraîner une délamination ou une séparation physique (c'est-à-dire un décollement) des revêtements à l'interface des premières et deuxièmes couches des enduits et/ou à l'interface entre le revêtement et la base. Les revêtements amalgamés sont des joints dont la surface de la base est légèrement poreuse ou pas trop serrée de sorte qu'une partie de la couche de revêtement pénètre dans la base pour créer une amalgamation. Il n'y a donc pas de plan clair de l'interface entre la base et le revêtement, et le risque de délamination est donc moindre.

2.8.9 Résistance de la chaussée contre la perte de résistance en cas d'immersion

Les matériaux de chaussée non liés sont plus fragiles lorsqu'ils sont humides et peuvent donc courir un risque de défaillance s'ils sont submergés. Si possible, lorsque ce risque est élevé, il convient de choisir des matériaux peu sensibles à l'humidité. Ceci est mesuré par le changement de résistance (CBR ou DN) de l'état OMC à l'état imbibé.

- 1) Le produit de plasticité des matériaux pour les fondations et les bases ne doit pas être supérieur à 90 pour permettre un drainage interne rapide.

- 2) La conception structurelle de la chaussée doit être basée sur la résistance de la fondation prévue à l'état trempé.
- 3) Les sous-fondations et les bases doivent également être conçues pour être suffisamment résistantes à l'état trempé.
- 4) La préférence doit être donnée aux graviers grossiers - la résistance de l'emboîtement des grosses particules peut être maintenue lorsque la structure de la route est immergée. Le module de granulométrie (GM) devrait être ≥ 2.5 .

2.8.10 *Résistance des chaussées aux dommages et aux éboulements*

Les mesures suivantes sont recommandées pour les tronçons présentant un risque des éboulements :

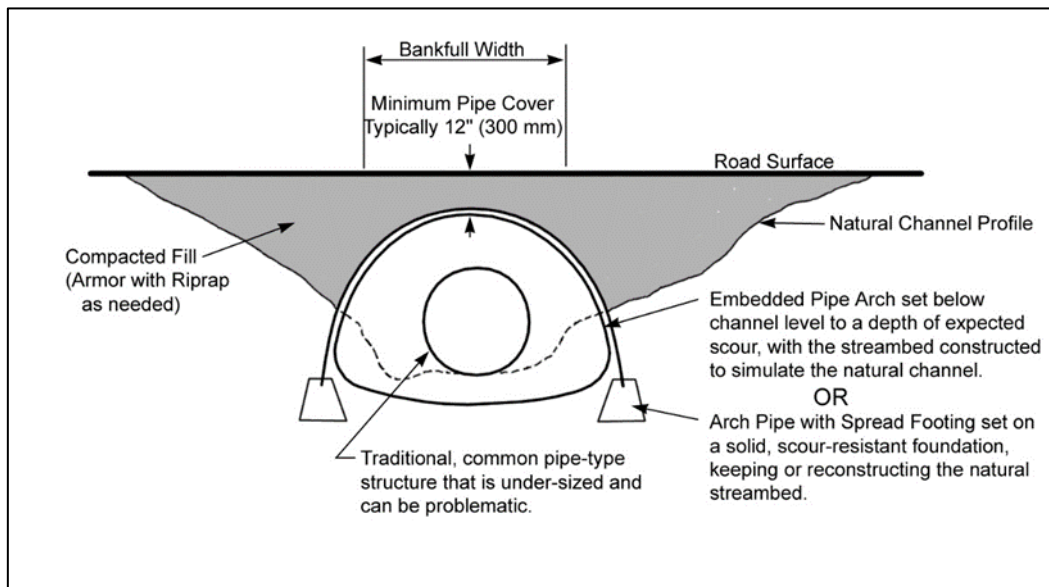
- 1) L'itinéraire doit être celui qui est le moins susceptible d'être affecté par le climat. Ainsi, les zones à haut risque d'inondation doivent être évitées autant que possible. Évitez les zones basses situées à proximité des ruisseaux et des rivières. Maintenez la route bien au-dessus des éventuelles hautes eaux.
- 2) Dans les zones à haut risque d'inondation en nappe, il convient d'éviter les hauts talus. Dans ce cas, la hauteur de la couronne ne doit pas dépasser 300 mm MAIS le talus doit être encapsulé dans un revêtement tel que le mortier. Cela permettra à l'eau de passer sur le trottoir sans causer trop de dommages.
- 3) Remblais élevés. Lorsque l'inondation est probable sans possibilité de courants d'eau rapides, le remblai doit être relevé à 0,5 m au-dessus du niveau de la crue. Lorsqu'il est impossible de déterminer les niveaux de crue élevés, il convient d'envisager la possibilité que la chaussée soit submergée et d'appliquer des critères de conception des matériaux permettant de conserver une résistance minimale.

2.8.11 *Résistance des structures de drainage aux dommages et aux lavages*

Pour protéger les ouvrages de drainage, les mesures suivantes sont recommandées :

- 1) La largeur des radiers ne doit pas être inférieure à 1000mm. Idéalement, la largeur devrait être de 1500mm.
- 2) L'espacement des drains d'aiguillage en onglet pour détourner l'eau de la route ne doit pas être supérieur à 50 m.
- 3) Il convient d'utiliser des périodes de retour de tempête ou d'inondation appropriées pour les zones à haut risque d'inondation. Pour les zones sujettes aux tempêtes et cyclones tropicaux, les petites structures doivent être conçues pour une période de retour des tempêtes/inondations de 25 ans avec possibilité de débordement. Les structures de taille moyenne (par exemple les ponceaux en caisson et les petits ponts) doivent être conçues pour une période de retour des tempêtes/inondations de 50 ans et vérifiées sur une période de retour de 100 ans avec possibilité de débordement. Les grandes structures, y compris les grands ponts, doivent être conçues pour une période de retour de 200 ans et contrôlées pour une crue de retour de 500 ans avec une possibilité de débordement.
- 4) Le diamètre du ponceau doit correspondre approximativement à la largeur naturelle du canal afin de maximiser la capacité et de minimiser le risque de colmatage et d'aggradation devant le ponceau. Le concept de conception de la "simulation de cours d'eau" est utile pour réduire le risque de défaillance des structures importantes (Figure 2-7).
- 5) Il est préférable d'utiliser des ponceaux relativement grands plutôt que plusieurs petits ponceaux ou ouvertures pour minimiser le risque de bouchage. Les petits tuyaux et ouvertures se bouchent facilement.
- 6) Les structures monolithiques/composites sont constituées d'une seule unité plutôt que d'unités structurelles discrètes, Figure 2-8. Les structures monolithiques comprennent les ponceaux en caisson, les chaussées, etc. Les structures non monolithiques comprennent les ponts et les ponceaux

à éléments modulaires. Un pont est normalement constitué d'éléments structurels modulaires, c'est-à-dire de culées, de piliers et de tabliers, et ceux-ci ne sont pas reliés ; ils fournissent un support modulaire. Mais il est relativement facile d'emporter ou de déplacer chaque élément, par exemple le tablier du pont peut être soulevé ou une pile peut être emportée par l'eau. Ces défaillances ne nécessitent pas beaucoup de force pour se produire, mais les structures monolithiques sont beaucoup plus solides et plus sûres, et il faut beaucoup plus de force pour les endommager. Les ponts doivent être rendus résistants au climat par l'utilisation de boulons d'ancrage reliant la superstructure à la sous-structure, qui rendent ensuite le pont monolithique et résistant à la séparation.



Source: Keller and Ketcheson, 2014

Figure 2-7: Illustration de la simulation de flux



Figure 2-8: Structure monolithique - ponceau en caisson

L'hydrodynamique est la science qui permet de concevoir le profil en travers de la chaussée pour permettre à l'eau de passer sur la chaussée en n'exerçant qu'une force minimale. Cette force est contrôlée par la forme du profil en travers et les ouvrages de protection. Toutes les structures doivent être conçues pour être efficaces sur le plan hydrodynamique. La principale considération d'ingénierie pour les structures est qu'elles seront submergées et peuvent subir des forces latérales élevées dues à de forts courants d'eau. Ces structures doivent offrir une résistance minimale au passage de l'eau. Les composants structurels doivent être ovales, le côté le plus étroit étant à contre-courant. Cela permet de minimiser les forces latérales.

2.9 Choisir la mesure d'adaptation la plus appropriée

L'adaptation technique peut comprendre des mesures telles que :

- 1) Scellage des chaussées : L'étanchéité des chaussées est particulièrement recommandée pour les pentes raides (> 8 à 10 % selon d'autres facteurs). Chapitre 7 Sélection des revêtements.
- 2) Ponceaux supplémentaires ou élargis : Ponceaux transversaux supplémentaires, élargis ou améliorés, considérés comme essentiels pour améliorer le drainage global de la route.
- 3) Drainage latéral : Drainage latéral supplémentaire et branchements associés. Contrôles d'affouillement si nécessaire. Des drains doublés sont nécessaires pour les pentes > 6 %.
- 4) Remblais surélevés : Rehaussement des talus en terre lorsque l'alignement est bas et est affecté par une inondation et/ou l'affaiblissement de la chaussée par saturation. Chapitre 11 Considérations pratiques
- 5) Protection des culées de pont ou de ponceau : Protection en gabions, béton, maçonnerie ou bio-ingénierie lorsque l'érosion des culées est identifiée comme un risque important.
- 6) Protection contre l'érosion des rivières et des cours d'eau : Protection en gabions, béton, maçonnerie ou bio-ingénierie lorsque l'érosion du tracé par les rivières ou les cours d'eau est identifiée comme un risque important. Chapitre 4 Drainage.
- 7) Protection des talus par déblai et remblai : Protection en gabions, béton, maçonnerie ou bio-ingénierie lorsque l'érosion ou la détérioration des pentes de terrassement existantes est identifiée comme un risque significatif. Chapitre 9 Facteurs et considérations accessoires.
- 8) Réalignement : Réalignement dans les cas où un risque d'impact climatique identifié et le risque d'ingénierie qui en découle peuvent être surmontés de la manière la plus rentable par l'évitement.
- 9) Traversée d'une rivière ou d'un cours d'eau : Les gués ou les ponts à bas niveau existants pourraient être remplacés par des structures résistantes au climat telles que des gués ventilés ou des ponceaux multiples submersibles. Chapitre 4 Drainage des chaussées.

Il est tout aussi important que, lorsque des solutions innovantes ou inhabituelles sont mises en œuvre, leur rentabilité par rapport à des solutions plus conventionnelles soit contrôlée en vue d'une mise en œuvre future.

Une fois que les options de conception potentielles ont été identifiées, il convient de choisir l'option la plus appropriée. De nombreux facteurs influenceront cette décision, mais pour toute autorité routière, le coût en sera une partie importante et la méthode d'évaluation la plus couramment utilisée est l'analyse coûts-avantages (ACA) Chapitre 8 Évaluation économique des résultats de la conception des chaussées. Lors de l'évaluation des options d'adaptation, il est important de prendre en compte les coûts à long terme ou du cycle de vie, et pas seulement le coût d'investissement initial. L'adaptation est conçue pour réduire les dommages futurs afin de minimiser les coûts de réparation et de retardement résultant d'événements climatiques extrêmes, et de réduire les coûts d'entretien dus à l'augmentation des cotes de détérioration. Par conséquent, les coûts et les avantages à long terme doivent être correctement pris en compte. Cela signifie qu'il convient d'utiliser une période d'évaluation et une cote d'actualisation appropriées. En outre, comme mentionné au Chapitre 1, lors de l'évaluation des routes rurales à faible trafic, il est important de prendre en compte les impacts sociaux et économiques plus larges que le manque d'accès entraîne, et pas seulement les coûts directs de réparation et de retard. L'analyse coûts/bénéfices traditionnelle ne tient souvent pas compte de ces éléments. Il peut être difficile de calculer les impacts économiques plus larges des fermetures de routes sur les communautés et les entreprises locales et certains impacts, par exemple environnementaux, sont difficiles à monétariser. Il faut s'efforcer de quantifier les coûts des impacts environnementaux. D'autres méthodes d'évaluation qualitative, telles que l'analyse multicritères (AMC), peuvent devoir être utilisées en plus de l'ACB.

2.10 Améliorer la résilience des chaussées et des structures de drainage existantes

2.10.1 Évaluation des risques d'inondation des infrastructures existantes

Il est important de procéder à une évaluation des risques des infrastructures existantes afin de déterminer la vulnérabilité au changement climatique. Des cartes fournissant des informations sur les zones à haut risque

devraient également être utilisées pour cet exercice. Les zones prioritaires devraient être déterminées pour une évaluation détaillée. La vulnérabilité des infrastructures dépend des facteurs suivants.

- 1) L'état de l'infrastructure : Les infrastructures qui sont dans un état de délabrement, par exemple un système de drainage dysfonctionnel, des éléments structurels fissurés ou instables, etc. Ces structures, si elles ne sont pas réparées, risquent fort de tomber en panne lors d'une inondation. Des inspections périodiques des ponts ou des systèmes de cotation de l'état des ponts sont utiles pour identifier les structures à haut risque potentiel.
- 2) Environnement routier : Les rivières peuvent s'être envasées, ce qui réduit leur capacité et augmente la possibilité qu'elles éclatent et provoquent une grave inondation des plaines d'inondation ou des terrains environnants.
- 3) Utilisation des terres : Les changements dans l'utilisation des terres peuvent avoir entraîné la déforestation ou l'urbanisation, ce qui a entraîné une augmentation du ruissellement ou de la quantité de débris dans les eaux de crue, ce qui peut provoquer des inondations locales ou l'obstruction des structures de drainage.

2.10.2 Surveillance des infrastructures existantes et des conditions climatiques

L'état des infrastructures existantes et leur maintenance, les données sur l'intensité des tempêtes et la gravité des inondations doivent être collectées régulièrement. Les informations devraient comprendre :

- a) Le mode de défaillance de l'infrastructure. Cela permettra de déterminer les interventions les plus appropriées nécessaires pour améliorer la résilience des autres infrastructures routières.
- b) Prévision du changement climatique et de ses impacts à l'aide de modèles et d'observations.

2.11 Résumé

La conception des routes doit être adaptée au climat futur.

Le type et l'ampleur du changement devraient inclure des températures plus élevées (moyennes et extrêmes), des précipitations plus intenses et des régimes de précipitation différents.

Il est recommandé d'adopter une approche basée sur le risque, les concepteurs devant tenir compte du climat futur pour l'endroit spécifique pour lequel ils conçoivent le projet, et ce pendant toute la durée de vie du bien.

Une méthodologie structurée doit être appliquée pour évaluer le risque et les informations sur le climat futur et passé, les caractéristiques et l'état des actifs, la géologie, l'hydrologie, le flux de trafic et les aspects socio-économiques utilisés pour étayer l'évaluation. L'évaluation des risques devrait évaluer :

- l'exposition de l'actif aux risques,
- le type de risques et
- la manière dont le changement climatique devrait les affecter,
- la sensibilité de l'infrastructure et
- l'impact en cas de défaillance de l'infrastructure.

Le réseau routier doit être considéré comme un système, plutôt que comme un actif individuel, lorsqu'on examine les conséquences d'une défaillance. Lorsqu'un danger particulier présente un risque élevé, des mesures doivent être prises pour :

- réduire la vulnérabilité de l'infrastructure,
- de mieux gérer les conséquences d'une défaillance s'il se produit, et
- un redressement immédiat.

Plus le changement climatique est pris en compte tôt dans le processus de conception, plus les mesures d'adaptation seront efficaces et moins coûteuses. Lors de la sélection d'une option de conception, les coûts et les avantages à long terme doivent être pris en compte. Si l'on utilise une analyse coûts-avantages (ACA),

le risque lié aux événements futurs et le potentiel de l'action pour atténuer ce risque doivent être intégrés à l'analyse. Le processus d'évaluation doit également prendre en compte les coûts économiques et sociaux plus larges de l'échec, qui seront probablement plus importants que les coûts directs de réparation et de retard. Si ces coûts ne peuvent être monétisés, d'autres techniques d'évaluation qualitative peuvent être utilisées. La conception n'est qu'une partie de l'accroissement de la résilience, l'amélioration de la résilience des routes et l'adaptation au changement climatique doivent être un objectif global et être intégrées dans la politique, la planification, la gestion des actifs, les processus, les achats, le suivi et l'assurance. Certains de ces éléments influenceront la conception. Par exemple, si une évaluation des risques liés au changement climatique est réalisée dans le cadre de l'évaluation des incidences sur l'environnement (c'est-à-dire les procédures de planification), le résultat peut être utilisé pour éclairer la conception, et si le tracé de la route est ajusté pour réduire l'exposition à un danger au stade de la planification, cela aura une incidence sur la conception.

Bibliography

Administração Nacional de Estradas (ANE). (2016). **Manual for the Provision of Low Volume Roads**. Maputo, Mozambique.

Cedergren, H. (1997). **Seepage, Drainage, and Flow Nets**. Third Edition, John Wiley and Sons.

CEDR (2015). **ROADAPT – Database of adaptation techniques**.

https://www.cedr.eu/download/other_public_files/research_programme/call_2012/climate_change/roadapt/Database_of_adaptation_techniques_-_v9.2.xlsm

Chaddock, B. C. J. (1992). **A Review of the Effect of Sub-Base Permeability on Road Performance**. TRL Working Paper WP/PE/111, TRL, Crowthorne, Berkshire, UK.

ClimateXChange, (2012). Flexible adaptation pathways.

https://www.climateexchange.org.uk/media/1595/flexible_adaptation_pathways.pdf

Dawson, A. R. and Hill, A. R. (1998). **Prediction and Implications of Water Regimes in Granular Bases and Sub-Bases**. Proceedings of the International Symposium on Sub-drainage in Roadway Pavements and Subgrades, Granada, Spain.

Ethiopian Road Authority. (2017). **Design of Low Volume Roads**. Addis Ababa, Ethiopia.

Erickson, A. and Kidanu, A. (2010). **Guidelines for Prevention and Control of Soil Erosion in Road Works**. ILO Office, Geneva.

Federal Highway Administration. (2005). **Hydraulic Design of Highway Culverts**. Hydraulic Design Series Number 5. FHWA, USA.

Fiddes, D. (1976). **The TRRL East African Flood Model. TRRL Laboratory Report 706**. Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne, Berkshire, UK.

Gerke, R. J. (1987). **Subsurface Drainage of Road Structures. Special Report Number 35**. Australian Road Research Board, Australia.

Gourley, C. S. & Greening P. A. K. (1999). **Performances of low-volume sealed roads; results and recommendations from studies in southern Africa**. Published Report PR/OSC/167/99. Transport Research Laboratory, Crowthorne, Berkshire, UK.

Griffiths, P. J., Hird, A. B. and Tomlinson, P. (2000). **Rural Road Drainage for Environmental Protection**. Published Report PR/INT/197/00, Transport Research Laboratory, Crowthorne, Berkshire, UK.

Head, M., Verhaeghe, B., Paige-Green, P., Le Roux, A., Makhanya, S., Arnold, K., CSIR, Paige-Green Consulting (Pty) Ltd, St Helens Consulting Ltd (2019). **Climate Adaptation: Risk Management and Resilience Optimisation for Vulnerable Road Access in Africa, Climate Adaptation Handbook**, GEN2014C. London: ReCAP for DFID. <http://research4cap.org/SitePages/Climate%20Adaptation.aspx>

Howell, J. H., Clarke, J. E., Lawrance, C. J. and Sunwar, I. (1991). **Vegetation structures for stabilising highway slopes. A manual for Nepal**. Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne, Berkshire, UK.

Keller, G. and Ketcherson, G. (2014). **Storm damage risk reduction guide for low-volume roads**. Department of Agriculture, Forest Service, San Dimas Technology and Development Centre, USA.

Keller, G. and Sherar, J. (2003). **Low Volume Road Engineering: Best Management Practice Field Guide**. US Agency for International Development, USA.

Le Roux, A., Makhanya, S., Arnold, K., Roux, M. Council for Scientific and Industrial Research (CSIR), Paige-Green Consulting (Pty) Ltd and St Helens Consulting Ltd. (2019). **Climate Adaptation: Risk Management and Resilience Optimisation for Vulnerable Road Access in Africa, Climate Risk and Vulnerability Assessment Road Notes**, AfCAP Project GEN2014C. London: ReCAP for DFID. <http://research4cap.org/Library/CSIR-PGC-StHelens-ClimateAdaptation-RiskVulnerabilityRoad-Note-AfCAP-GEN2014C-190926-compressed.pdf>

- Ministry of Transport and Public Works, Malawi. (2019). **Low Volume Roads Manual. Volume 1: Pavement Design**. Lilongwe, Malawi.
- Minnesota Local Research Board, US Federal Highway Administration. (2008). **Erosion Control Handbook for Local Roads**. Minnesota Department of Transportation, Minnesota, FHWA, USA.
- National Cooperative Highway Research Programme. (2012). **Cost-Effective and Sustainable Road Slope Stabilization and Erosion Control: A Synthesis of Highway Practice**. NCHRP Synthesis 430, TRB, Washington, DC.
- Paige-Green, P., Verhaeghe, B., Head, M., Council for Scientific and Industrial Research (CSIR), Paige-Green Consulting (Pty) Ltd and St Helens Consulting Ltd (2019). **Climate Adaptation: Risk Management and Resilience Optimisation for Vulnerable Road Access in Africa, Engineering Adaptation Road Notes**, GEN2014C. London: ReCAP for DFID. <http://research4cap.org/Library/CSIR-PGC-StHelens-ClimateAdaptation-EngineeringAdaptationRoad Note-AfCAP-GEN2014C-190926-compressed.pdf>
- Rolt, J., Gourley, C. S., and Hayes, J.P. (2002). **Rational Drainage of Road Pavements**. TRL Report PR/INT/244/2002. Transport Research Laboratory, Crowthorne, Berkshire, UK.
- South Africa National Roads Agency Limited (SANRAL). (2002). **Drainage Manual**. SANRAL, Pretoria, South Africa.
- Stream Simulation Working Group. (2008). **Stream simulation: an ecological approach to providing passage for aquatic organisms at road-stream crossings**. 7700–Transport. Manage. 0877-1801-SDTDC. San Dimas, CA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, San Dimas Technology and Development Center.
- The United Republic of Tanzania, Ministry of Works, Transport and Communication. (2016). **Low Volume Roads Manual, 2016**. Ministry of Works, Transport and Communication, Dar es Salaam, Tanzania.

3 CHOIX DE MATÉRIAUX

3.1 Objectif et portée

Toutes les méthodes de conception des LVRR tentent d'utiliser des matériaux disponibles localement afin que les coûts de transport et de traitement soient faibles. Ainsi, l'utilisation de matériaux qui ne sont pas conformes aux normes pour les routes à fort trafic mais qui sont satisfaisants pour une utilisation sur des routes à faible trafic est encouragée. Au cours des deux dernières décennies, des recherches approfondies ont été menées sur les performances de ces matériaux et nombre d'entre eux se sont avérés adaptés à une utilisation sur des routes à faible trafic. C'est pourquoi on les appelle aujourd'hui "matériaux standard pour les routes à faible circulation". La compréhension des effets des variations des propriétés du matériau aidera à prendre la décision d'utiliser ou non le matériau, en se rappelant que le LVRR proposé est susceptible d'être soumis à des camions excessivement chargés occasionnellement ou de façon saisonnière, par exemple pendant les saisons de récolte agricole.

L'objectif de ce chapitre est de donner des conseils sur le choix de matériaux appropriés et sur la manière de les utiliser. Les recherches qui ont conduit à ces conclusions sont décrites en détail dans les références de ce chapitre. Le chapitre décrit également les spécifications des matériaux de construction routière qui ont été incorporés dans les six principales méthodes de conception des chaussées qui forment le Chapitre 5.

3.2 Approche de l'utilisation des matériaux

Pour les LVR, il n'est généralement pas critique si les spécifications standard appliquées pour les routes à grand volume pour la granulométrie, les limites Atterberg et la dureté des agrégats ne sont pas entièrement respectées. Pour l'utilisation des matériaux standard LVR, les principales préoccupations sont la quantité et la qualité. Y a-t-il suffisamment de matériaux pour le projet et ces matériaux ont-ils une qualité acceptable pour le travail. L'utilisation de ces matériaux implique parfois des coûts de construction initiaux plus faibles, mais une durée de vie plus courte ou des coûts de maintenance plus élevés.

Les matériaux doivent être sélectionnés en tenant compte des considérations suivantes :

- La durabilité, c'est-à-dire que si l'on propose un choix de matériaux, il faut d'abord utiliser le matériau qui répond juste aux spécifications avant d'utiliser un matériau qui répond plus que les spécifications ;
- Connaissances acquises par le concepteur sur les performances de matériaux particuliers dans des domaines spécifiques et expérience locale. Les connaissances locales pourraient signifier qu'il faut passer outre aux spécifications importées ;
- En tenant compte du drainage interne de la chaussée ;
- Si les matériaux disponibles doivent être modifiés, envisager une modification mécanique avec un autre matériau naturel avant toute modification chimique. Il est parfois moins coûteux de modifier chimiquement un matériau à proximité du site prévu que de transporter un matériau de meilleure qualité depuis une plus grande distance. Néanmoins, les options doivent être évaluées à l'aide des mécanismes d'analyse économique présentés au Chapitre 8 ;
- N'oubliez pas qu'une légère modification chimique améliore à la fois les caractéristiques de résistance et de plasticité ;
- Les matériaux de la taille d'un pavé offrent la possibilité d'utiliser des constructions de type Macadam ou Telford. Les matériaux en vrac ne peuvent pas être testés par des méthodes d'essai conventionnelles, par conséquent si l'option est choisie, les compétences des entrepreneurs doivent être prises en compte dans le processus de décision.

Il existe de nombreuses façons d'améliorer les matériaux marginaux pour les rendre appropriés, pour améliorer leurs performances ou pour répondre aux spécifications. C'est un bon endroit pour énumérer ces moyens. Cela comprend le criblage, le mélange, le broyage, le traitement avec des additifs, la modification du ciment ou de la chaux, l'utilisation du gonflage central des pneus sur certaines routes de transport, y compris les géogrilles ou le confinement cellulaire, etc. On trouvera une analyse de nombre de ces méthodes dans "Stabilization and Rehabilitation Measures for Low-Volume Forest Roads" (Keller et al. 2011). Les détails du traitement de chaque catégorie spécifique de matériaux sont inclus dans l'annexe 1. Les exigences,

procédures et spécifications des essais de matériaux pour les différentes méthodes de conception sont décrites en détail ci-dessous.

3.3 Méthodes d'essai

Différents pays utilisent des méthodes d'essai différentes, par exemple, l'American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), l'American Society for Testing and Materials (ASTM), la British Standards Institution (BSI), les Technical Methods for Highways (TMH) et d'autres méthodes d'essai spécifiques à chaque pays. Ces méthodes, même pour un même essai, présentent des variations mineures dans la procédure et donnent parfois des résultats différents pour un même matériau. Il est important que les méthodes d'essai adoptées dans chaque pays ne soient pas mélangées arbitrairement avec d'autres méthodes d'essai. Les procédures relatives aux méthodes d'essai adoptées doivent être suivies scrupuleusement.

En outre, les caractéristiques des matériaux changent parfois pendant l'extraction, le stockage, le dosage et le compactage. Par exemple, la distribution de la taille des particules, les limites d'Atterberg et la résistance des scories et des matériaux fortement altérés par les intempéries. Par conséquent, des essais de vérification doivent être effectués à différents stades et les ajustements nécessaires doivent être apportés pour maintenir la qualité utilisée pour la conception.

3.4 Lignes directrices pour la sélection et l'utilisation des matériaux

Les principaux groupes ou types de matériaux géologiques qui conviennent à la construction de routes à faible volume revêtues de bitume ont été identifiés dans le Tableau 3-1.

Tableau 3-1: Groupes matériaux

Groupe		Sous-groupe	Exemples importants
I	Roches fortes		<ul style="list-style-type: none"> • Roches métamorphiques foliées • Roches ignées et métamorphiques de base
II	Roches faibles	Intrinsèquement faible ou Roches mal consolidées	<ul style="list-style-type: none"> • Dépôts de coralline • Marnes et calcaires faibles • Conglomérats faibles • Grès faibles • Tufs volcaniques faibles, pyroclastiques • Gisements de schiste, de siltstone et de mudstone
		Roches partiellement altérées et/ou fortement fracturées	<ul style="list-style-type: none"> • Calcaires fracturés /altérés (facile à scarifier) • Faiblesse des agglomérats et des brèches volcaniques • Autres roches partiellement altérées
III	Dépôts granulaires naturels	Sols et graviers transportés	<ul style="list-style-type: none"> • Dépôts alluviaux de sable et de gravier (y compris le lit de la rivière, la terrasse de la rivière, les dépôts de rivage et de ventilateur) • Dépôts de sable alluvial et éolien • Gisements de sable argileux • Dépôts colluviaux • Soria volcanique (Cendres) Graviers
		Sols résiduels et graviers	<ul style="list-style-type: none"> • Graviers de quartz • Granit altéré / Gneiss • Autres sols graveleux résiduels ou dépôts de sable argileux

IV	Graviers duricrust (pédogéniques)		<ul style="list-style-type: none"> • Dépôts de latérite • Dépôts de Calcrete (y compris Calc Tufa et Caliche)
V	Matériaux manufacturés		<ul style="list-style-type: none"> • Briques • Asphalte recyclé • Déchets de démolition (béton et brique) • Sous-produits industriels et déchets • Produits (c.-à-d. scories de haut fourneau,

Les groupes de matériaux ont été définis sur la base de leurs caractéristiques géologiques et techniques. Ces deux attributs sont liés de sorte que la classification par cette méthode aide les ingénieurs à utiliser les cartes géologiques et les références géologiques lors des études visant à identifier et à évaluer les sources potentielles de matériaux de construction routière.

Ce chapitre passe en revue les matériaux au sein de groupes définis en fonction de la principale propriété manifeste identifiée lors des études en laboratoire. Les "principaux groupes de propriétés manifestes" considérés sont :

- Matériaux à haute plasticité
- Matériaux mal notés
- Matériaux mal formés
- Matériaux à faible teneur en particules
- Matériaux à faible durabilité

Les Tableaux A-1 à A-5 de l'annexe 1 décrivent chacun de ces "principaux groupes de propriétés manifestes" et présentent un résumé des types de matériaux géologiques associés à chacune des propriétés. Chaque tableau récapitulatif donne des indications sûres :

- Problèmes liés au bien défectueux,
- Les méthodes d'essai et les techniques d'analyse qui peuvent être utilisées pour quantifier et limiter le problème,
- Des caractéristiques particulières (identifiables lors des analyses en laboratoire) qui influencent fortement le comportement du matériau,
- Facteurs pouvant être utilisés lors de la conception de la chaussée pour accueillir la principale propriété manifestée
- Options pour améliorer la qualité et la performance des matériaux.

La discussion sur les principaux groupes de propriétés manifestes des matériaux est parfois compliquée car les matériaux appropriés pour les LVR sont souvent associés à plus d'une propriété difficile. Néanmoins, les indicateurs de performance et les spécifications des lignes directrices existantes pour les LVR montrent que leur performance en service est satisfaisante.

3.5 Matériaux à haute plasticité

La plasticité élevée est principalement associée à la présence d'argile dans la fraction fine de l'agrégat. Les effets néfastes associés à la présence de minéraux argileux dans un matériau de chaussée sont principalement liés à la propriété des minéraux argileux d'attirer l'humidité, ce qui peut ramollir la fraction fine et provoquer un gonflement. Certains minéraux argileux sont plus sensibles que d'autres en ce qui concerne leur capacité à attirer l'eau et à gonfler.

La présence de fines argileuses et l'exposition à l'eau ont longtemps été associées aux mauvaises performances des granulats de chaussée. Toutefois, la présence de matériaux fins pour combler les vides dans un matériau bien calibré est également reconnue comme bénéfique, car elle permet de construire des

chaussées denses et résistantes. Toutefois, pour améliorer la densité et les performances, le pourcentage de fines argileuses doit être limité à 15 à 20 %.

Bien que les particules d'argile puissent attirer l'humidité disponible, les fines argileuses denses présentent une faible perméabilité qui empêche le mouvement ou le passage de l'eau. Ces deux caractéristiques contribuent sans aucun doute de manière significative à la difficulté de prédire le comportement technique des agrégats bien compactés contenant des fines cohésives. Essentiellement, la présence de fines de plastique sera préjudiciable à la chaussée compactée si elle peut être affaiblie par l'entrée d'humidité. Certains types de matériaux riches en argile peuvent être compactés pour former des matériaux très denses qui ont une grande résistance à la pénétration de l'humidité. Parmi les exemples de matériaux de cette catégorie, on peut citer certains dépôts de latérite, des graviers de calcaire et des graviers de corail. Ces types de matériaux ont une faible perméabilité, comme le montre leur caractéristique de fournir une grande résistance lorsqu'ils sont testés à l'état trempé.

3.5.1 *Évaluation des matériaux de haute plasticité*

La méthode de base pour évaluer les caractéristiques des fines argileuses est la détermination des limites d'Atterberg et du retrait linéaire. Ces essais fournissent des indices pour la part de matériau dans les granulats routiers qui est plus fine que 0,425mm. Les matériaux de construction routière standard ont été historiquement spécifiés sur la base d'un indice de plasticité maximum (PI, parfois désigné par Ip) qui est appliqué en conjonction avec une enveloppe granulométrique spécifiée.

Dans le cas des matériaux dont les valeurs de l'indice de plasticité dépassent les valeurs maximales recommandées, il est également reconnu que la relation entre la proportion de matériaux fins et leurs caractéristiques de plasticité est très pertinente et doit être étudiée. Des caractéristiques de plasticité croissantes (c'est-à-dire définies par la valeur de l'Ip ou du retrait linéaire) peuvent être tolérées lorsqu'elles sont accompagnées d'une proportion décroissante de matériau fin. Plusieurs paramètres ont été définis pour évaluer la relation entre la plasticité et la teneur en fines, à savoir :

- Module de plasticité = Indice de plasticité x % passant au tamis de 0,425 mm
- Plasticité Produit= Indice de plasticité x % passant au tamis de 0,075 mm
- Produit de rétraction = rétraction linéaire x % passant au tamis de 0,425 mm

Ces paramètres sont des indicateurs de performance utiles lorsqu'ils sont considérés en association avec les résultats d'autres procédures d'essai telles que celles énumérées ci-dessous :

- Essais de valeur CBR trempés et non trempés, y compris la mesure du gonflement,
- Essais de valeur CBR trempés et non trempés, y compris la mesure du gonflement,
- Analyse granulométrique de l'hydromètre pour déterminer la proportion de particules de la taille de l'argile (< 0,002 mm),
- Analyse de la minéralogie des argiles,
- Activité de l'argile.

Les propriétés techniques de certains matériaux à haute plasticité peuvent être influencées par les changements qui se produisent après le compactage et qui améliorent la résistance de la chaussée par l'autocensure. L'auto-cimentation des matériaux latéritiques est examinée en détail dans CIRIA (1988). Cette propriété peut être étudiée en effectuant des essais CBR ou des essais triaxiaux sur des matériaux similaires pendant une période de durcissement prolongée.

À l'inverse, il existe des matériaux qui, bien qu'ils présentent une résistance initialement élevée lors des essais, peuvent se dégrader avec le temps en service en raison de l'attrition et de la génération de fines délétères, par exemple les basaltes qui contiennent de la montmorillonite.

3.5.2 *Utilisation de matériaux à haute plasticité*

Le Tableau A-1 de l'annexe 1 résume les principaux aspects des matériaux à haute plasticité pertinents pour leur utilisation en tant que sous-fondation ou agrégat de fondation. Le risque d'ingénierie lié à l'utilisation de matériaux à haute plasticité non modifiés sera largement associé au degré de plasticité, à la quantité de

fines et à la mesure dans laquelle l'eau aura accès aux couches de fondation ou de fondation routière. Ces facteurs peuvent être pris en compte dans le cadre d'une conception appropriée. Si cela n'est pas possible, les options pour l'amélioration des propriétés techniques du matériau comprennent la neutralisation des effets de plasticité par stabilisation/modification mécanique ou chimique, ou l'élimination d'au moins une partie de la teneur en fines par le traitement des matériaux. Cette dernière option peut augmenter considérablement le coût.

Des études récentes ont montré que les limites d'utilisation de ces matériaux sont en fait assez larges, à condition qu'un bon drainage soit garanti.

3.6 Matériaux granulométriquement mal calibrés

Une granulométriquement mal calibrés a été associée à un certain nombre de défauts de performance, comme l'illustre la Figure 3-1 et est résumée ci-dessous :

(A) Granulométrie trop grossière (par exemple, certaines roches partiellement altérées, matériaux quartziques) :

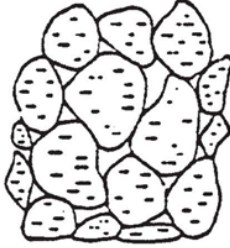
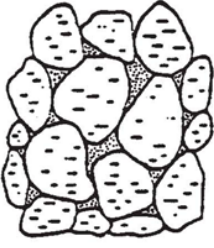
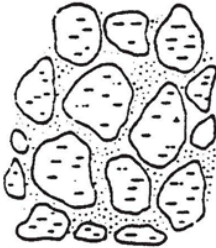
- Une stabilité réduite et un risque accru de cisaillement
- Faible densité in situ et risque accru de tassement ou de déformation permanente sous la circulation
- Difficile à compacter
- Une transmissivité accrue
- Pompage
- La spéléologie associée à l'utilisation de particules très grossières
- Demande élevée de liants
- Mauvaise finition de la surface
- Peignage et plumage

(B) Trop de fines (par exemple, sables, matériaux latéritiques et calcaires à grain fin, cendres pyroclastiques)

- Faible résistance au compactage et risque accru de déformation permanente par cisaillement
- Un fort potentiel de remontée capillaire
- Sensibilité à l'humidité
- Production de poussière

(C) Graduation des lacunes (par exemple, dépôts pédogènes)

- Difficile à compacter
- Risque accru de tassement ou de déformation permanente sous l'effet du trafic
- Sensibilité accrue à l'humidité
- Pompage des fines, ce qui diminue la stabilité de la chaussée sous charge
- Une densité maximale plus faible pour une résistance plus faible.

		
Aggregate with no Fines (0 % Fines)	Aggregate with Sufficient Fines for Maximum Density (Ideally 8-15 % Fines)	Aggregate with High Amount of Fines (> 25 % Fines)
<ul style="list-style-type: none"> • Grain-to-grain contact • Variable density • High permeability • Non-frost susceptible • High stability when confined, low when unconfined • Not affected by adverse water conditions • Difficult to compact • Ravels easily 	<ul style="list-style-type: none"> • Grain-to-grain contact with increased resistance against deformation • Increased to maximum density • Low permeability • Frost susceptible • Relatively high stability in confined or unconfined conditions • Not greatly affected by adverse water conditions • Moderately easy to compact • Good road performance 	<ul style="list-style-type: none"> • Grain-to-grain contact destroyed, aggregate is "floating" in soil • Decreased density • Low permeability • Frost susceptible • Low stability and low strength • Greatly affected by adverse water condition • Easy to compact • Dusts easily

Source : Yoder and Witczak, 1975

Figure 3-1: Illustration des problèmes posés la granulométrie mal calibrés

3.6.1 Évaluation de la distribution de la taille des particules

La distribution de la taille des particules (PSD) (également appelée analyse de gradation ou analyse par tamisage), est normalement évaluée en testant des échantillons suffisamment représentatifs. Le tamisage est utilisé pour les particules de gravier et de sable, tandis que pour les particules plus petites de limon et d'argile, une procédure de sédimentation est utilisée (soit la méthode de la pipette, soit celle de l'hydromètre). Bien que le tamisage humide et le tamisage à sec soient tous deux prévus dans les procédures standard, le tamisage à sec n'est recommandé que pour les matériaux dont on sait qu'ils sont exempts de particules fines. Les granulats contenant du limon ou de l'argile nécessitent l'utilisation de la méthode humide, dans laquelle le matériau doit d'abord être lavé pour éliminer les particules fines (passage d'un tamis de 63 µm ou 75 µm). L'acceptabilité de la granulométrie est basée sur les critères généraux suivants :

- La granulométrie globale
- Le montant des fins ("fins")
- La quantité de matériaux très grossiers ("oversize")

Les résultats sont normalement présentés sous la forme d'une courbe de distribution de la taille des particules, bien qu'à des fins de comparaison des spécifications, des résultats tabulaires puissent être utilisés. Il est, en outre, possible d'utiliser une série d'indices de granulométrie pour définir les matériaux. Les spécifications peuvent utiliser une variété de ces indices pour fixer des limites à l'acceptabilité de la classification des matériaux. Les indices couramment utilisés sont définis ci-dessous :

- Ratio des fins (FR) = $P_{0,075}/P_{0,425}$
- Coefficient granulométrique (GC) = $(P_{26,5} - P_{2,00}) \times P_{4,75}/100$
- Module granulométrique (GM) = $[300 - (P_{2,00} + P_{0,425} + P_{0,075})]/100$
- Indice de grossièreté (IC) = $(100 - P_{2,36})$
- Indice de finesse (IF) = $P_{0,075}$
- P 26,5 = pourcentage de matière passant le tamis de 26,5 mm
- P 4,75 = pourcentage de matière passant le tamis de 4,75 mm
- P 2,36 = pourcentage de matière passant le tamis de 2,36 mm
- P 2,00 = pourcentage de matière passant au tamis de 2,00 mm
- P 0,425 = pourcentage de matière passant le tamis de 0,425 mm
- P 0,075 = pourcentage de matière passant le tamis de 0,075 mm
- Indice de rejet (IR) ou indice de surdimensionnement (IO) = pourcentage retenu sur un tamis de 37,5mm.

3.6.2 Utilisation des Matériaux granulométriquement mal calibrés

Le Tableau A-2 de l'annexe 1 résume les principaux aspects des matériaux mal calibrés en rapport avec leur utilisation comme sous-fondation ou agrégat de base. Le risque technique associé à l'utilisation d'un matériau mal calibré non modifié peut être pris en compte dans une conception appropriée, ou l'on peut supposer que la construction et l'utilisation en service amélioreront les caractéristiques de calibrage. Si ces scénarios ne sont pas valables, les options pour l'amélioration des propriétés techniques du matériau comprennent :

- Traitement des matériaux (broyage et/ou criblage),
- Stabilisation mécanique,
- Modification de la chaux/ciment pour faire face aux effets des fins excessives (cf. matériaux à haute plasticité),
- Enlèvement ou broyage de matériaux surdimensionnés sur la route.

3.7 Matériaux de mauvaise forme

Les agrégats de fondation ou de couche de base sont inappropriés en termes de forme s'ils sont non seulement trop aplatis ou trop allongés, mais aussi si leurs particules sont trop rondes et sans faces angulaires. Bien qu'il ne s'agisse pas d'un critère de forme à proprement parler, la texture de surface est également considérée dans ce groupe, en particulier une texture lisse et polie si elle est associée à des particules trop rondes.

La mauvaise forme des particules en termes d'aplatissement ou d'allongement, qu'il s'agisse d'agrégats naturels ou transformés, est largement fonction des caractéristiques inhérentes au matériau de base, même si, dans certains cas, elle peut être aggravée par de mauvaises procédures de broyage. Les matériaux typiques qui présentent des problèmes d'aplatissement ou d'allongement élevés sont les roches métamorphiques fortement anisotropes telles que les shales, les ardoises, les phyllites ou les schistes. Certains matériaux de lave ignée présentent également des problèmes de forme en raison de l'anisotropie héréditaire des bandes de coulée.

L'arrondi, par contre, est en grande partie le résultat de processus sédimentaires secondaires, bien que le caractère du matériau d'origine ait une influence. Les sables et graviers alluviaux non traités et les sables soufflés par le vent sont typiques de ces matériaux. Les graviers fluviaux arrondis ont généralement besoin d'être concassés pour obtenir de bonnes performances sur la route.

Une mauvaise forme peut être associée à un certain nombre de défauts de performance tels que ceux résumés ci-dessous :

(A) Arrondi (en association avec une texture de surface lisse)

- Faible friction entre les particules et perte de stabilité
- Difficulté de compactage
- Faible densité et forte teneur en vides d'air

(B) Forte aplatissement ou allongement

- La décomposition ou l'écrasement des particules
- Problèmes de compactage et vides d'air importants
- Rebondir avec des matériaux riches en mica.
- Performances médiocres dans les couches d'étanchéité.

3.7.1 Évaluation de la forme

La forme des particules est généralement définie par les normes britanniques (BSI, 1990a) en termes d'indice d'aplatissement (If) et d'indice d'allongement (Ie) en référence à des jauges de forme standard. Où :

If = Masse des particules dont la dimension la plus petite est $< 0,6$ dimension moyenne / Masse totale

Ie = Masse des particules dont la dimension longue est $> 1,8$ dimension moyenne / Masse totale

Les facteurs de forme supplémentaires qui peuvent être utilisés comprennent l'angularité et la sphéricité. La première peut être obtenue par des méthodes indirectes en termes d'indice d'angularité (AN) qui est rapporté comme une comparaison avec un gravier de rivière standard bien arrondi de 33% de vides d'air (BSI, 1975). La dimension minimale moyenne (ALD) est un paramètre de forme utilisé dans l'évaluation des agrégats d'enduit superficiel et est définie comme la plus petite distance perpendiculaire entre deux plaques parallèles à travers lesquelles une particule passera.

3.7.2 Utilisation de matériaux mal formés

Le Tableau A-3 de l'Annexe 1 résume les principaux aspects des matériaux mal formés en rapport avec leur utilisation comme sous-fondation ou agrégat de la chaussée. Si les caractéristiques de forme ne peuvent pas être prises en compte dans une conception routière appropriée, il existe alors des options pour améliorer les propriétés techniques comme suit :

- Arrondissement excessif - écrasement de la matière,
- Aplatissement ou allongement - procédures de broyage modifiées, par exemple alimentation par étranglement ou installation de broyage à impact élevé,
- Modification mécanique avec d'autres matériaux

3.8 Matériaux à faible teneur en particules

Les granulats de sous-fondation et de couche de base sont inappropriés en termes de résistance des particules si les particules individuelles, soit par des défauts inhérents, soit par dégradation, ne répondent pas aux critères de résistance à l'écrasement, généralement définis en termes de performance en laboratoire d'un sous-échantillon de masse. Une faible résistance des particules est normalement due à :

- Défauts inhérents au tissu (par exemple shales, grès, mudstones, certaines roches métamorphiques)
- Induration incomplète ou faible (par exemple, graviers pédogènes, latérites, roches sédimentaires, matériaux manufacturés et déchets,
- L'altération (par exemple, tous les matériaux potentiellement altérés par les intempéries)

La faible résistance des particules est également fonction de la forme et de la taille des agrégats. La plus grande faiblesse des particules floconneuses ou allongées est associée aux plus grands moments de flexion appliqués à leurs sections transversales, ainsi qu'à la possibilité d'écrasement ponctuel des fragments angulaires. Les effets de taille peuvent être liés à la distribution statistique des défauts, par laquelle il peut y avoir une plus grande probabilité de défauts dans les particules agrégées plus grandes plutôt que plus petites (Smith et Collis, 1993).

Une faible résistance des particules peut être associée à un certain nombre de défauts de performance, tels que :

- La panne sous le compactage ou le trafic,
- Génération d'fines excessives,
- Réduction de la force de compactage,
- Risque accru de tassement ou de déformation permanente sous l'effet du trafic,
- Pompage des fines en cascade.

La faible résistance des particules peut cependant aussi présenter des avantages pour certains matériaux, par exemple :

- Une excavation plus facile,
- Une densification plus facile (compactibilité),
- La décomposition des particules peut améliorer le granulométrie,

3.8.1 *Évaluation des matériaux à faible résistance des particules*

Les essais de résistance des agrégats en laboratoire les plus couramment utilisés sont la valeur d'impact des agrégats (AIV), la valeur de broyage des agrégats (ACV) et l'essai de broyage fin des agrégats de (10% FACT) qui lui est associé, ainsi que l'essai d'abrasion de Los Angeles (LAA) (ou LA Rattler). Le principal inconvénient de ces essais, dans leur forme non modifiée, est qu'ils n'utilisent qu'une seule fraction de taille (9,5 mm - 14 mm) de l'agrégat. Dans le contexte des matériaux à faible résistance, il peut être nécessaire de modifier les procédures standard pour ces essais.

L'essai AIV mesure la capacité des particules d'agrégats à résister à 15 coups de poids standard portés à une hauteur standard en mesurant la quantité de fines (passant au tamis de 2,36 mm) produites. Outre la non-conformité aux procédures, le résultat de l'essai peut être influencé par des facteurs tels que la forme des particules, l'humidité, la position de la plaque de base et les effets d'amortissement des fines produites. Des procédures de l'essai AIV modifiées ont été proposées par Hosking & Tubey (1969), qui peuvent être utilisées pour :

- Mesurez la panne intermédiaire entre 10 mm et 2,36 mm,
- Limitez le nombre de coups et extrapolez ensuite aux 15 coups complets,
- Limitez le nombre de coups et extrapolez ensuite aux 15 coups complets.

L'ACV évalue la résistance des particules d'agrégats à une charge continue de 400 kN sur une période de 10 minutes en mesurant les fines produites comme dans l'essai AIV. Afin de réduire les effets d'amortissement, on utilise plus généralement l'essai 10%FACT qui permet de mesurer la charge pour obtenir une dégradation de 10%. Comme pour l'essai AIV, des échantillons trempés et secs peuvent être testés. Dans certaines spécifications d'agrégats, le rapport entre les valeurs trempées et sèches est stipulé.

L'utilisation d'agrégats imbibés d'éthylène glycol peut être utilisée dans les essais ci-dessus comme un moyen rapide d'évaluer les matériaux suspects tels que les roches ignées basiques. Les essais AIV d'éthylène glycol qui sont cinq unités de pourcentage au-dessus d'un résultat de l'essai AIV (humide) sont considérés comme indicatifs d'un matériau à problème (Sampson, 1990).

3.8.2 *Utilisation de matériaux à faible teneur en particules*

Le Tableau A-4 de l'annexe 1 résume les principaux aspects des matériaux à faible résistance aux particules qui sont pertinents pour leur utilisation comme sous-fondation ou agrégat de base routier. Le risque d'ingénierie lié à l'utilisation de matériaux à faible résistance aux particules peut être pris en compte dans le cadre d'une conception appropriée ou l'on peut supposer qu'en service, l'utilisation conduira à des caractéristiques "améliorées" telles que la granulométrie. Si ces scénarios ne sont pas valables, les options pour l'amélioration des propriétés techniques du matériau comprennent :

- Criblage de matériaux,
- Stabilisation mécanique,
- Modification de la chaux/ciment.

3.9 Matériaux de faible durabilité

La durabilité peut être définie comme la capacité d'un matériau de construction à maintenir son intégrité mécanique et physio-chimique pendant la durée de vie de la route. Le groupe de durabilité faible peut contenir des matériaux qui répondent à tous les autres critères de spécification mais qui peuvent se détériorer en service. Les problèmes de durabilité peuvent aller de la dégradation à court terme pendant la construction à la détérioration à long terme en service. Dans le contexte des matériaux standard pour les RVL, cette dernière question est d'une importance capitale lorsqu'il s'agit de traiter la défaillance apparente de matériaux conformes aux spécifications, par exemple les basaltes ou les schistes altérés par les intempéries.

Cette détérioration peut prendre plusieurs formes, notamment :

- Défauts inhérents au tissu (par exemple, les schistes, certains grès et roches métamorphiques),
- Induration incomplète ou faible (par exemple, graviers pédogènes, certaines roches sédimentaires, matériaux manufacturés),
- L'altération (par exemple, tous les matériaux potentiellement altérés par les intempéries).

3.9.1 Évaluer la durabilité

L'évaluation de la durabilité devrait idéalement comporter des éléments de modélisation et de prédiction du comportement et ne devrait pas reposer sur des évaluations ponctuelles de la résistance. En pratique, les procédures de durabilité impliquent l'évaluation de la performance des granulats lorsqu'ils sont soumis à une forme de dégradation ou d'altération artificielle. Certaines procédures d'essai, comme celle de Los Angeles Abrasion (LAA), comprennent des éléments d'essai de résistance et de durabilité.

L'essai LAA est parfois lié dans les spécifications aux essais AIV et ACV. Cependant, le mécanisme d'essai est davantage un mécanisme de dégradation mécanique que de résistance des particules et il devrait être considéré plus raisonnablement comme un indicateur de durabilité. L'essai Durability Mill, ou l'essai Texas Ball Mill, présente l'avantage par rapport aux autres essais de dégradation de la résistance, dans la mesure où une plus grande gamme de grades est testée, où moins d'échantillons en vrac sont nécessaires et où les produits dégradés de l'essai sont conservés pour identification et évaluation. La procédure du National Institute for Transport and Road Research (NITRR) comprend l'essai de plasticité de la fraction dégradée et l'enregistrement des résultats dans le cadre de l'indice de durabilité (Sampson et Roux, 1987).

Les essais de solidité du sodium et du magnésium mesurent la résistance à la dégradation mécanique par des cycles de cristallisation et de réhydratation. Ils ont toutefois fait l'objet de critiques pour leur manque de reproductibilité dans les comparaisons entre différents laboratoires. L'essai est malheureusement sujet à de mauvaises pratiques de gestion des laboratoires, notamment en ce qui concerne le contrôle de la température et le type de sulfate de sodium utilisé.

L'essai de l'indice de durabilité de l'argile (ISRM, 1981), en plus d'être un indicateur de performance utile, peut jouer un rôle important dans l'indexation des matériaux dans la gamme des roches aux sols durs. La combinaison de l'indice d'extinction avec la plasticité a été suggérée comme un moyen utile de présenter les résultats pour les matériaux argileux.

Les procédures combinées d'examen minéralogique, de texture et de tissu, telles que celles décrites par Cole et Sandy (1980), sont fortement recommandées dans le cadre de toute évaluation globale des agrégats pour les matériaux présentant des problèmes de durabilité réels ou supposés. Le Tableau A-6 de l'annexe 1 résume les procédures pétrographiques courantes qui peuvent être utilisées dans l'évaluation de la durabilité.

3.9.2 Utilisation de matériaux de faible durabilité

Le Tableau A-5 de l'annexe 1 résume les principaux aspects des matériaux à faible durabilité en rapport avec leur utilisation en tant que sous-fondation ou agrégat de la chaussée. Le risque technique associé à l'utilisation de matériaux à faible durabilité peut être pris en compte dans le cadre d'une conception appropriée ou l'on peut supposer que l'utilisation en service conduira à des caractéristiques "améliorées"

telles que la granulométrie ou la plasticité. Si ces scénarios ne sont pas valables, les options pour l'amélioration des propriétés techniques du matériau comprennent :

- Contrôle du matériaux,
- Stabilisation mécanique,
- Modification de la chaux/ciment.

3.10 Une approche fondée sur le risque pour la sélection des matériaux pour les routes revêtues

Une publication récente (Austroads, 2020) utilise une combinaison de facteurs pour sélectionner les matériaux appropriés pour les couches de base et de fondation des routes revêtues. Une matrice de la circulation mesurée en MESA et de la probabilité d'une pluviosité annuelle moyenne supérieure à 500 mm/an est utilisée. Trois classes de trafic et trois niveaux de risque de précipitations supérieures à 500 mm/an sont utilisés pour former neuf niveaux de risque (une matrice 3 x 3). Sur la base du niveau de trafic et de la pluviosité annuelle moyenne attendue pour un site donné, par exemple un trafic inférieur à 0,25 MESA et une faible probabilité de précipitations supérieures à 500 mm/an, on obtient une catégorie de risque représentant cette combinaison. En utilisant la catégorie de risque obtenue à partir de la matrice, le risque lié à l'utilisation de différents types de matériaux est indiqué. Les caractéristiques des matériaux sont mesurées en termes de rapport de finesse (% de l'âge des particules passant le tamis de 75 µm à celui passant le tamis de 425 µm), de module de granulométrie (GM) et de produit de retrait (SP). La décision du niveau de risque à sélectionner pour chaque projet doit être prise par l'ingénieur d'études en fonction du choix des matériaux disponibles. Des détails sur la manière d'utiliser cette approche se trouvent dans Austroads (2020).

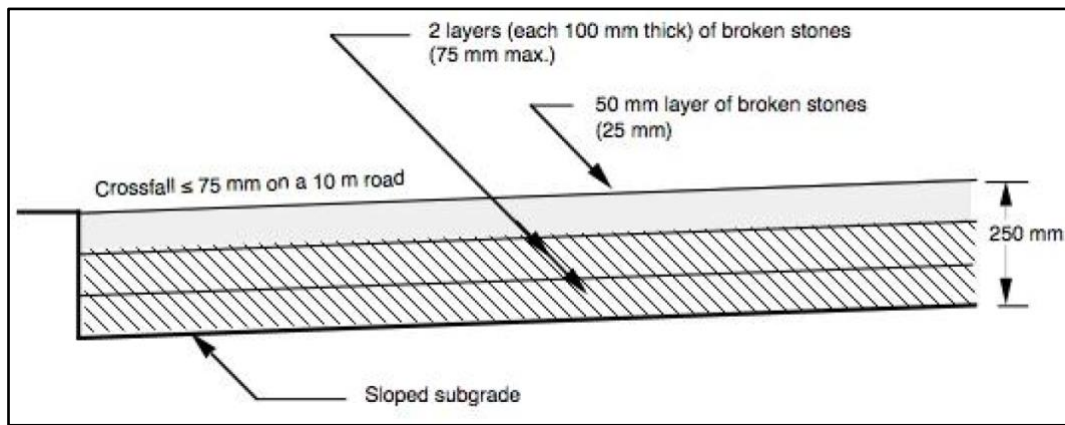
3.11 Macadam and Telford Materials

Dans les zones où l'on trouve des roches, des gros granulats ou des rejets de concasseurs (grands rejets de concasseurs), du sable naturel ou du sable de concassage, il est prudent d'envisager de concevoir la chaussée comme une structure Macadam ou Telford (Figure 3-2 et Figure 3-3). Habituellement, une couche de 150-200mm de Macadam ou de Telford posée sur une fondation d'au moins 30 % de CBR trempé est suffisante pour les routes à faible volume. La distribution granulométrique du Macadam est indiquée dans le tableau 3-2.

Tableau 3-2: Répartition de la taille des particules de la couche de base de Macadam

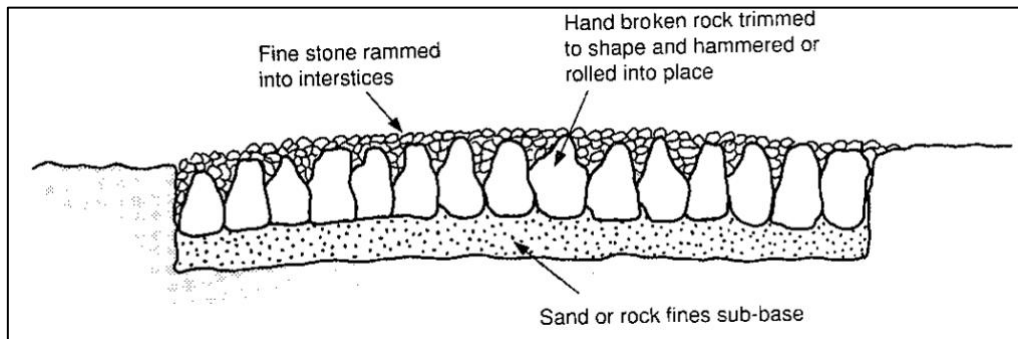
Taille du tamis (mm)	Agrégat écrasé mécaniquement (%âge passant)	Pierre cassée à la main (%âge passant)
75	100	100
50	85-100	85-100
37.5	0-30	35-70
28	0-5	0-15

Les fines de roche non plastique (sable de concassage) ou le sable naturel - ces deux matériaux contenant des particules d'une taille maximale de 5 mm peuvent être utilisés pour le jointoiement du Macadam.



Source <http://www.pavementinteractive.org/article/pavement-history/>

Figure 3-2: Profil en travers de la chaussée en macadam



Source: Millard, 1993

Figure 3-3: La chaussée de Telford

Le type de construction Telford est plus adapté aux régions où la pierre de forme facile et la main-d'œuvre sont largement disponibles ; et où il y a une volonté de fournir des emplois. Elle consiste à caler des blocs (d'environ 200 mm de taille) dans le substrat (au moins CBR 15 %), puis à enfoncer des pierres plus fines dans les interstices afin que les grosses pierres soient entièrement recouvertes comme dans la Figure 3-3. Cette méthode diffère de celle de la "pierre emballée à la main" (HPS) en ce sens que pour la HPS, les grosses pierres sont posées avec les faces plates vers le haut et les pierres plus fines ne remplissent que l'espace entre les grosses pierres. Des revêtements bitumineux de base et minces peuvent ensuite être appliqués sur la base Macadam ou Telford.

3.12 Évaluation en laboratoire des matériaux de chaussée

Des procédures de laboratoire pour l'étude des propriétés des différents matériaux sont nécessaires dans presque toutes les méthodes de conception. La principale différence est que, pour les méthodes basées sur le CBR, l'essai CBR est le principal essai de résistance, alors que dans la méthode DCP-DN, le CBR est remplacé par un essai DCP. L'essai DN du laboratoire est utilisé à la fois pour évaluer le sol de fondation et les matériaux importés pour les nouvelles couches de la chaussée. Il est recommandé qu'en plus de la procédure standard de compactage en laboratoire, chaque échantillon soit soumis à un essai CBR (méthodes CBR) ou pénétré avec le DCP (méthode DCP-DN) pour obtenir une mesure de la valeur CBR ou DN aux différentes teneurs en humidité et densités. Cela donne une première indication de l'adéquation du matériau à une classe de chargement de trafic (TLC) particulière. La procédure normale consiste à tester à trois taux d'humidité et trois niveaux de compactage, comme indiqué dans l'illustration du Tableau 3-3. Les trois niveaux d'humidité sont suffisants pour estimer la résistance minimale probable du matériau à la teneur en humidité requise. En général, pour les méthodes basées sur la méthode CBR, les matériaux sont souvent classés sur la base de la

résistance à l'état trempé. Cependant, si l'ingénieur est convaincu que le matériau sera soumis à un environnement plus sec (comme les accotements revêtues ou une hauteur de couronne élevée), la résistance peut être classée à un taux d'humidité inférieur décidé par l'ingénieur.

Tableau 3-3: Exemple de matrice d'essai pour le compactage et l'évaluation de la résistance des matériaux

Effort compaction	Régime d'humidité		
	Trempé	OMC	0,75 OMC
Léger	3 échantillons	3 échantillons	3 échantillons
Intermédiaire	3 échantillons	3 échantillons	3 échantillons
Lourd	3 échantillons	3 échantillons	3 échantillons

3.13 Spécifications des matériaux pour les méthodes de conception des chaussées basées sur le CBR

Les matériaux en gravier naturel pour ces méthodes de conception sont classés comme indiqué dans l'exemple présenté dans le Tableau 3-4. Notez que les différences varieront d'un pays à l'autre et les spécifications des pays qui prévalent sur cet exemple. Il convient également de noter que la variabilité de la qualité des matériaux naturels (même au sein d'un même banc d'emprunt) signifie que les résultats des essais de laboratoire qui varient dans une fourchette de $\pm 20\%$ des minima indiqués sont acceptables. Ainsi, les performances des CBR 30 et CBR 25 ne peuvent pas différer beaucoup.

Il est important que les ingénieurs soient conscients que des recherches plus récentes et en cours ont montré, et montreront probablement, que les valeurs indiquées dans ces exemples pourraient être révisées sur la base de preuves. Il est recommandé que les chercheurs et les ingénieurs élaborent des spécifications indigènes par le biais de recherches dans le pays afin de calibrer les preuves données ici.

Les méthodes d'essai les plus courantes sont celles de l'American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), de l'American Society for Testing and Materials (ASTM), de la British Standards Institution (BSI) et les méthodes de Test Methods for Highways (TMH) - désormais remplacées par les normes nationales sud-africaines (SANS). Il y a souvent des différences dans les résultats obtenus en utilisant différentes méthodes d'essai. Les plus grandes différences dans les résultats des essais sont obtenues pour les limites d'Atterberg et les caractéristiques de compactage/les essais de résistance - les autres méthodes des essais ont des différences relativement insignifiantes dans les résultats. Cependant, les valeurs des différences dépendent de la matière et, dans certains cas, peuvent même se situer dans les limites de l'erreur expérimentale.

Tableau 3-4: Exemple de spécifications des matériaux de chaussée

Code	Matériaux	Spécifications abrégées
NG80	Gravier naturel	<ol style="list-style-type: none"> 1. Min. CBR : 80% à 98/100% BS compactage lourd et 4 jours de trempage. 2. Gonflement maximale : 0,2% 3. Max. Taille et granulométrie : Taille maximale 37,5 mm, granulométrie comme spécifié. 4. PI : Dépendant du type de matériau, du trafic et de la résistance du sol support ou selon les spécifications.
NG65	Gravier naturel	<ol style="list-style-type: none"> 1. Min. CBR : 65% à 98/100% BS compactage lourd et 4 jours de trempage. 2. Gonflement maximale : 0,2% 3. Max. Taille et granulométrie : Taille maximale 37,5 mm, granulométrie comme spécifié. 4. PI : Dépendant du type de matériau, du trafic et de la résistance du sol support ou selon les spécifications.
NG55	Gravier naturel	<ol style="list-style-type: none"> 1. Min. CBR : 55% à 98/100% BS compactage lourd et 4 jours de trempage. 2. Gonflement maximale : 0,2% 3. Max. Taille et granulométrie : Taille maximale 37,5 mm, granulométrie comme spécifié. 4. PI : Dépendant du type de matériau, du trafic et de la résistance du sol support ou selon les spécifications.
NG45	Gravier naturel	<ol style="list-style-type: none"> 1. Min. CBR : 45% à 98/100% BS compactage lourd et 4 jours de trempage. 2. Max. gonflement : 0,2 % 3. Max. Taille et granulométrie : Taille maximale 37,5 mm, granulométrie comme spécifié. 4. PI : Dépendant du type de matériau, du trafic et de la résistance du sol support ou selon les spécifications.
NG30	Gravier naturel	<ol style="list-style-type: none"> 1. Min. CBR : 30% à 95/97% BS compactage lourd & la teneur en humidité la plus élevée prévue 2. Max. gonflement : 1.0% à 100% BS compactage lourd. 3. Max. Taille et granulométrie : Taille maximale 63 mm ou 2/3 épaisseur de couche. 4. PI : Dépendant du type de matériau, du trafic et de la résistance du sol support ou selon les spécifications.
NG15	Gravier/sol	<ol style="list-style-type: none"> 1. Min. CBR : 15% à 93/95% BS compactage lourd & la teneur en humidité la plus élevée prévue. 2. Max. gonflement : 1,5% à 100% BS compactage lourd. 3. Max. Taille : 2/3 de l'épaisseur de la couche 4. PI : Dépendant du type de matériau, du trafic et de la résistance du sol support ou selon les spécifications.
NG7	Gravier/sol	<ol style="list-style-type: none"> 1. Min. CBR : 7% à 93/95% BS compactage lourd & la teneur en humidité la plus élevée prévue. 2. Max. gonflement : 1,5% à 100% BS compactage lourd. 3. Max. Taille : 2/3 épaisseur de couche. 4. PI : Dépendant du type de matériau, du trafic et de la résistance du sol support ou selon les spécifications.
NG3	Gravier/sol	<ol style="list-style-type: none"> 1. Min. CBR : 3% à 93/95% BS compactage lourd et la plus haute teneur en humidité prévue. 2. Max. gonflement : N/A. 3. Max. Taille : 2/3 épaisseur de couche.

Source : Modifié de Gourley et Greening, (1999).

Dans le Tableau 3-4, deux autres niveaux minimums de compactage sont spécifiés. Lorsque les densités les plus élevées peuvent être atteintes sur le terrain (à partir de mesures sur des matériaux similaires ou d'autres informations établies), elles doivent être spécifiées par l'ingénieur.

Tableau 3-5: Exemple de spécification de la taille des particules pour les bases routières en gravier naturel

Taille des tamis d'essai	Pourcentage par pourcentage par masse du tamis total de passage d'agrégat				
	Enveloppe A			Enveloppe B	Enveloppe C
	Taille maximale nominale des particules				
	37,5 mm	20 mm	10 mm		
50 mm	100			100	
37,5 mm	80-100	100		80-100	
20 mm	55-95	80-100	100	55-100	
10 mm	40-80	55-85	60-100	40-100	
5 mm	30-65	30-65	45-80	30-80	
2,36 mm	20-50	20-50	35-75	20-70	20-100
1,18 mm	-	-	-	-	-
425 µm	8-30	12-30	12-45	8-45	8-80
300 µm	-	-	-	-	-
75 µm	5-20	5-20	5-20	5-20	5-30
Enveloppe D : $1.65 < GM < 2.65$					

Source : Gourley et Greening, (1999)

Contrairement à la méthode DCP-DN, les matériaux utilisés pour ces méthodes de conception doivent simultanément satisfaire aux spécifications de granulométrie (enveloppe de granulométrie et GM) et aux limites d'Atterberg (PI et PM) indiquées dans le Tableau 3-5, le Tableau 3-6 et le Tableau 3-7, qui dépendent de la classe de sous-sol définie dans le Tableau 3-7. Le raisonnement est que, puisque les méthodes sont développées de manière empirique, certaines caractéristiques clés des matériaux doivent également être reproduites pour que la conception fonctionne correctement.

Les spécifications de résistance et de plasticité varient en fonction du niveau de trafic et de la classe de sous-sol, comme indiqué dans le Tableau 3-6. L'essai CBR par trempage est utilisé pour spécifier la résistance minimale du matériau de base.

Tableau 3-6: Spécifications de plasticité de base pour les bases routières en gravier naturel

Sol support Classe (CBR)	Propriété	Limite supérieure de la classe de trafic de conception (MESA)					
		TLC 0,01	TLC 0,1	TLC 0,3	TLC 0,5	TLC 1.0	TLC 3.0
S2 (3-4%)	I _p	<12	<12	<12	<9	<9	<6
	P _m	<400	<300	<240	<180	<180	<90
	Granulométrie	B	B	Un	Un	Un	Un
S3 (5-7%)	I _p	<15	<15	<15	<12	<9	<6
	P _m	<550	<320	<320	<240	<180	<90
	Granulométrie	C ⁽¹⁾	B	B	Un	Un	Un
S4 (8-14%)	I _p	Note (2)	<15	<15	<12	<9	<6
	P _m	<800	<320	<320	<240	<180	<90
	Granulométrie	D ⁽³⁾	B	B	B	Un	Un
S5 (15-29%)	I _p	Note (2)	<15	<15	<12	<9	<6
	P _m	n/s	<400	<320	<240	<180	<90
	Granulométrie	D ⁽³⁾	B	B	B	Un	Un
S6 (>30%)	I _p	Note (2)	<15	<15	<12	<12	<6
	P _m	n/s	<550	<500	<240	<240	<90
	Granulométrie	D ⁽³⁾	C ⁽¹⁾	B	B	Un	Un

Notes :

- Le granulométrie «C » n'est pas autorisé dans les environnements humides ou les climats (N<4) ; granulométrie « » est l'exigence minimale
- Maximum I_p = 8 x GM
- Le granulométrie 'D' est basé sur le module de granulométrie 1.65 < GM < 2.65

- Tous les matériaux de base sont des graviers naturels
- Les sols supports sont non expansifs
- Des notes séparées sont fournies couvrant l'utilisation de latérites, de calcretes (N>4) et de basaltes altérés

I_p = Indice de plasticité
 PM= Module de Plasticité ; PM = Module de plasticité = I_p x P_{0,425}
 n/s=Non spécifié

Source : Gourley et Greening, 1999.

Le I_p maximum de 6 % est spécifié pour les classes de trafic plus élevées et aussi pour les sous-niveaux plus faibles. Lorsque le climat est sec et que les dispositions de drainage (c'est-à-dire la hauteur de la couronne et les accotements étanches) sont satisfaisantes, comme indiqué au point 5.2.3, un IP plus élevé est souvent spécifié, allant jusqu'à 9-12%, et peut être utilisé. Les couches de fondation sont souvent classées sur la base de la résistance CBR à une densité de conception donnée (généralement 90 % à 95 % de la densité sèche maximale), comme indiqué dans le Tableau 3-7. Il convient de noter que dans certains pays, seules 3 ou 4 classes de couches de fondation sont définies.

Tableau 3-7: Exemple de définitions de classes inférieures

Classe de Sol support	Conception CBR (%)	Notes
S2	3 - 4	Peut être utilisé dans les remblais ne dépassant pas 2 m de hauteur.
S3	5 - 8	Peut être utilisé dans tous les remblais.
S4	9 - 14	Peut être utilisé dans tous les remblais.
S5	15 -29	Peut être utilisé dans tous les remblais et comme couche de forme sélectionnée : la couche de forme sélectionnée est généralement compactée à 95% compactage lourd.
S6	≥ 30 ans	Peut être utilisé dans tous les remblais et comme fondation si la couche supérieure de 150 mm ou la fondation est entièrement compactée à 95% de compactage lourd.

Source : Gourley et Greening, 1999

3.13.1 Exemples de spécifications pour les matériaux de revêtement en gravier latéritique d'Afrique de l'Est

Les spécifications spécifiques à des matériaux tels que les graviers latéritiques sont un exemple d'intégration de la compréhension du comportement de matériaux présentant certaines caractéristiques géologiques à des caractéristiques d'ingénierie. Les exigences relatives à la sélection et à l'utilisation des graviers latéritiques pour les bases, comme indiqué dans le Tableau 3-8, sont légèrement différentes de celles données pour les autres graviers naturels, comme indiqué ci-dessus. Un IP maximum de 9 % a été spécifié pour certains des niveaux de trafic plus élevés (0,3 - 0,5 MESA) et des sous-niveaux faibles (S2).

Tableau 3-8: Spécification s'il s'y est d'importantes matières de base de gravier latéritique en Afrique de l'Est

Classe de sol support (CBR)	Propriété	Limite de la classe de trafic de conception (MESA)				
		<TLC 0,01	TLC 0,1	TLC 0,3	TLC 0,5	TLC 1.0
S2 (3-4%)	Ip	<15	<12	<9	<9	<6
	Pm	<400	<150	<150	<120	<90
	Ge	B	B	Un	Un	Un
S3 (5-7%)	Pi	<18	<15	<12	<9	<6
	Pm	<550	<250	<180	<120	<90
	Ge	B	B	B	Un	Un
S4 (8-14%)	Pi	<20 ⁽¹⁾	<15	<15	<9	<9
	Pm	<800	<320	<300	<200	<90
	Ge	GM 1,6-2,6	B	B	B	Un
S5 (15-29%)	Pi	<25 ⁽¹⁾	<18	<15	<12	<9
	Pm	n/s	<400	<350	<250	<150
	Ge	GM 1,6-2,6	B	B	B	B
S6 (>30%)	Pi	<25 ⁽¹⁾	<20	<18	<15	<12
	Pm	n/s	<550	<400	<300	<180
	Ge	GM 1,6-2,6	B	B	B	Un

Notes :

1. Ip maximum = 8 x GM.
n/s = non spécifié.
Les accotements non revêtus sont assumés.
Ip = Indice de plasticité.

PM = Module de plasticité.
GE = Enveloppe de granulométrie.
GM = Module de granulométrie.

Source : Gourley et Greening, (1999). Plus de détails sur les latérites sont trouvés dans CIRIA (1988)

Pour les niveaux de trafic de conception supérieurs à 0,3 MESA, une exigence est fixée selon laquelle la limite de liquide doit être inférieure à 30 %. En dessous de ce niveau de trafic, cette exigence est réduite à une limite liquide inférieure à 35 %. Lorsque des accotements revêtue de plus d'un mètre de large sont spécifiés dans la conception, le module de plasticité maximum peut être augmenté de 40 %. Une densité minimale de 2 000 kg/m³ à sec compacté sur le terrain est requise pour ces matériaux.

D'autres traitements comprennent la modification des graviers en utilisant une faible teneur en chaux (environ 3 %) ou en ciment (environ 2 %). Il convient de noter que dans ce cas, le matériau se comporte toujours comme un matériau granulaire, contrairement à un matériau stabilisé dont la teneur en chaux ou en ciment est de l'ordre de 4 %. Toutefois, les graviers ainsi modifiés devraient être plus résistants et auront un IP réduit par rapport à leurs versions non liées et auront de meilleures performances.

Il est important d'évaluer toutes les options possibles afin d'utiliser les matériaux disponibles localement. Les options doivent ensuite être comparées à l'aide de l'analyse du coût du cycle de vie dont il est question plus loin dans le présent document. Il ne faut pas s'étonner que certaines options initialement coûteuses se révèlent avoir un coût du cycle de vie inférieur.

3.14 Spécification des matériaux pour la méthode de conception DCP-DN

La sélection des matériaux de revêtement à utiliser avec la méthode DCP-DN est basée sur la procédure suivante :

- (a) L'évaluation des matériaux de terrassement, de fondation et de chaussée sur la base de leur caractérisation telle que définie par des essais de matériaux pertinents en termes de granulométrie, de plasticité, d'inclusions délétères (par exemple organiques) ou d'autres propriétés spécifiques telles que le gonflement, l'érodabilité ou le potentiel d'effondrement.
- (b) La sélection des matériaux en termes d'acceptabilité pour un usage spécifique est alors basée sur un jugement lié à une combinaison de critères spécifiés alliés à un jugement d'ingénierie, en gardant à l'esprit la préférence pour une utilisation locale des matériaux sur les LVRR.
- (c) Une fois l'acceptabilité convenue, l'utilisation des procédures DCP-DN pour sélectionner et contrôler l'utilisation des matériaux qui ont été préalablement définis comme acceptables.

Les essais visant à déterminer les propriétés de durabilité du matériau sont effectués séparément de l'essai DCP-DN, sur la base d'essais de durabilité appropriés.

La principale spécification de l'évaluation de la résistance pour la méthode DCP-DN est la valeur DN (résistance à la pénétration mesurée en mm/souffle du DCP) d'un matériau destiné à être utilisé dans la chaussée. Les limites de l'indice de plasticité du matériau ne sont pas spécifiées pour la méthode DCP-DN. Néanmoins, des essais de limite d'Atterberg doivent être effectués pour tous les échantillons de matériaux afin de permettre à l'ingénieur concepteur de porter un jugement sur leur influence sur la performance attendue à long terme des matériaux. l'essai de distribution de la taille des particules est effectué et spécifié en termes de module de granulométrie (GM) ; la plage acceptable étant de 1 à 2,25.

En outre, la méthode met également l'accent sur deux facteurs critiques qui affectent les performances à long terme de la route :

- a) La nécessité de spécifier un niveau de densité aussi élevé que possible (appelé compactage au refus) en utilisant les rouleaux les plus lourds disponibles et le compactage à la teneur en humidité optimale (OMC). Cela permettra d'obtenir un matériau plus solide avec moins de vides et une perméabilité réduite, ce qui améliorera les propriétés globales du matériau. Le compactage jusqu'au refus (sans dégradation du matériau) est indiqué par le nombre de passages de rouleaux, établi par des essais de compactage, auquel aucune densité supplémentaire n'est obtenue pour un effort de compactage spécifique. Un compactage supplémentaire par la suite est une perte de temps et d'argent et peut entraîner la dégradation de particules individuelles du matériau.
- b) La nécessité de veiller à ce que la teneur en humidité de la voie extérieure de la route ne dépasse pas la MOC. Pour ce faire, il faudra accorder une attention particulière au drainage.

Bibliography

- Administracao Nacional de Estradas. (2016). *Manual for the Provision of Low Volume Roads*. Maputo, Mozambique.
- Austrroads. (2009). *Guide to Pavement Technology. Part 6, Unsealed Pavements*. Sydney, Australia.
- Austrroads. (2020). *Sustainable Roads Through Fit-for-purpose Use of Available Materials: Evaluation Tool and User Guide*. Austrroads Ltd, Sydney, Australia.
- Bloser, S., Creamer, D., Napper, C., Scheetz, B., Ziegler, T. (2012). *Environmentally Sensitive Road Maintenance Practices for Dirt and Gravel Roads*. SDTDC 1177 1802. National Technology and Development Program, US Department of Agriculture, Forest Service , San Dimas, CA. USA
- CIRIA. (1988). *Laterite in road pavements*. Charman J (Ed) Special Publication 47. Construction Industry Research and Information Association. UK.
- Cook, J. R., Petts, R.C., Tuan, P. G. (2010). *Effective use of construction material resources in the development of rural transport infrastructure in S. E. Asia*. IAEF, Conference, Auckland, New Zealand.
- Cook, J. R., Bishop, E.C., Gourley, C. S. & Elsworth, N. E. (2002). *Promoting the use of marginal materials*. DfID KaR Project. PR/INT/205/2001 R6887, TRL, Crowthorne, Berkshire, UK.
- Gourley, C. S. & Greening P. A. K. (1999). *Performances of low-volume sealed roads; results and recommendations from studies in southern Africa*. TRL Published Report PR/OSC/167/99.
- Hosking, J. R. and Tubey, L. W. (1969). *Research on low grade and unsound aggregates. RRL Report LR 293*. Ministry of Transport, Crowthorne, Berkshire.
- Intech-TRL. (2006). *SEACAP 1 Final Report*. DfID for Ministry of Transport, Vietnam.
- International Society of Rock Mechanics (ISRM). (1981). *Rock Characterisation, Testing and Monitoring Suggested Methods*, (ed. E.T.Brown) Pergamon Press.
- Keller, G.; Wilson-Musser, S.; Bolander, P.; Barandino, V. (2011). *Stabilization and rehabilitation measures for low-volume forest roads*. 1177-1801-SDTDC. San Dimas, CA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, San Dimas Technology and Development Center. p.333.
- MILLARD, R. S. (1993). *Roadmaking in the tropics: materials and methods. Transport Research Laboratory State of the Art Review*. Her Majesty's Stationery Office, London.
- Ministry of Transport and Public Works, Malawi. (2019). *Low Volume Roads Manual. Volume 1: Pavement Design*.
- OTB Engineering, (2010). *Development and dissemination of a low cost road surfacing and pavement guideline document*. Phase 1 Report. gTKP ref 09/RR/07
- Petts, R.C. (2007). *Rationale for the compilation of intermediate guidelines for low cost sustainable road surfacing*. LCS Working Paper 1 (3rd Edition)
- SADC. (2003). *Low volume sealed roads guideline. Chapter 5: Pavement design, material and surfacing*. SADC-SATCC.
- Sampson, L. & Roux, P. L. (1987). *The Durability Mill Test for the assessment of unstabilised aggregates*. NITRR, CSIR Report RP/31.
- Smith, M. R. & Collis, L. (eds). (1993). *Aggregates - Sand Gravel and Crushed Rock Aggregates for Construction Purposes*. Geological Society Engineering Geology Special Publication No 9. (2nd Edition) Published by the Geological Society London.
- TRL-OTB-LTEC. (2009). *Low volume rural road environmentally optimised design manual*. For DfID and MPWT Lao PDR.
- Yoder, E. J. and Witczak, M. W. *Principles of Pavement Design*. John Wiley & Sons, New York, USA.

4 LES PRINCIPALES MÉTHODES DE CONCEPTION STRUCTURELLE DES CHAUSSÉES POUR LES LVRS

4.1 Contexte et portée

Des méthodes de conception des chaussées ont été développées et publiées par de nombreux auteurs. Pour un ensemble de conditions spécifiques, les différentes méthodes ne donnent pas les mêmes solutions. En particulier, et surtout, il existe des différences majeures qui sont à l'origine des différentes solutions et qui ont conduit à un certain élément de confusion et d'incertitude chez les concepteurs de routes concernant la méthode à choisir et la manière de l'utiliser. Bien qu'elles soient examinées en détail dans la présente note de route, il est utile de résumer ici ces différences et similitudes majeures sous la forme d'une brève introduction avant d'en examiner les conséquences.

L'objectif de ce chapitre est de fournir les informations de base sur six méthodes de conception des chaussées (la méthode AASHTO, la méthode ORN 31, la méthode TRL-SADC, la méthode Foundation Class, la méthode ORN 18 DCP-CBR et la méthode DCP-DN) actuellement incorporées dans un certain nombre de manuels LVR. Au préalable, le processus d'élaboration d'une méthode de conception des chaussées en général est décrit, suivi d'une description des origines de chacune d'entre elles, afin que l'on puisse apprécier les éventuelles limites de leur utilisation.

Il convient de noter que les méthodes examinées ici ont été développées de manière empirique et doivent donc être utilisées dans les limites des matériaux, de la circulation et du climat (plus particulièrement des précipitations) qui ont été rencontrés au cours de leur développement. Il est recommandé aux chercheurs et aux ingénieurs d'affiner ces méthodes et d'en étendre les limites par des recherches fondées sur des preuves dans le pays.

4.2 Élaboration des abaques de conception

4.2.1 Tâche

L'objectif du revêtement routier est simplement de fournir une surface de roulement de bonne qualité pour les véhicules, car le sol normal est trop faible pour supporter le trafic. En outre, le revêtement doit offrir une solution de surface rentable et durer de nombreuses années (idéalement 15 à 25 ans). La chaussée doit donc être suffisamment épaisse et résistante pour durer et pour protéger le sol de fondation contre toute défaillance. Dans le même temps, les couches de revêtement elles-mêmes ne doivent pas se détériorer. La conception d'une chaussée exige donc une résistance suffisante des couches de revêtement et une épaisseur suffisante pour protéger le sol de fondation. La conception structurelle d'une route dépend et nécessite quatre paramètres principaux, à savoir :

- 1) Niveau de trafic (volume et charges par essieu). Il s'agit d'une mesure des contraintes et des déformations que la route doit supporter.
- 2) La résistance du sous-sol.
- 3) La résistance des couches de la chaussée.
- 4) Épaisseur des couches de la chaussée.

Bien entendu, ces éléments dépendent d'autres facteurs, mais si le niveau de trafic et la résistance du sol sont connus, il est facile de présenter les conceptions structurelles pour chaque type de chaussée sous la forme d'un abaque de structures comprenant une matrice avec les classes de trafic comme un élément et la résistance du sol comme l'autre élément. Cela peut être reproduit pour des matériaux de revêtement de différentes résistances afin de couvrir une gamme de matériaux disponibles. C'est ainsi que sont présentées la plupart des méthodes de conception dérivées expérimentalement.

En général, lorsque le niveau de trafic augmente, l'épaisseur et parfois la résistance des couches de la chaussée augmentent. C'était du moins le cas auparavant, mais il est maintenant établi qu'une fois que les contraintes et les déformations dans les couches de la chaussée sont réduites en dessous des niveaux critiques, les couches n'ont pas besoin d'augmenter en résistance ou en épaisseur. C'est le principe de la

chaussée "longue durée" décrit par Nunn et al. (1997), mais il est appliqué à des épaisseurs et des résistances bien plus importantes que celles requises pour les LVR.

La majorité des méthodes de conception et des tableaux de conception associés sont basés sur les résultats d'études empiriques dans lesquelles la performance d'un certain nombre de routes a été suivie pendant un certain temps et leur performance analysée afin de déterminer des conceptions fiables pour la gamme de conditions incluses dans les études. De nombreuses méthodes de conception utilisées aujourd'hui sont plus ou moins basées sur l'essai sur route de l'AASHO qui a eu lieu aux États-Unis en 1960. Cela s'explique notamment par le fait qu'un certain nombre de concepts développés dans cette étude sont toujours d'actualité aujourd'hui. L'essai sur route s'est déroulé en un seul endroit aux États-Unis, sur une seule couche de fondation et dans un seul climat. Il existe donc certaines limites à son utilisation et des différences quant à la manière dont il a été adapté et étendu à différentes conditions et situations. Néanmoins, il existe certains principes fondamentaux qui sont pertinents.

Lorsque l'on étudie les performances des routes pour améliorer les conceptions, il est essentiel d'examiner les raisons de la défaillance ou des mauvaises performances, car toute amélioration nécessaire dépend de manière critique de ce qui n'est pas satisfaisant. Malheureusement, un tel processus de diagnostic n'est pas aussi simple qu'il n'y paraît à première vue. Les matériaux des revêtements routiers sont notoirement variables, et de nombreux autres facteurs entrent en jeu pour affecter leurs performances. Ainsi, une mauvaise performance a souvent été attribuée à un défaut de protection de la couche de fondation et, par conséquent, les conceptions d'épaisseur ont eu tendance à dériver vers le haut.

L'une des principales exigences pour l'élaboration des abaques de conception est une méthode permettant de comparer les chaussées de différentes épaisseurs et résistances de couche les unes avec les autres afin de déterminer leurs capacités de transport du trafic. Une telle méthode est également essentielle car dans les études empiriques sur les performances des routes sur lesquelles sont basés les abaques de conception, il est impossible d'inclure chaque résistance de la couche de fondation et chaque conception structurelle potentielle ; il est donc vital de pouvoir interpoler entre les conceptions des structures dont les performances se sont avérées acceptables pour leur ensemble de conditions spécifiques. Le concept de nombre structurel initialement développé lors de l'essai routier de l'AASHO est souvent à la base de ceci.

4.2.2 Validité des abaques de conception

Un principe important de la méthode scientifique expérimentale qui sous-tend l'élaboration de toute méthode de conception et des abaques de conception qui en résultent est que les résultats ne sont strictement applicables que dans la limite des données expérimentales sur lesquelles chacun est basé. L'extrapolation à des conditions qui n'ont pas été incluses dans la conception de l'étude expérimentale est extrêmement dangereuse (et représente une mauvaise science). Néanmoins, il est possible de mettre au point une méthode de conception réussie qui soit configurée pour permettre un calibrage à une gamme plus large de conditions, mais un tel processus nécessite essentiellement des études empiriques supplémentaires.

Bien que la validité d'une méthode soit limitée à la gamme de conditions dans lesquelles elle a été développée, les limites de cette gamme ne sont jamais précises et il est inévitable qu'un concepteur soit obligé de fournir un plan pour des conditions qui ne sont pas toutes entièrement dans la gamme de celles de l'étude originale. Certaines de ces conditions sont beaucoup plus importantes que d'autres en termes de contrôle des performances de la route, mais il existe une zone d'incertitude où les facteurs moins importants ne jouent qu'un rôle marginal et où un bon jugement technique et le bon sens peuvent être nécessaires pour prendre une décision de conception. Le danger ici est que si plus d'un facteur marginal est présent en même temps, la combinaison pourrait être malheureuse. De telles incertitudes représentent des risques que le concepteur doit prendre en considération. C'est pour ces raisons que pour définir les limites de chacune des méthodes, la gamme des variables des études est indiquée dans les sections 4.4 à 4.8, où chacune des méthodes de conception est présentée. Les limites les plus importantes sont également mises en évidence.

La plupart des études de conception technique comportent également des facteurs de risque liés à l'incertitude quant à la capacité de prédire les événements futurs. Les méthodes de conception prévoient différentes façons de réduire les risques. Ces méthodes sont également examinées et résumées au Chapitre 5.

4.2.3 Conception de l'épaisseur

Le premier point, et le plus important, est que chaque méthode doit être utilisée de la manière prévue par les développeurs. Malheureusement, cela n'est pas toujours clair, ce qui a pour conséquence que les méthodes peuvent facilement être utilisées de manière incorrecte. Par exemple, si le pire des cas d'humidité ne signifie pas nécessairement que le sol est trempé, mais que de nombreux concepteurs basent la résistance du sol sur des conditions de trempage, alors que le pire des cas peut être plus sec que le trempage et parfois beaucoup plus sec. Une façon d'éviter ce problème est de faire en sorte que l'analyse des données sources utilisées par les auteurs pour développer leur méthode de conception soit connue et comprise par l'ingénieur concepteur. Toutefois, il n'est pas raisonnable d'attendre du concepteur de la route qu'il étudie les recherches sur lesquelles repose la méthode de conception et il devrait donc incomber aux auteurs de fournir des informations suffisantes pour satisfaire le concepteur de la route. Les méthodes utilisées et les conceptions produites doivent être prudentes et rentables, mais un certain conservatisme est justifié étant donné la variabilité des climats actuels et les incertitudes que la variabilité du changement climatique produit.

Cette note sur les routes rurales guidera le lecteur à travers les méthodes pour s'assurer que chaque méthode est utilisée comme les auteurs l'ont souhaité.

4.2.4 Matériaux

Toutes les méthodes conçues pour les LVRR tentent d'utiliser des matériaux disponibles localement dont les coûts de transport et de traitement seront faibles. La sélection et l'utilisation de matériaux adaptés aux normes des routes à faible trafic sont examinées au chapitre 3 (Sélection des matériaux pour les LVR) et au chapitre 6 (Conception des routes non revêtues) pour les routes non revêtues.

4.2.5 Méthodes de mesure et d'analyse des données

Les données d'entrée requises pour toute méthode de conception des chaussées sont bien connues en termes généraux. Il s'agit principalement :

- 1) La période de conception et la façon dont elle est définie. Bien qu'il existe de nombreuses façons de l'évaluer, la même approche peut être appliquée à toute méthode de conception des chaussées.
- 2) Informations sur le trafic prévu ; nombre et types de véhicules, leur chargement, etc. De même, bien qu'il existe de nombreuses façons d'évaluer ces informations, la même approche peut être appliquée à toute méthode de conception de la chaussée.
- 3) Détails concernant les propriétés des matériaux disponibles pour la construction, en particulier le support et la base de la route.
- 4) Sélection des matériaux, y compris la couche de surface.

Malgré l'apparente simplicité de ces éléments, il existe différentes méthodes pour obtenir les informations requises et chacune peut influencer les valeurs obtenues pour la conception de la chaussée et, par la suite, la conception finale.

Le plus important est que les choix faits par le concepteur sont influencés de manière critique par les risques perçus et les risques considérés comme raisonnables et donc acceptables.

4.3 Décisions clés

De nombreuses décisions doivent être prises lors de la conception d'un LVR, mais il n'y en a en fait que très peu lors de la conception structurelle, comme le montre le Tableau 4-1 suivant.

Tableau 4-1: Décisions clés requises pour la conception structurale

Décision		Commentaires
1	Quel type de route construire ou reconstruire	La plupart du temps, ce sera un choix entre une route non revêtue ou de terre ou une route revêtue avec un revêtement bitumineux mince. Une telle décision est habituellement prise à l'étape de la planification (Source : Cook <i>et al</i> 2013 - voir référence au chapitre 6. mais les considérations économiques, telles que décrites au chapitre 8, sont peut-être les facteurs les plus importants. Plus d'indications sur la sélection entre les options revêtues et non revêtues est donnée dans Cook <i>et al.</i> (2013).
2	Les étapes suivantes et les décisions connexes sont nécessaires pour une route revêtue. Celles-ci diffèrent entre les différentes méthodes de conception et sont essentiellement les seules différences réelles entre les méthodes.	
2.1	Déterminez ou sélectionnez la résistance de sol support pour la conception.	Il s'agit d'une différence majeure entre les méthodes et c'est là que le concepteur devra exercer son jugement sur le risque.
2.2	Déterminer la résistance (spécifications) des couches de chaussée et décider si les matériaux à moindre coût seront adéquats. Une série d'essais de matériaux doit être mise en œuvre comme décrit dans les méthodes.	Vérifiez que ce matériaux est disponible.
2.3	Vérifiez si une nouvelle réduction des spécifications est viable	(p. ex. pour des conditions de drainage supérieures à la moyenne)
2.4	Déterminer l'épaisseur de chaque couche	À ce stade, il ne s'agira que d'un abaque de recherche qui sera évidemment différent pour certaines des méthodes et ces différences doivent être expliquées

4.3.1 Risque

Le risque est un aspect nécessaire mais non désiré du génie civil qui est abordé de différentes manières dans les diverses méthodes de conception structurale des chaussées et qui est souvent la cause d'incertitude pour les concepteurs. La méthode de traitement du risque pour les structures de drainage telles que les pontons et les ponts consiste à baser les conceptions sur la probabilité d'un événement pluvial spécifique. Pour les structures relativement grandes telles que les ponts, la défaillance est très coûteuse et des conceptions très sûres sont donc choisies pour résister aux tempêtes violentes les plus rares (par exemple, la tempête de 1 sur 100 ans, c'est-à-dire une tempête dont la probabilité de survenue n'est que de 1 % par an). Pour les petites structures dont la réparation ou le remplacement sont relativement peu coûteux (par exemple les petits pontons), on utilise la tempête 1 sur 20 ou 25 ans (4 ou 5 % de probabilité de se produire au cours d'une année) pour la conception.

Pour les structures de chaussée, peu de méthodes de conception définissent réellement les niveaux de risque qu'elles prennent en compte, même si elles sont idéalement conçues pour une durée de vie de 15 à 25 ans. Les concepteurs de routes sont bien conscients du fait qu'au cours de la durée de vie d'une route typique, il est probable qu'il y ait certaines gravités de tempête et des niveaux de risque variables car, par exemple, l'entretien idéal pour garder les pontons et les fossés de drainage dégagés et pour remédier à l'érosion et aux dommages de surface ne peut être garanti. Par conséquent, les concepteurs n'ayant pas accès à une quantification facile des risques, ils sont souvent tentés de se placer du côté de la sécurité. Pour ce faire, les concepteurs doivent toutefois comprendre comment leurs plans ont été conçus. Dans les sections qui suivent, elles sont décrites pour aider le concepteur à comprendre l'élément de risque et à en tenir compte.

4.3.2 Anomalies et incohérences

Il existe également des anomalies et des incohérences dans certaines des méthodes, qui sont souvent dues à des données originales inadéquates et parfois à des désaccords techniques entre experts.

L'objectif de cette note de route est de guider l'utilisateur à travers toutes ces questions :

- Rappeler aux utilisateurs les principales caractéristiques des principales méthodes de conception des LVRR,
- Veiller à ce que les méthodes soient utilisées conformément aux intentions des auteurs,
- Mettre en évidence les divergences et les incertitudes techniques qui contribuent au risque et qui nécessitent le jugement technique du concepteur.

Le chapitre présente également les contextes d'utilisation, les risques et les limites dont le concepteur doit être conscient lorsqu'il utilise les différentes méthodes.

4.4 La méthode AASHTO

4.4.1 Contexte

L'essai routier de l'AASHTO, sur lequel la méthode de conception des chaussées de l'AASHTO était à l'origine basée, consistait en six boucles à deux voies. Chaque voie était soumise à des charges répétées par un type de véhicule et un poids spécifique. La structure de la chaussée dans chaque boucle a été modifiée afin de pouvoir étudier l'interaction entre les charges des véhicules et la structure de la chaussée. Les résultats de l'essai sur route ont été utilisés pour élaborer un guide de conception de la chaussée, publié pour la première fois en 1961, avec des mises à jour importantes en 1972 et 1993 (AASHTO 1993). Un résumé des caractéristiques de l'essai est présenté dans le Tableau 4-2. La version de 1993 est toujours largement utilisée aux États-Unis et dans de nombreux autres pays, dont certains en Asie et en Asie du Sud-Est. Un nouveau guide, dont la publication est initialement prévue pour 2002, est le premier guide de l'AASHTO sur la conception des chaussées qui n'est pas principalement basé sur les résultats de l'essai routier de l'AASHTO.

Des "études par satellite" étaient prévues dans d'autres régions des États-Unis afin d'étudier les effets du climat et du sous-sol, mais elles n'ont malheureusement jamais été réalisées. Malgré cette limitation, l'essai routier a conduit à plusieurs concepts importants qui sont utilisés dans d'autres méthodes de conception, mais il y a aussi plusieurs limites.

Tableau 4-2: Résumé des caractéristiques de l'essai routier de l'AASHTO

Variable	Gammes	Remarque
Chargement total du trafic (répétitions de charge d'essieu)	1,114,000	Notez qu'il ne s'agit pas d'ESA. Les gammes de charge d'essieu étaient 2-48 Kips
Précipitations (mm/an)	860	65 mm se produit sous forme de neige
Nombre de sections (chaussée flexible)	468	
Nombre de sections (chaussée rigide)	368	
Période d'étude (années)	2	Cela peut donc être considéré comme une charge accélérée
Âge des sections (années)	2-4	

Matériaux	Enrobé, calcaire dolomite concassé, gravier de sable, gravier de sable traité au ciment, béton de ciment	
CBR du sol support (%)	2-4	Le matériaux est la classification A-6. Couches de plafonnement et fondations traitées comme d'autres classes de sol support pendant l'analyse

Compilé à partir de : Highway Research Board (1962).

4.4.2 Champ d'application et concepts

La méthode AASHTO est essentiellement une méthode basée sur l'essai du California Bearing Ratio (CBR), comme le sont de nombreuses méthodes utilisées aujourd'hui. L'essai CBR est utilisé pour quantifier la résistance du sol de fondation et également la résistance de toute couche de chaussée non liée dans la conception proposée. Sur cette base, un numéro de structure (SN) de la chaussée nécessaire pour protéger la chaussée contre la charge de trafic estimée est calculé. Le numéro de structure est ensuite converti en caractéristiques des matériaux et en épaisseur des couches.

L'essai routier a consisté en 468 sections d'essai de revêtements souples et 368 sections de revêtements rigides qui ont été soumises à la circulation pendant environ deux ans. La mesure combinée finale de l'état d'une route a été appelée l'indice d'aptitude au service actuel (PSI), qui va d'un maximum de 5 pour une nouvelle route à 2,0 ou 2,5 lorsque la route a atteint un mauvais état de surface. Cette détérioration de la chaussée était corrélée à la rugosité de la surface de la route, à l'importance des fissures de surface et à la profondeur des ornières dans le passage des roues.

L'importance des dommages causés à la route par les différentes charges par essieu était essentiellement une petite diminution de la valeur du PSI et dépendait de la loi exponentielle suivante :

Dommage = $(L/8.2)^4$ qui n'identifie que le rapport des dommages causés par un essieu de charge L tonnes avec une charge standard de 8,2 tonnes par essieu.

L'exposant de 4 diffère légèrement selon les chaussées et les configurations d'essieux, mais 4,0 ou 4,5 sont les plus couramment utilisés et la charge du trafic est presque universellement quantifiée en termes d'équivalents cumulés d'essieux standard sur la durée de vie de la route (ESA).

Enfin, l'essai sur route n'a pas été conçu pour les LVR, bien que des sections de routes revêtues d'un mince joint bitumineux aient été incluses. Les limites de la méthode sont que l'essai routier s'est déroulé en un seul endroit et donc dans un seul climat et sur une seule couche de fondation, et que les études "par satellite" conçues pour permettre d'étudier les variations en fonction du climat et de la résistance de la couche de fondation n'ont jamais été réalisées. Diverses techniques ont été utilisées pour remédier à ces problèmes, mais elles se résument à l'étalonnage de l'équation de base de la conception.

La méthode est décrite plus en détail au Chapitre 5.

Le problème de cette méthode est qu'elle ne permet pas à elle seule d'identifier la cause de la détérioration ou de déterminer si une épaisseur supplémentaire de la chaussée est la bonne solution pour une conception améliorée avec une durée de vie utile plus longue, ou encore où, dans la chaussée, la résistance pourrait devoir être améliorée tant que la SN est atteinte.

4.5 La méthode du TRL Overseas Road Note 31

La méthode TRL ORN 31 actuelle a évolué à partir d'une première note sur les routes d'outre-mer publiée en 1962, puis d'une deuxième édition publiée en 1966, basée sur des recherches menées en Afrique de l'Est sur la conception des LVR et sur la teneur en humidité sous les surfaces revêtues/asphaltées des routes et des aéroports. Ce manuel s'est avéré très utile à l'époque et une troisième édition a été publiée en 1977, sur

la base de recherches supplémentaires en Afrique de l'Est qui ont fourni les données et l'analyse de l'étude qui a produit le Modèle d'investissement dans le transport routier (RTIM) qui était une première version du Modèle des normes de conception et d'entretien des routes de la Banque mondiale, HDM. Les principes impliqués ont ensuite été étendus à l'étude principale de HDM au Brésil, dans laquelle les fourchettes de la variable sont indiquées dans le Tableau 4-3.

L'édition actuelle de la note sur les routes d'outre-mer a étendu les conceptions à différentes structures et jusqu'à 30 MESA dans le trafic, mais ses racines se trouvent dans les versions précédentes basées sur les LVR.

Les paramètres les plus critiques sont mis en évidence en italique et la méthode ne doit être utilisée avec prudence que si le concepteur doit utiliser la méthode en dehors des plages des variables indiquées.

Il s'agit d'une méthode basée sur les CBR, similaire à bien des égards à la méthode AASHTO en ce sens que les spécifications CBR sont utilisées pour les couches de chaussée non liées et pour l'évaluation de la résistance de la couche de fondation pour la conception structurelle.

Tableau 4-3: 4Résumé des caractéristiques des routes étudiées (ORN 31)

Variable	Kenya	Brésil
Total MESA	0.004-3.3	0.003-18
Précipitations (mm/an)	400-2000	1200-2000
Nombre de sections	49	116
Période d'étude (années)	4	3-5
Âge des sections (années)	0-14	0-24
Véhicules/jour	323-1618	75-5600
Nombre Structural modifié	2.5-5.1	1.5 -7.0
Rugosité (IRI)	2.9-6.0	1.8-10.2

Compilé à partir de: Paterson (1987)

4.6 La méthode Foundation Class

En outre, les recherches menées au Kenya par Courteille et Serfass ont également conduit à une méthode de conception basée sur la CBR qui est très similaire en principe à l'ORN 31 mais avec une procédure légèrement différente basée sur la conception de fondations communes à toutes les structures sur la même plate-forme. Cette méthode est appelée ici méthode de la classe de fondation. La méthode de la classe de fondation fournit une méthode logique de conception des couches de support, c'est-à-dire des couches de fondation sélectionnées (recouvrement) et des fondations qui produisent seulement quatre (en fait cinq, mais une est rarement nécessaire) fondations qui sont les mêmes pour tous les niveaux de trafic au lieu de la gamme plutôt diverse de couches inférieures que l'on trouve dans la plupart des abaques de conception. Cela offre une excellente opportunité pour un meilleur contrôle de la qualité et donc une performance globale potentiellement meilleure. Les données sont basées sur des études menées au Kenya, notamment les études TRL qui ont également fourni des données pour l'ORN 31, mais aussi sur l'expérience kenyane qui a conduit aux nouvelles conceptions (MoTIHUD, 2017) publiées en tant que résultat du programme ReCAP. La méthode est similaire à celle utilisée pour la conception des chaussées au Royaume-Uni (Highways Agency, 2009) et en France.

4.7 La méthode TRL-SADC

C'est ce que l'on appelle communément la méthode Gourley - Greening. Cette étude décrit une méthode de conception qui est très similaire aux deux décrites ci-dessus en principe, mais la manière de sélectionner la résistance du sol pour la conception et la manière dont les données de performance ont été analysées étaient différentes et, par conséquent, la méthode d'utilisation est différente. L'étude a impliqué le suivi des performances à long terme de 59 sections d'essai au Botswana, au Zimbabwe et au Malawi. Les fourchettes des variables sont indiquées dans le Tableau 4-4. Les résultats ont indiqué que les performances étaient meilleures que celles prévues à l'aide de l'ORN 31 et des abaques de conception ont été produits, dans lesquels un certain nombre d'aspects des spécifications ont été modifiés dans des conditions appropriées.

Tableau 4-5: Résumé des caractéristiques des routes étudiées (TRL-SADC)

Variable	Zimbabwe	Malawi	Botswana
Période d'étude (années)	4	4	4
Nombre de sections	33	16	10
Résistance du sol support (CBR)	10- >30 (S3-S6)	4->30 (S2-S6)	6-24 (S3-S6)
Résistance de la couche de base Min/max (CBR)	15->100	25->100	30-95
Matériaux de fondation et de base	Gravier de quartz, gravier latéritique, graviers mélangés, roche altérée, calcrete, sable du Kalahari, gravier ferrugineux.	Gravier de quartz, gravier latéritique, roche altérée, gravier ferrugineux, pierre concassée.	Calcrete, sable du Kalahari, basalte altéré, sable calcaire, pierre concassée.
Total MESA	0.003-0.04	0.032-1.2	0.2-0.3
Précipitations (mm/an)	400-1400 Weinert Numéro (2-5)	1000-1700 Nombre Weinert (<1-2)	300-500 Weinert Nombre (4-5)
Âge de la chaussée (années)	3-35	13-27	8-14
Âge de surface avant le rescelllement (années)	2-29	8-28	2-15

Compilé à partir de: Gourley et Greening (1999).

4.8 Le TRL Overseas Road Note 18 Méthode DCP-CBR

Cette méthode est essentiellement la même que la méthode TRL Overseas Road Note 31, sauf que, pour mettre au point une méthode statistiquement correcte d'amélioration d'une route ou d'une piste existante, il fallait concevoir une méthode permettant de quantifier la déficience structurelle de la route ou de la piste existante afin de pouvoir élaborer une stratégie de réhabilitation ou d'amélioration rentable. La méthode est basée sur l'une des méthodes décrites dans le manuel de conception des chaussées de l'AASHTO et est incluse dans le logiciel d'analyse TRL DCP et décrite au Chapitre 5.

4.9 La méthode DCP-DN

La méthode DCP-DN représente une approche différente dans la mesure où l'essai CBR, qui est une caractéristique essentielle des quatre premières méthodes, n'est pas du tout utilisé. Alors que dans la méthode DCP-CBR, les mesures DCP sont converties en valeurs CBR à l'aide d'équations de corrélation, la méthode DCP-DN ne convertit pas la résistance à la pénétration (exprimée en millimètres de pénétration par coup) et utilise plutôt la résistance directement pour entreprendre la conception de la chaussée. La méthode de conception du DCP-DN est de nature empirique et les résultats sont actuellement basés sur des mesures et des observations sur une série de types de sols et de conditions environnementales prévalant en République d'Afrique du Sud. Dans la plupart des régions de la République d'Afrique du Sud, les précipitations ne dépassent pas 1 000 mm/an. Afin d'adapter la méthode aux régions où les précipitations sont plus

importantes et à d'autres variables spécifiques à chaque pays, un certain nombre de sections d'essai ont été construites dans différents pays d'Afrique. Certaines de ces sections d'essai font l'objet d'un suivi afin de fournir des résultats supplémentaires pour l'adoption de la méthode. Les paramètres de l'étude de la République d'Afrique du Sud utilisés dans l'élaboration de la méthode sont présentés dans le Tableau 4-5.

Tableau 4-6: Résumé des caractéristiques de l'étude de Transvaal (méthode DCP-DN)

Variable	Gamme
Longueur hors route étudiée	750 km
Nombre de fosses d'essai et de mesures DCP	1100
Précipitations (mm/an)	300 – 1200
Âge des routes	6 à 45 ans
Plage de trafic (ESA)	0,04 – 20x10 ⁶
Véhicules/jour	Typiquement < 500

Compilé à partir de: Paige-Green et van Zyl (2019).

Bibliography

American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). 1993. ***AASHTO guidelines for design of pavement structures***. American Association of State Highway and Transportation Officials. Washington, DC

Courteille, G., and Serfass, J. P. (n.d.). ***Survey of Subgrade Conditions in Kenya and their Influence on Pavement Performance. Report 345***. Nairobi: Ministry of Works Materials Branch.

Gourley, C. S. and Greening, P. A. K. (1999). ***Performance of low volume sealed roads: results and recommendations from studies in Southern Africa***. TRL Project Report PR/OSC/167/99. Project Record 6020. Transport Research Laboratory, Crowthorne. UK.

Highways Agency. (2009). ***Interim Advice Note 73/06 Revision 1: Design Guidance for Road Pavement Foundations (Draft HD25)***. London, UK: Highways Agency.

Highway Research Board. (1962). ***The AASHO Road Test, Report 7. Summary Report***. Highway Research Board Special Report No 61G. Washington, DC, (National Research Council

Kleyn, E. G. and Savage, P.V. (1981). ***The application of the pavement DCP to determine the bearing properties and performance of road pavements***. Proceedings of the International Symposium on Bearing Capacity of Roads and Airfields, Trondheim, Norway.

Ministry of Transport Housing and Urban Development Kenya (MoTIHUD). (2017). ***Pavement Design Guideline for Low Volume Sealed Roads***. Nairobi, Kenya.

Nunn, M., Brown A., Weston, D., and Nicholls, J. C. (1997). ***Design of long-life flexible pavements for heavy traffic***. TRL Report 250. Transport Research Laboratory, Crowthorne, UK.

Paige-Green, P. and van Zyl, G.D. (2019). ***A Review of the DCP-DN Pavement Design Method for Low Volume Sealed Roads: Development and Applications***. Journal of Transportation Technologies, 9, 397-422.

<https://doi.org/10.4236/jtts.2019.94025>.

Paterson, W. D. O. (1987). ***Road deterioration and maintenance effects: models for planning and management***. The Highway Design and Maintenance Standards Series, Washington DC: The World Bank.

Transport Research Laboratory (1993). ***Overseas Road Note 31. A guide to the structural design of bitumen-surfaced roads in tropical and sub-tropical climates***. Overseas Centre, TRL, Crowthorne, Berkshire, UK. (4th edition).

Transport Research Laboratory (1999). ***Overseas Road Note 18. A guide to the pavement evaluation and maintenance of bitumen-surfaced roads in tropical and sub-tropical countries***. TRL Limited, Crowthorne, UK.

Design of Low Volume Roads Using the DCP-DN Method. (To be published in 2021).

5 MÉTHODES DE CONCEPTION POUR LES ROUTES REVÊTUES

5.1 Objectif et Portée

L'objectif de ce chapitre est de fournir des conseils sur les principales étapes suivies dans la conception des chaussées LVRR en utilisant les méthodes basées sur la CBR et la DCP contenues dans de nombreux manuels de conception. L'ensemble de ces méthodes constitue six méthodes, à savoir La méthode AASHTO, la méthode ORN 31, la méthode TRL-SADC, la méthode Foundation Class, la méthode DCP Overseas Road Note 18 et la méthode DCP-DN. D'autres méthodes sont abordées dans ce chapitre : Les méthodes empiriques pures telles que les chaussées à éléments modulaires, les chaussées Macadam et Telford ; et les chaussées rigides. Un certain nombre de pays disposeront de méthodes de conception qui ne seront peut-être pas incluses ici, mais il est probable que les méthodes seront similaires dans leur approche à au moins une des méthodes présentées ici. Le chapitre présente en outre les contextes d'utilisation, les risques et les limites dont le concepteur doit être conscient lorsqu'il utilise les différentes méthodes.

Pour la plupart des méthodes de conception, il est généralement plus simple de concevoir une route entièrement nouvelle que de moderniser une route existante qui nécessite une réhabilitation et une amélioration. En effet, il n'y a pas de couches de revêtement structurelles existantes qui doivent être utilisées dans la nouvelle structure. Dans le cas le plus simple, seules les propriétés de la couche de fondation sont nécessaires, car les conceptions structurelles sont alors obtenues directement à partir d'un abaque de structures.

Les méthodes sont classées et discutées dans l'ordre suivant :

- A Méthodes basées sur la CBR
 - 1) La méthode de conception AASHTO
 - 2) La méthode TRL Overseas Road Note 31
 - 3) La méthode TRL-SADC
 - 4) La méthode Foundation Class
- B Méthodes basées sur le DCP
 - 5) La méthode DCP-CBR du TRL Overseas Road Note 18
 - 6) La méthode DCP-DN.

D'autres méthodes sont brièvement décrites dans ce chapitre : les méthodes empiriques pures, telles que les chaussées à éléments modulaires, les chaussées Macadam et Telford, et les chaussées en béton.

5.2 Méthodes basées sur le CBR

Les méthodes basées sur la CBR reposent sur la détermination des valeurs CBR de laboratoire de la couche de fondation et/ou des autres couches de la chaussée. Le CBR peut être utilisé directement ou il est converti en un module d'élasticité comme c'est le cas de la méthode AASHTO, ou converti en un coefficient de matériau, ou converti en un numéro de fondation, pour la détermination de l'épaisseur et des matériaux de revêtement requis.

5.2.1 La méthode de conception AASHTO

5.2.1.1 Nombre structural

Le concept de numéro de structure a été introduit pour la première fois à la suite de l'essai routier de l'AASHTO comme mesure de la résistance globale de la chaussée. Il s'agit essentiellement d'une mesure de l'épaisseur totale de la chaussée, chaque couche étant pondérée par un facteur (généralement appelé coefficient "a") pour chaque matériau (Tableau 5-1) en fonction de sa résistance, comme suit :

$$SN = 0.0394 \sum a_i \cdot h_i \cdot m_i$$

Equation 5-1

Où :

- SN = Nombre structural de la chaussée,
- a_i = Coefficient structural de la $i^{\text{ème}}$ couche,
- h_i = Epaisseur de la $i^{\text{ème}}$ couche, en millimètre,
- m_i = coefficient de drainage de la couche "i" pour le calibrage en fonction des différentes conditions environnementales.

Et la sommation porte sur le nombre de couches de chaussée, n

Les coefficients de résistance de chaque couche (Tableau 5-1) sont déterminés à partir des essais normaux qui sont utilisés pour définir la résistance du matériau en question, par exemple.

- 1) CBR pour les matériaux granulaires non liés,
- 2) La résistance à la compression non confinée (UCS) pour les matériaux légèrement cimentés, et
- 3) Stabilité pour les matériaux liés au bitume.

Les coefficients sont modifiés à l'aide des coefficients "m" pour tenir compte de la détérioration ou de l'affaiblissement des matériaux causés par les effets de l'environnement, par exemple, une teneur en humidité élevée dans les matériaux non liés en raison d'un mauvais drainage et des conditions de température élevée affectant les matériaux bitumineux. Ces facteurs de modification ou de drainage (désignés par "m") sont essentiellement des facteurs de calibrage pour des conditions climatiques plus ou moins sévères. Ils ont été introduits pour remplacer le facteur de calibrage global régional R qui était utilisé dans les versions précédentes de la méthode de conception.

L'équation d AASHTO est :

$$\log_{10}(W_{18}) = Z_R \times S_0 + 9.36 \times \log_{10}(SN + 1) - 0.20 + \frac{\log_{10}\left(\frac{\Delta PSI}{4.2 - 1.5}\right)}{0.40 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5.19}}} + 2.32 \times \log_{10}(M_R) - 8.07$$

Où :

SN = Nombre structural requis pouce

W_{18} = 18 kip ESAL accumulés pendant la durée du projet

Z_R = Fiabilité (Reliability)

M_R = Module de résilience psi

S_0 = Écart-type

ΔPSI = Dégradation de l'indice de viabilité

Tableau 5-1: Coefficients de résistance des couches de chaussée

Couche	Type de calque	Condition	Coefficient	
Surfaçage	Revêtement		$a_i = 0,1$	
	Enrobé neuf ^{1,2} port	$MR_{30} = 1500$ MPa	$a_i = 0,30$	
		$MR_{30} = 2000$ MPa	$a_i = 0,35$	
		$MR_{30} = 2500$ MPa	$a_i = 0,40$	
		$MR_{30} \geq 3000$ MPa	$a_i = 0,45$	
Couche de base	Enrobé	Comme ci-dessus	Comme ci-dessus	
	Granulaire non lié	Par défaut	$a_i = (29,14 \text{ CBR} - 0,1977 \text{ CBR}^2 + 0,00045 \text{ CBR}^3) 10^{-4}$	
		GB 1 (CBR > 100%)	0.145	
		GB 2 (CBR = 100%)	0.14	
		GB 3 (CBR = 80%)	Avec une couche stabilisée en dessous	0.135
			Avec une couche granulaire non liée en dessous	0.13
		GB 4 (CBR = 65%)	0.12	
		GB 5 (CBR = 55%)	0.107	
		GB 6 (CBR = 45%)	0.1	
	Bitume traité graviers et sables	Stabilité Marshall = 2,5 MN	$a = 0,135$	
		Stabilité Marshall = 5,0 MN	$a = 0,185$	
		Stabilité Marshall = 7,5 MN	$a = 0,23$	
	Cimenté ³	Équation	$a_i = 0,0238 \cdot \text{UCS} + 0,0895$	
		CB 1 (UCS = 3,0 – 6,0 MPa)	$a = 0,18$	
		CB 2 (UCS = 1,5 – 3,0 MPa)	$a = 0,13$	
Fondation	Granulaire non lié	Équation	$a_i = 0,0174 + 0,0272 \cdot \log_{10} \text{CBR}$	
		GS (CBR = 30%)	$a = 0,10$	
		GC (CBR = 15%)	$a = 0,08$	
	Cimenté	CB 3 (UCS = 0,7 – 1,5 MPa)	$a = 0,1$	

Notes :

1. La résistance compressive non confinée (UCS) est exprimée en MPa à 14 jours.
2. MR_{30} est le module résilient par l'essai de traction indirecte à 30 C.°

L'équation de conception relie le nombre total équivalent cumulé d'essieux standard dans la direction du trafic intense aux variables d'entrée suivantes :

- 1) **Module de sol support.** Le module du sol support (généralement estimé à partir du CBR) a été exprimé comme la valeur à la condition la plus faible, mais pour faire face aux grandes variations tout au long de l'année, une valeur pondérée a été utilisée pour combiner la condition la plus faible de chaque mois de l'année d'une manière statistiquement correcte. Les progrès récents dans l'utilisation des

défectomètres à masse tombante (FWD) et des déflectomètres légers à masse tombante (LWD), et leur disponibilité croissante ont permis d'estimer assez précisément le module de la couche de fondation.

- 2) **L'écart type global (S_0) des données de performance de l'essai routier et un facteur de fiabilité (R).** L'équation de conception comprend un terme qui tient compte de la variabilité des performances de chaussées similaires lors de l'essai routier initial. Cela permet ensuite de produire des conceptions pour différents niveaux de probabilité (par exemple, généralement 90 %, 95 % ou 98 %) d'atteindre la durée de vie prévue
- 3) **Dégradation admissible de l'état de surface (ΔPSI).** Il est possible de choisir l'état final auquel une route est considérée comme nécessitant une réparation ou une réhabilitation structurelle importante. Ainsi, la même conception structurelle peut avoir plus d'une durée de vie nominale en fonction de l'ampleur de la détérioration qui peut être tolérée.
- 4) **Numéro de structure SN et les coefficients de résistance et de drainage associés pour chaque couche de chaussée.** La conception peut être modifiée en changeant la résistance des couches de la chaussée à l'aide des facteurs de "drainage" m_i (Equation 5.1) pour chaque couche afin de tenir compte d'un drainage ou de conditions climatiques bonnes ou mauvaises.

Ainsi, on peut voir que la méthode peut être calibrée pour différentes conditions de climat, de condition terminale et de fiabilité en utilisant les résultats d'études empiriques dans les endroits requis. Si un ingénieur d'études souhaite utiliser une version de la méthode AASHTO, il est important de déterminer quelles hypothèses ont été faites pour calibrer la méthode. La fiabilité de la méthode dépend donc de l'aptitude des auteurs de versions particulières à effectuer une bonne recherche et à la calibrer de manière précise et scientifique.

L'équation de conception est très non linéaire et contient cinq variables, donc pour déterminer le SN requis pour un niveau de trafic particulier, l'équation doit être utilisée de manière itérative.

Bien que la gamme de structures de chaussée et les charges de trafic utilisées ne soient pas destinées aux routes à faible volume, des sections de routes revêtues d'un mince joint bitumineux ont été incluses et de nombreuses autorités routières en Asie du Sud-Est utilisent la méthode de conception AASHTO (par exemple le Tableau 5-2). Les différentes méthodes seront différentes parce que le calibrage pour l'usage local sera différent de l'original et de l'un de l'autre, mais elles sont toutes classées comme des méthodes basées sur la CBR.

Tableau 5-2: Facteurs de conception (exemple du Vietnam utilisant la méthode AASHTO)

Facteur AASHTO	Valeur
Période de conception (années)	15
Trafic (Cumulatif MESA)	7.2
Fiabilité globale (R%)	85
Écart type global (S_0)	0.45
Modification de la capacité de service terminal (ΔPSI)	2.2
Module de sol support (MPa)	50
Qualité de drainage (couche de base) (m_2)	1.0
Qualité de drainage (fondation) (m_3)	1.0
Coefficients de résistance de la couche Béton bitumineux (a_1)	0.37
Couche de base (a_2)	0.135
Fondation (a_3)	0.11

Les matériaux de base des routes sont généralement assez résistants et les mesures de résistance à l'état sec ne sont donc pas très sensibles. Pour accroître la sensibilité afin de distinguer les différents matériaux de résistance, il est traditionnel de tester les matériaux en utilisant l'essai CBR par trempage. Il n'a pas été supposé que les matériaux seraient trempés lorsqu'ils sont utilisés sur une route.

Il est également important de noter que l'équation de conception de l'AASHTO indique que la capacité de transport du trafic est proportionnelle à une puissance élevée de SN (environ 9,4). Ainsi, une faible augmentation de la SN entraîne une forte augmentation de la capacité de transport. Dans des études ultérieures sur les LVR, un résultat sensible similaire n'a pas été obtenu (une puissance comprise entre 5,5 et 7,5 est beaucoup plus courante (voir par exemple les relations HDM 4). Un tel problème ne serait pas résolu par un étalonnage. Une équation AASHTO "calibrée" surestimera la capacité de charge d'une route si elle est utilisée pour des routes ayant un SN élevé.

5.2.1.2 Calibration

La méthode de conception AASHTO est unique en ce sens qu'elle prévoit plusieurs méthodes de prise en compte du risque, ce qui, d'une certaine manière, la rend plus compliquée. Tout d'abord, l'évaluation de la résistance de la couche de fondation était essentielle lors de l'essai sur route car la région des États-Unis où les expériences ont été menées subissait un cycle de gel/dégel chaque année et la plupart des détériorations de la route se produisaient pendant le dégel lorsque la couche de fondation était extrêmement faible. Cette situation a tellement dominé les performances qu'il a fallu en tenir compte dans la méthode, ce qui a été fait en définissant la résistance de la couche de fondation pour la conception comme une valeur de trempage correctement pondérée appliquée pour chaque mois de l'année. Cette méthode n'est requise que dans des conditions de gel-dégel similaires et n'est pas nécessaire dans la plupart des régions où la présente note sur les routes rurales est applicable. Néanmoins, la méthode de conception exige une évaluation de la résistance de la couche de fondation imbibée.

En outre, la méthode exige également un calibrage pour le climat en utilisant les facteurs de drainage (m). Ces facteurs sont importants car la méthode de conception originale a produit des structures de chaussée dont les performances pouvaient être multipliées par plus de 5 en termes de capacité de transport du trafic lorsque le climat passait de l'humidité à la sécheresse. Cela s'ajoutait à la variabilité observée avec des chaussées nominale ment identiques au même endroit. Cette dernière variabilité était d'une ampleur similaire, de sorte que la différence entre une conception moyenne et une conception ayant une probabilité de 95% d'atteindre sa durée de vie était également importante. Malheureusement, ces deux variabilités (aléatoires et induites par le climat) représentent la réalité du problème de conception des chaussées mais ne sont pas aussi graves lorsque les conditions de gel et de dégel ne se produisent pas. Néanmoins, le problème de l'étalonnage de la méthode AASHTO nécessite des données sur les performances des routes locales et des analystes de données compétents. L'utilisation de la méthode sans calibrage n'est pas recommandée.

5.2.1.3 Nombre structural modifié

L'essai routier de l'AASHTO a été réalisé sur une seule couche de fondation, ce qui fait que l'effet des différentes couches de fondation n'a pas pu être estimé et que le nombre structural n'a pas pu inclure une contribution de la couche de fondation. Pour surmonter ce problème et étendre le concept à toutes les couches de fondation, une contribution de la couche de fondation a été dérivée comme décrit par Hodges et al. (1975) et un nombre structurel modifié défini comme suit :

$$SNC = SN + SNG = SN + 3.51 (\log_{10} CBR_s) - 0.85 (\log_{10} CBR_s)^2 - 1.43$$

où :

SNC = Nombre structural modifié de la chaussée

SNG = contribution du sol support

CBR = Le CBR in-situ de sol support

Le nombre structural modifié (SNC) a été largement utilisé et constitue la base de la définition de la résistance des chaussées dans de nombreux modèles de performance des chaussées

5.2.1.4 Nombre structural ajusté (SNP)

Lors de l'évaluation d'une chaussée en vue de concevoir des mesures de réhabilitation, on constate que de nombreuses chaussées ne peuvent pas être facilement divisées en couches de base et de fondation distinctes avec un support bien défini et uniforme. Par conséquent, lors du calcul du nombre structural selon l'équation ci-dessus, l'ingénieur doit déterminer quelles couches définir comme base, lesquelles comme fondation, et où définir le sommet de la sous-couche. Pour de nombreuses routes, cela s'est avéré assez difficile. Il y a souvent plusieurs couches qui peuvent être considérées soit comme des couches de fondation, soit comme une partie de couche de forme ou sol support, en particulier lorsque des couches de recouvrement ou des remblais sélectionnés ont été utilisés. La simple sommation de toutes les couches apparentes permet à l'ingénieur d'obtenir presque n'importe quelle valeur de nombre structural puisque la valeur dépendra de l'endroit où l'ingénieur suppose que la ou les sous-fondation(s) se termine(nt) et que la sous-fondation commence. Dans le passé, ce problème a été résolu en limitant simplement la profondeur totale de toutes les couches considérées comme revêtement routier. Toutefois, cette méthode est quelque peu arbitraire, n'a pas été utilisée de manière universelle et a entraîné des erreurs importantes dans certaines circonstances.

Le problème se pose parce que les contributions de chaque couche au nombre structural sont indépendantes de la profondeur. Cela ne peut être correct, car la logique veut qu'une couche très profonde dans le sol de fondation n'ait que peu ou pas d'influence sur les performances de la route. Pour éliminer le problème, une méthode de calcul du nombre structural modifié a été conçue, dans laquelle les contributions de chaque couche au nombre structural global diminuent avec la profondeur (Rolt et Parkman, 2000).

Pour distinguer le nombre structural dérivé du nombre structural modifié (SNC) original, le nouveau nombre structural est appelé le nombre structural ajusté (SNP). L'équation qui permet de le calculer prend en compte la résistance, l'épaisseur et la profondeur de toutes les couches situées sous la sous-fondation. Il est calculé comme suit :

$$SNP = SNA + SNS + SNG$$

où :

SNP est le nombre structural ajusté ;

Le SCN est la contribution du nombre structural de la base et du revêtement

SNS est la contribution du nombre structural de la fondation

SNG est la contribution du nombre structural du sol support

Les équations sont présentées dans la référence et contenues dans le programme TRL pour le calcul des résultats d'un essai DCP.

5.2.2 The Overseas Road Note 31 Method

Les tableaux de conception originaux de la note n° 31 de Overseas Road étaient basés sur une évaluation de la résistance de la plate-forme représentant les conditions les plus faibles prévues et trois classifications ont été fournies à cet effet.

Catégorie 1. Niveaux de sol où la nappe phréatique est suffisamment proche de la surface du sol pour contrôler la teneur en humidité du sol. Le type de sol de fondation régit la profondeur sous la surface de la route à laquelle la nappe phréatique devient l'influence dominante sur la teneur en eau de la fondation. Par exemple, dans les sols non plastiques, la nappe phréatique dominera la teneur en humidité de la couche de fondation lorsqu'elle s'élève à moins de 1 m de la surface de la route, dans les argiles sableuses (IP<20 %), la nappe phréatique dominera lorsqu'elle s'élève à moins de 3 m de la surface de la route, et dans les argiles lourdes (IP>40 %), la nappe phréatique dominera lorsqu'elle s'élève à moins de 7 m de la surface de la route.

Catégorie 2 : Sol supports où la nappe phréatique est profonde, mais où les précipitations peuvent influencer la teneur en humidité du sol support sous la route. Ces conditions se produisent lorsque les précipitations dépassent l'évaporation et la transpiration pendant au moins deux mois de l'année

Catégorie 3 : Sol supports où la nappe phréatique est profonde et le climat aride. Ces conditions se produisent lorsque le climat est sec pendant la plus grande partie de l'année avec des précipitations annuelles de 250 mm ou moins.

Ces catégories ont fourni une méthode relativement simple d'évaluation de la résistance du sol pour la conception. Ce n'est que dans la catégorie 1 que la teneur en humidité CBR de conception est susceptible de s'approcher d'une condition de trempage. Cette valeur dépend de la profondeur minimale de la nappe phréatique et des propriétés du sol de fondation. Ainsi, bien qu'elle soit basée sur la valeur la plus faible de la résistance du sol de fondation, dans de nombreuses zones plus sèches, la valeur la plus faible n'est probablement pas équivalente à une condition de trempage

La procédure de conception CBR pour les nouvelles routes est simple car elle repose sur l'évaluation de la résistance du sol pour la conception, la charge du nouveau trafic et la durée de vie prévue, ainsi que les conditions générales de climat et d'humidité, puis sur la recherche d'une conception appropriée basée sur ces quatre paramètres. Cependant, il est apparu que de nombreux concepteurs, probablement en raison de leur perception du risque sur la durée de vie de la route, utilisaient généralement le CBR trempé à la densité de compactage, concevant ainsi de manière conservatrice et non comme recommandé dans le RRO.

La classe de trafic la plus basse dans la norme ORN 31 est $< 0,3$ MESA alors que d'autres méthodes fournissent deux ou trois classes de trafic inférieures à $0,3$ MESA. Par conséquent, la méthode pourrait être conservatrice pour les routes à faible trafic dans certaines situations où des matériaux de classes inférieures qui sont adéquates, par exemple $0,1$ MESA, sont facilement disponibles.

5.2.3 La méthode TRL-SADC

5.2.3.1 Description

Cette méthode est communément appelée "méthode Gourley - Greening". Après des études approfondies menées au Zimbabwe, au Malawi et au Botswana en 1999 par TRL (C. S. Gourley et P. A. K. Greening), de nouvelles abaques de conception pour les LVR revêtue ont été mises au point. Celles-ci étaient basées sur l'identification du type de couche de fondation pour chaque route en utilisant un critère de résistance des RVB de couche de fondation trempée à la densité prévue. Le principe adopté est que si deux routes, dans les mêmes conditions de climat et de drainage et avec la même structure, ont le même CBR de fondation trempée, alors elles se comporteront généralement de manière très similaire. Ainsi, la structure des routes qui ont obtenu de bons résultats dans les études expérimentales constitue la base des abaques de conception et il est seulement nécessaire de copier la structure d'une telle route avec la même couche de fondation trempée CBR à partir des abaques de conception à condition que les conditions climatiques et de drainage soient les mêmes. Il n'est donc pas nécessaire d'estimer la résistance probable du sol de fondation (par exemple, la résistance du sol de fondation dans le pire des cas ou la résistance d'équilibre à long terme). Cependant, il est très important de noter que cela ne suppose pas que les couches de fondation sont susceptibles d'être trempées en pratique. L'essai de trempage permet simplement de classer les sol support comme susceptibles d'avoir des performances similaires à celles qui ont obtenu de bons résultats dans les études empiriques dans les mêmes conditions. Il est reconnu que cela n'est pas garanti, mais l'étude elle-même a obtenu de nombreuses données in-situ concernant les conditions d'humidité des routes sur une longue période et le principe a été vérifié.

Pour les routes à revêtement bitumineux non structurel, deux zones climatiques sont définies et deux catalogues de conception (abaques), le Tableau 5-3 et le Tableau 5-4, sont utilisés comme indiqué ci-dessous. Le deuxième abaque de conception est fourni pour les conditions dans lesquelles le climat et/ou les conditions de drainage sont inférieurs et dans ces conditions, les structures recommandées sont plus solides. La résistance de la couche de fondation des sections de route uniformes pour la conception est déterminée comme suit:

- Pour un trafic de conception inférieure à $0,3$ MESA, le 50e percentile de la résistance de la plateforme ;
- Pour un trafic de conception compris entre $0,3$ et $0,5$ MESA, le 25e percentile de la résistance du sol;
- Pour un trafic de conception supérieur à $0,5$ MESA, le 10e percentile de la résistance du sol.

L'essai CBR standard par trempage est également utilisé pour évaluer la résistance des matériaux de revêtement importés, mais les épaisseurs de conception développées à partir de l'étude ont clairement montré que les spécifications des routes à forte circulation pouvaient être réduites pour les routes à faible circulation tout en atteignant le même niveau de service. Les tableaux de conception et les spécifications en tiennent compte.

Ces abaques ont introduit davantage de classes de trafic inférieures à 1 MESA que celles disponibles dans la norme ORN 31. La Figure 5-1 montre le diagramme de décision pour la sélection de l'abaque de conception approprié. Les abaques de conception présentent donc des conceptions d'épaisseur différente en fonction du climat et des conditions de drainage pour la même classe de fondation indexée.

5.2.3.2 Sélection des abaques de conception

La structure de chaussée requise, adaptée au climat, au profil en travers, au trafic et à la résistance de la couche de forme, est identifiée à partir de la Figure 5-1 et des Tableaux 5-3 et 5-4. Les zones climatiques sont classées sur la base du nombre de Weinert (N). Les zones climatiques humides sont définies par $N < 4$ et les zones sèches sont définies par $N > 4$.

$N = 12 * E / Pa$ où E est l'évaporation en mm au cours du mois le plus chaud de l'année et Pa est la précipitation annuelle en mm.

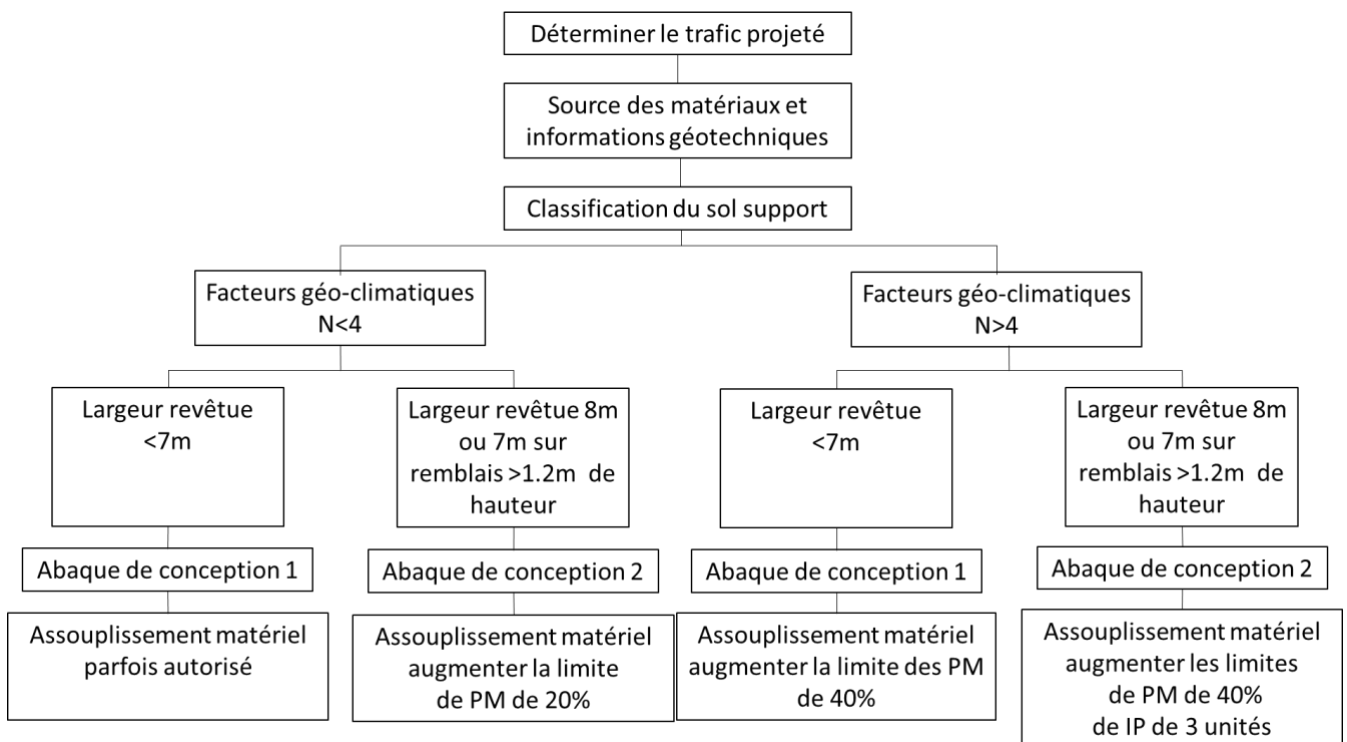


Figure 5-1: Diagramme de décision de la conception des chaussées

(A) Zone climatique humide :

Dans la zone climatique humide, les situations et solutions suivantes s'appliquent:

- a) Lorsque la largeur totale de la surface revêtue est inférieure à 7 m, il convient d'utiliser le tableau de conception des chaussées 1 (Tableau 5-4). Aucun ajustement des exigences en matière de matériaux de base n'est nécessaire.

- b) Lorsque la largeur totale de la surface revêtue est de 8 m ou plus : Le tableau de conception de la chaussée 2 (Tableau 5-4) doit être utilisé. La limite du module de plasticité de la base peut être augmentée de 20 %.
- c) Lorsque la largeur totale de la surface revêtue est de 8 m ou plus : Le tableau de conception de la chaussée 2 (Tableau 5-4) doit être utilisé. La limite du module de plasticité de la base peut être augmentée de 20 %.
- d) Si l'ingénieur concepteur estime que d'autres facteurs de risque sont élevés (par exemple, un mauvais entretien et/ou une qualité de construction modérée), il convient d'utiliser l'abaque de conception de la chaussée 1 (Tableau 5-3).

(B) Zone climatique modérée et sèche :

Dans une zone climatique modérée ou sèche, les solutions suivantes s'appliquent :

- a) Il convient toutefois d'utiliser le tableau de conception des chaussées 2 (un exemple est présenté dans le Tableau 5-4) :
- b) Lorsque la largeur totale de la surface revêtue est inférieure à 8 m, la limite du module de plasticité de la chaussée peut être augmentée de 40 %.
- c) Lorsque la largeur totale de la surface revêtue est supérieure à 8 m, ou lorsque la chaussée se trouve sur un talus de plus de 1,2 m de hauteur, le module de plasticité de la base de la route peut être augmenté jusqu'à 40 % et l'indice de plasticité augmenté de 3 unités.

Une fois que la qualité des matériaux disponibles et les distances de transport sont connues, les tableaux de conception peuvent être utilisés pour examiner les conceptions les plus économiques.

Le choix de la charte de conception sépare les conceptions en essentiellement deux catégories de risques en fonction du climat et de la disposition du drainage, mais une troisième option est possible, à savoir que s'il y avait un risque perçu que la couche de fondation d'une route soit saturée, l'option est simplement de concevoir sur la couche de fondation de moindre résistance suivante (préférée) ou sur la catégorie de trafic supérieure suivante. La relation entre le nombre de structures et la capacité de transport indique qu'il s'agit d'une approche parfaitement acceptable et c'est d'ailleurs la raison pour laquelle les plages de résistance de la couche de forme ont été choisies initialement.

Malheureusement, il s'est également avéré difficile d'empêcher les véhicules lourds, souvent surchargés, d'utiliser les LVRR. Bien que les dommages cumulés causés par les essieux lourds soient pris en compte dans les classes de trafic définies dans les tableaux de conception et basées sur le concept d'essieu standard équivalent, sur les LVRR les véhicules surchargés avec des pressions de pneus élevées présentent un risque surtout si la résistance des couches de fondation se situe dans la partie inférieure de la plage acceptable.

L'utilisation des tableaux est décrite ci-dessous. Lorsque le projet est situé à proximité de la limite entre les deux zones climatiques, la valeur la plus humide doit être utilisée pour réduire les risques. Lorsque le projet est situé près de la limite entre deux classes de conception de la circulation, et en l'absence de données plus fiables, la classe de conception suivante la plus élevée doit être utilisée. Si la route est censée transporter des charges exceptionnellement lourdes, par exemple en provenance d'industries telles que les scieries, les mines et autres, il peut être prudent d'ajuster la classe de conception à la hausse, afin de réduire les risques.

Les tableaux de conception ne tiennent pas compte des sous-niveaux très faibles (CBR < 3 %) et des autres sols problématiques, qui nécessitent l'intervention et la conception de spécialistes. Le traitement des sols problématiques est abordé dans la plupart des manuels nationaux et est brièvement décrit au chapitre 9 (Facteurs et considérations accessoires) du présent guide, ce qui nécessite généralement l'importation de matériaux de fondation sélectionnés de meilleure qualité.

Tableau 5-3: Exemple de conception de la chaussée bitumée Abaque 1 (Zones climatiques humides)5

Classe sol support (CBR)	Concevoir des classes de trafic dans MESA				
	LVR 1	LVR 2	LVR 3	LVR 4	LVR 5
	<0.01	0.01 – 0.1	0.1 – 0.3	0.3 – 0.5	0.5 – 1.0
S2 (3-4%)	125 G45 125 G30 100 G15	175 G45 150 G15	175 G60 150 G15	175 G60 150 G15	200 G60 150 G15
S3 (5 – 7 %)	125 G45 100 G30 100 G15	150 G45 100 G15	175 G60 150 G15	175 G60 150 G15	200 G60 150 G15
S4 (8-14%)	125 G45 125 G30	175 G45 100 G30	150 G60 100 G30	175 G60 100 G30	200 G60 100 G30
S5 (15 – 29%)	200 G45	150 G45 125 G30	150 G60 100 G30	150 G60 100 G30	175 G60 100 G30
S6 (>30%)	175 G45	200 G45	200 G60	200 G60	200 G60

Dans une zone de climat tropical et humide saisonnier, il peut être plus économique d'utiliser une section transversale plus large et d'utiliser ensuite l'abaque de conception 2 plutôt que de concevoir une section transversale étroite et une chaussée à l'aide de l'abaque de conception de la chaussée 1.

Tableau 5-4: Exemple d'abaque - Conception de la chaussée bitumeuse Abaque 2 (Zones climatiques modérées)5

Classe sol support (CBR)	Concevoir des classes de trafic dans MESA				
	LVR 1	LVR 2	LVR 3	LVR 4	LVR 5
	<0.01	0.01 – 0.1	0.1 – 0.3	0.3 – 0.5	0.5 – 1.0
S2 (3-4%)	150 G45 100 G15	150 G45 100 G15	150 G60 100 G15	175 G60 100 G15	175 G60 100 G15
S3 (5 – 7 %)	150 G45 100 G15	150 G45 100 G30	175 G60 100 G30	175 G60 100 G30	175 G60 100 G15
S4 (8-14%)	125 G45 125 G30	150 G45 100 G30	150 G60 100 G30	175 G60 100 G30	175 G60 100 G30
S5 (15 – 29%)	100 G45 125 G30	150 G45 100 G30	150 G60 100 G30	150 G60 125 G30	175 G60 125 G30
S6 (>30%)	175 G45	200 G45	175 G60	200 G60	200 G60

Les Chapitres 3 et 6 décrivent en détail les types de matériaux pour les différentes couches de la chaussée. Les couches de base peuvent être soit un matériau granulaire non lié, soit un matériau stabilisé. En général, les fondations sont non liées et comprennent des matériaux G30 ou G25. Les deux conviennent, mais le G30 est préféré.

Ce sont ces abaques de conception qui comprennent la méthode de conception de base CBR-SN (CBR-Structural Number) décrite dans les récents manuels LVR. Ils sont maintenant considérés comme un peu conservateurs car les spécifications des matériaux n'ont pas été affinées autant que les recherches actuelles

commencent à le montrer. Les spécifications pourraient probablement être réduites davantage sans sacrifier les performances, comme le montre le projet ReCAP en cours "Développement de lignes directrices et de spécifications pour les routes revêtues à faible volume par analyse rétrospective", également connu sous le nom de projet d'analyse rétrospective.

5.2.4 *La méthode de Foundation Class*

Une modification importante de la méthode CBR de base est la méthode basée sur la définition de classes de base. Les résultats sont généralement présentés comme un abaque de structures de la manière habituelle, mais la conception originale de la chaussée est réalisée en deux étapes. Tout d'abord, une fondation est conçue pour supporter le trafic de construction et servir de plate-forme de construction. Elle est en principe similaire aux couches de recouvrement et de fondation utilisées dans les méthodes de base basées sur la CBR. Il existe généralement quatre ou cinq conceptions de fondation pour couvrir la gamme des résistances de la couche de fondation, mais les mêmes conceptions de couche de fondation sont utilisées pour toutes les structures de chaussée. Les classes de fondation sont parfois exprimées sous forme de modules qui peuvent être vérifiés par l'utilisation de déflectomètres légers de poids de chute (LWD), de déflectomètres de poids de chute (FWD), ou par des essais de plaques d'appui. Avec la disponibilité croissante des LWD et des FWD, la vérification de la classe de fondation obtenue se fait facilement avant l'ajout ou l'ajustement des couches supérieures de la chaussée.

Les couches supérieures de chaque chaussée sont ensuite conçues en fonction du type de structure de la chaussée choisie, du niveau de trafic et de la conception de la fondation appropriée en fonction de la résistance de la fondation. Ainsi, l'abaque de structures qui en résulte pour les différentes structures basées sur les différents matériaux est très similaire à ceux qui utilisent les méthodes de base basées sur la CBR décrites dans les sections précédentes de ce document, sauf que les couches de fondation sont identiques. Un exemple de tableau est présenté à la Figure 5-2.

Un exemple de cette méthode est la directive kenyane de conception des chaussées pour les routes étanches à faible volume (2017) qui contient des abaques de conception pour 17 structures de chaussée différentes sur quatre fondations différentes et cinq classes de trafic jusqu'à 1 million d'ESA.

La variabilité de la résistance d'un revêtement routier est en grande partie due à la variabilité de la résistance de la couche de fondation. Ainsi, l'un des avantages de cette méthode de conception est qu'après avoir construit la fondation, il est possible de procéder rapidement et facilement à des essais complets d'uniformité, par exemple en effectuant des essais de déflexion et, si des zones faibles sont identifiées, des corrections ou des remèdes peuvent être appliqués. En outre, les fondations peuvent être plus facilement conçues avec un haut niveau de fiabilité pour servir de base à une structure routière de longue durée. Enfin, le fait que la conception des fondations soit commune à toutes les structures a des implications pratiques importantes. La méthode devient rapidement familière aux entrepreneurs et aux consultants, ce qui a des retombées sur un meilleur contrôle de la qualité.

5.3 Les méthodes basées sur le DCP

Les méthodes basées sur le DCP nécessitent l'utilisation du DCP in-situ comme principal moyen d'évaluer la résistance in-situ d'un substrat existant. La cote de pénétration du DCP est soit convertie en une valeur CBR équivalente, soit utilisée directement pour déterminer l'épaisseur et la résistance des autres couches de chaussée requises. Deux avantages majeurs de l'instrument DCP sont qu'il est très utile lorsque les installations de laboratoire sont limitées, et que plusieurs mesures in situ peuvent être effectuées rapidement.

Trois limitations qui s'appliquent à la fois au DCP-CBR et au DCP-DN découlent de l'utilisation de l'instrument DCP. Ces limitations sont les suivantes:

1. Lorsqu'elle est utilisée pour évaluer la résistance des couches de chaussée contenant des particules très grossières (retenues sur le tamis de 37,5 mm), on observe une grande variabilité du DN ou des valeurs CBR équivalentes.
2. L'instrument DCP ne peut pas être utilisé pour l'évaluation initiale de la résistance lorsque la conception géométrique de la nouvelle route proposée entraînera des modifications importantes de l'alignement vertical se traduisant par des coupes et des remblais profonds (supérieurs à 1,5 m), par exemple en terrain vallonné. En effet, la longueur d'une tige de DCP (y compris le prolongement) ne peut pas pénétrer au-delà de 1,5 m. Ainsi, avant de se lancer dans des études coûteuses, le concepteur doit établir si la route présentera des modifications importantes de l'alignement vertical. Si l'on prévoit des coupes et des remblais profonds, il peut être nécessaire de procéder à des investigations souterraines (forage).
3. Les relevés de PCD sont fortement influencés par les légères variations de la teneur en humidité, de la distribution granulométrique ou de la densité du matériau évalué. Ainsi, les mesures de résistance in situ peuvent facilement être mal interprétées, par exemple, l'amélioration du drainage peut être la seule chose requise au lieu de l'ajout d'une nouvelle couche.

5.3.1 La méthode TRL-ORN 18 DCP-CBR

5.3.1.1 Les Étapes de conception

Une dernière modification de la méthode TRL-ORN 18 (parfois appelée méthode DCP-CBR) consiste à utiliser davantage le DCP. Cette méthode est basée sur l'essai CBR, mais, en raison de ses nombreux avantages, le concepteur peut normalement faire un usage intensif du DCP pour obtenir une grande partie des informations de conception requises, en particulier un profil longitudinal des résistances in situ des couches de revêtement de la route existante en termes de valeurs DN (pénétration par coup en mm/souffle). La méthode nécessite la conversion de la DN en CBR in situ. Il en existe plusieurs publiées dans la littérature mais la relation TRL est recommandée car elle est basée sur des valeurs d'essai CBR et DCP in situ plutôt que sur des essais réalisés dans des moules en laboratoire.

$$\text{Log}_{10}(\text{CBR}) = 2.48 - 1.057 * \text{Log}_{10}(\text{DN})$$

La CBR in situ est ensuite convertie en valeurs imbibées. Enfin, les valeurs de CBR trempées sont converties en coefficients de résistance de couche de la manière normale. La procédure globale est essentiellement la même que pour la méthode CBR-SN, à l'exception de cette étape de conversion de DN en CBR.

L'utilisation du DCP permet de déterminer de nombreuses mesures de la résistance des matériaux in situ et fournit ainsi un ensemble très important de données sur la résistance des matériaux pour la production d'une conception statistiquement fiable. Il faut tenir compte de la résistance probable à long terme du matériau sous la route achevée, mais cet ajustement doit être fait pour toutes les méthodes de conception. Rien ne peut remplacer le nombre de mesures disponibles grâce à l'utilisation du DCP. Certains essais CBR sont souhaitables pour établir une corrélation avec les valeurs des essais du DCP.

Comme d'autres méthodes, cette approche de conception et la méthode de sélection des matériaux de la chaussée sont également évaluées par des essais de classification tels que la distribution de la taille des particules, les limites d'Atterberg et la détermination du DCP/OMC. Là encore, comme dans le cas de la méthode CBR, la détermination de la résistance des matériaux est basée sur l'essai CBR standard de trempage

pour spécifier la résistance minimale des matériaux de chaussée et évaluer la résistance des matériaux de chaussée importés. L'exigence de plasticité est la même que celle de la méthode CBR et la relation entre la résistance au trempage et la résistance in situ (CBR) dépend des caractéristiques des matériaux.

La méthode CBR-SN-DCP est principalement applicable à la mise à niveau de routes existantes ayant une ou plusieurs couches structurales. Afin d'utiliser de manière optimale les couches existantes, la méthode utilise le concept SN qui est basé sur les CBR in situ dérivées des valeurs DN. La différence entre la SN de la route existante et celle requise pour la route améliorée, qui est obtenue à partir des abaques des structures, définit les exigences supplémentaires pour l'amélioration, la réhabilitation ou la reconstruction. Pour une nouvelle route dont l'alignement et la profondeur de la couche de fondation peuvent changer pendant la construction, il faut veiller à obtenir les valeurs correctes de résistance de la couche de fondation pour la conception, mais la méthode est un peu plus simple car il n'y a pas de couches structurales de chaussée existantes. Les conceptions structurales sont obtenues directement à partir de l'abaque des structures.

Étape 1 : Sélectionnez la période de conception. Déterminer la CTM. Celle-ci est basée sur le comptage standard des véhicules et les enquêtes sur la charge par essieu et est identique dans les trois méthodes de conception.

Étape 2 : Entreprendre une enquête sur le PDC et prélever des échantillons en vrac pour mesurer l'humidité et la résistance

Étape 3 : Pour chaque point d'essai, déterminez le profil de résistance de couches - Layer strength profile (LSP). Le LSP indique le DN en mm/souffle et le CBR en fonction de la profondeur, ainsi que les limites de la couche. La figure 5-3 présente un résultat typique du logiciel d'analyse DCP du Royaume-Uni, que l'on peut obtenir gratuitement en envoyant un courriel à enquiries@trl.co.uk.

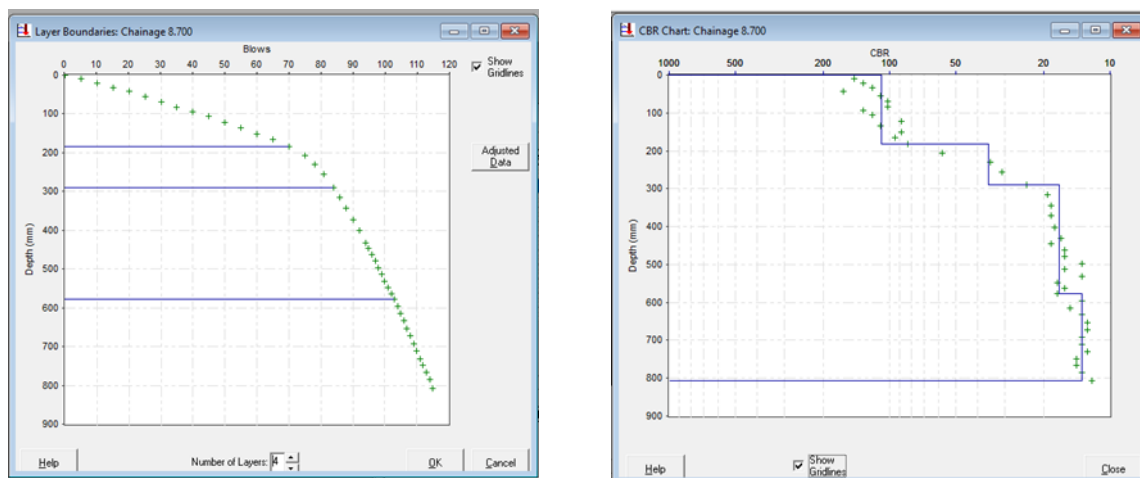


Figure 5-3: Diagrammes types de résistance des couches calculés dans le cadre de UK DCP Program

Étape 4 : Déterminez les valeurs SN in-situ pour chaque couche et la SN totale (et SNC) de la chaussée pour chaque point d'essai.

Pour déterminer la SN et la SNC totales in situ, les couches doivent d'abord être définies comme couche de base, couche de fondation ou couche de fondation, comme indiqué sur la Figure 5-4.

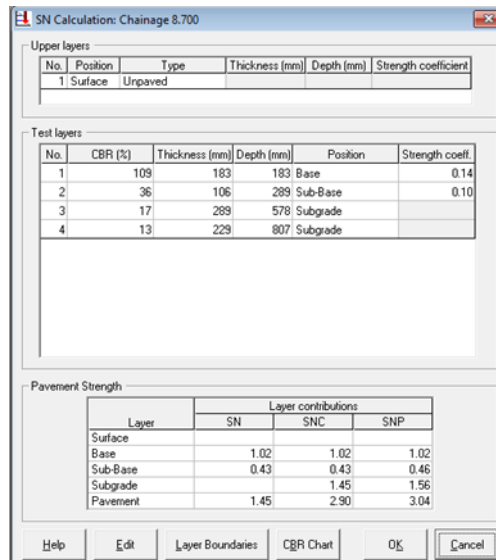


Figure 5-4: Calculation of SN/SNC in the UK DCP Program

Étape 5 : Les sections uniformes sont déterminées sur la base d'une analyse CuSums des valeurs SN pour chaque point de l'essai.

Étape 6 : La classe de fondation de conception exige les valeurs CBR de la fondation trempée (comme expliqué dans la section 5.5) plutôt que les valeurs in situ. La conversion des valeurs in situ en valeurs imbibées nécessite une mesure de l'humidité in situ, exprimée par le rapport de la teneur en eau in situ divisée par la teneur en eau optimale, et l'utilisation de la Figure 5-5. La relation entre la résistance imbibée et la résistance in situ (CBR) dépend des caractéristiques des matériaux. Toutefois, pour le niveau de précision requis, la Figure 5-5 est adéquate. La condition d'humidité in situ est obtenue à partir des échantillons prélevés pour l'analyse en laboratoire après détermination de sections uniformes. Un minimum de trois échantillons par section uniforme est recommandé. Il est souvent plus utile d'obtenir les échantillons une fois que l'étude du PDC a été analysée et que les points d'échantillonnage les plus appropriés peuvent être identifiés pour s'assurer que l'on tire le maximum de profit de l'échantillonnage et des essais. Toutefois, le délai entre les essais in situ et l'échantillonnage doit être inférieur à 14 jours.

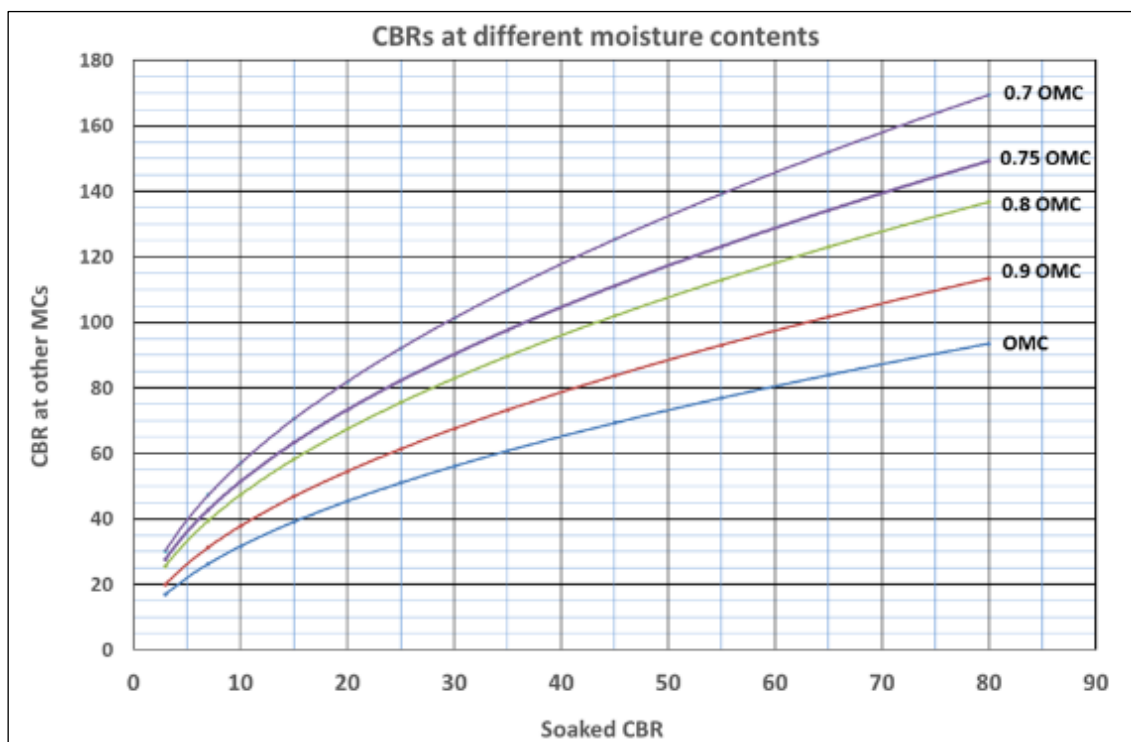


Figure 5-5: Relation entre le DCP-CBR in-situ et le CBR trempé

Tableau 5-5: Nombres structurels pour la conception de la chaussée Abaque 1 -Zones humides

Classe sol support (CBR)	TLC 0,01	TLC 0,1	TLC 0,3	TLC 0,5	TLC 1.0
	< 0,01	0.01 – 0.1	0.1 – 0.3	0.3 – 0.5	0.5 – 1.0
S1 (<3%)	Traitement de sol support spécial requis				
S2 (3-4%)	1.71	1.86	2.04	2.13	2.28
S3 (5-7%)	1.51	1.70	1.77	1.83	1.95
S4 (8-14%)	1.35	1.43	1.53	1.59	1.68
S5 (15-29%)	0.86	1.04	1.19	1.29	1.45
S6 (>30%)	0.76	0.8	0.85	0.93	0.96

Remarque : Ces valeurs excluent une contribution du revêtement.

Tableau 5-6: Nombres structurels pour la conception de la chaussée Abaque 2 - Zones mod/sèches

classe sol support (CBR)	TLC 0.01	TLC 0.1	TLC 0.3	TLC 0.5	TLC 1.0
	< 0.01	0.01-0.1	0.1-0.3	0.3-0.5	0.5-1.0
S1 (<3%)	Traitement de sol support spécial requis				
S2 (3-4%)	1.24	1.59	1.78	1.87	2.08
S3 (5-7%)	1.19	1.40	1.50	1.59	1.78
S4 (8-14%)	1.15	1.21	1.28	1.40	1.50
S5 (15-29%)	0.86	1.04	1.09	1.20	1.31
S6 (>30%)	0.76	0.87	0.87	0.96	0.96

Remarque : Ces valeurs excluent une contribution du revêtement.

Étape 7 : Comparez le SN/SNC avec le SN/SNC requis de l'abaque pertinent pour déterminer la déficience structurelle à chaque point d'essai (Tableau 5-5 et Tableau 5-6).

Étape 8 : Identifier les zones (a) où la déficience structurelle est importante et (b) les zones où les couches sont très faibles et peu susceptibles de répondre aux spécifications de la couche qu'elles deviendront dans la conception améliorée. Ces points doivent être étudiés séparément afin d'identifier la cause probable et les solutions possibles au problème.

5.3.1.2 Exigences de mise à niveau

Étape 9 : Identifier les sections uniformes révisées en omettant les sections à traiter séparément (c'est-à-dire telles qu'identifiées à l'étape 8) en fonction des déficiences structurelles (Δ SN ou Δ SNC) à chaque point d'essai en utilisant la méthode CuSum

Les défaillances de la couche de fondation sont rares et peuvent être évitées en s'assurant que l'épaisseur et/ou le numéro de structure de la chaussée sont adaptés au niveau de trafic. Cela dépend du niveau de trafic et de la résistance de la couche de fondation.

Étape 10 : Les Tableaux 5-5 à 5-6 indiquent les valeurs cibles de la SN et de la SNC pour différentes conditions de la couche de fondation et pour différents niveaux de trafic, calculées à partir des tableaux de conception pour les routes à revêtement bitumineux mince. La différence entre la SN requise et la SN existante (Δ SN) est la déficience qui doit être corrigée.

Il est très important à ce stade de prendre en compte la distribution réelle des déficiences structurelles en termes de Δ SN ou Δ SNC (telle que calculée à l'étape 7 à chaque point de l'essai). En effet, la relation entre la capacité de transport et le SN est très non linéaire (elle est proportionnelle au SN^n où l'exposant, n , est généralement égal à 6 ou 7). Ainsi, utiliser une valeur moyenne de Δ SN pour la conception du renforcement est une grave erreur car il y aura de nombreux points (50%) où le Δ SN est supérieur à la moyenne et la capacité de transport de ces points sera très faible par rapport aux exigences. Il s'agit d'une étape essentielle, mais qui n'est malheureusement pas incluse dans toutes les méthodes de conception.

Pour chaque section uniforme, il convient d'utiliser les percentiles du Tableau 5-7 du Δ SN ou du Δ SNC pour déterminer les exigences de renforcement.

Tableau 5-7: Percentile de conception pour les classes de circulation

Classe de charge de trafic	Percentile de Δ SN ou SN
TLC 0,01 et TLC 0,1	Médiane
TLC 0,3	Haut 75 ^e percentile
TLC 0.5 et TLC 1.0	Haut 90 ^e percentile

Toutefois, lorsque les besoins de renforcement sont importants, il peut être plus rentable de procéder à une certaine reconstruction et, inversement, s'ils sont faibles, il suffit parfois de procéder à des travaux d'entretien. Le Tableau 5-8 est un guide des traitements.

Tableau 5-8: Critères de carence structurale

Déficit structurel basé sur des percentiles appropriés	Action	Notes
0,2 ou négatif	Maintenir avec un traitement de surface (p. ex. un pansement de surface).	Après le bouchage de trous au besoin, la superposition granulaire peut être utilisée pour corriger d'autres défauts de route.
0.2 – 1.2	Nouvelle couche granulaire. Les couches existantes doivent être vérifiées pour la qualité (fondation ou base). L'épaisseur minimale du nouveau plat de base doit être de 75mm.	On peut s'attendre à des travaux de réparation localisés. Un traitement de surface est nécessaire.
1.2 – 1.8	Le cours de base existant est susceptible d'être uniquement de qualité de fondation et devrait être vérifié. Une fondation supplémentaire et un nouveau cours de base sont nécessaires.	Certains travaux de réparation localisés sont nécessaires. Un traitement de surface est nécessaire.
> 1,8	Les couches existantes sont susceptibles d'être inférieures à la qualité de la fondation, d'où une nouvelle fondation et un nouveau cours de base sont nécessaires. Il convient d'envisager de stabiliser chimiquement les matières existantes.	Un traitement correctif localisé et un traitement de surface sont nécessaires.

Les spécifications des matériaux sont examinées dans le Chapitre 3

5.3.2 La méthode DCP-DN

Le résultat de chaque l'essai DCP est un diagramme de la résistance de la chaussée existante mesurée en valeurs DN en fonction de la profondeur. Dans la méthode DCP-DN, la qualité du matériau de base est exprimée en termes de résistance à la pénétration du DCP, c'est-à-dire sa valeur DN, à la densité de compactage spécifiée et prévue en condition d'humidité de service.

La méthode DCP-DN est fondamentalement similaire en principe à la méthode DCP-CBR dans la mesure où la DCP est utilisée pour évaluer les conditions in situ et permet de déterminer de nombreuses mesures de la résistance du matériau in situ, ce qui se traduit par une grande fiabilité des conceptions de la chaussée. Toutefois, la principale différence est que la méthode DCP-DN est entièrement basée sur l'utilisation du DCP et n'exige pas de l'ingénieur qu'il convertisse les résultats en valeurs CBR équivalentes. Au lieu de cela, ce sont les valeurs DN et non les valeurs CBR équivalentes qui sont utilisées dans l'ensemble de l'abaque, et l'abaque qui en résulte est également présenté en termes de valeurs DN. Les valeurs de DN in situ obtenues à partir d'une étude de la route proposée sont reportées sur un abaque en fonction de la profondeur et sont comparées directement aux valeurs de DN de l'abaque de conception. Les étapes de la méthode sont décrites dans les sections suivantes et les détails de la méthode peuvent être trouvés dans le Manuel générique DCP-DN 2020.

5.3.2.1 Étapes de la méthode de conception

Les étapes de la méthode de conception sont présentées et décrites dans le Tableau 5-9.

Tableau 5-9: 10 Étapes du processus

Étape	Action
1	Déterminez le TLC. Ceci est identique dans toutes les méthodes
2	Effectuez une enquête DCP et calculez les valeurs DSN et DN pour tous les points d'essai. Essentiellement la même procédure dans toute méthode qui utilise le DCP
3	<p>Ces valeurs sont requises pour la détermination des sections uniformes. Après avoir saisi toutes les données DCP dans le programme DCP AfCAP LVR, le calcul des paramètres utiles suivants se fait automatiquement. Le logiciel est disponible en téléchargement gratuit à http://www.research4cap.org/SitePages/LVRDCPSoftware.aspx</p> <p>a) Le DN moyen pondéré de chaque couche de 150 mm jusqu'à une profondeur de 800mm. Il s'agit de la configuration standard du logiciel AfCAP LVR DCP, mais les épaisseurs de la couche peuvent être modifiées si nécessaire.</p> <p>b) Le nombre de coups DN₄₅₀ nécessaire pour pénétrer le haut 450 mm de la chaussée. C'est la partie de la chaussée qui doit être la plus forte et donc la DN pour les trois couches supérieures de 150 mm et le DSN₄₅₀ fournissent une appréciation rapide de la nécessité probable de renforcer.</p> <p>c) Le DSN₈₀₀ est le nombre total de coups nécessaires pour que le DCP pénètre à 800 mm de profondeur et donne une large mesure de la résistance globale de la chaussée quelque peu analogue au nombre structural AASHTO. Le DSN₈₀₀ reflète ainsi la résistance des 450 mm supérieurs de la chaussée ainsi que la résistance du sol support de 450 à 800 mm de profondeur et est le plus souvent utilisé avec le DN des trois couches supérieures pour déterminer les sections uniformes.</p>
5	Cette procédure n'identifie pas où le sol support commence réellement, mais bien que cela puisse être utile, la valeur DN jusqu'à 800 mm est suffisante pour les LVR.
6	Les sections uniformes doivent ensuite être identifiées. Toutes les méthodes identifient des sections uniformes à l'aide d'une technique CuSum. L'identification des sections uniformes, peut également être faite à partir du logiciel AfCAP LVR-DCP.
7	Le contenu d'humidité in situ de toutes les couches de chaussée doit être mesuré. Des essais de classification et de DN en laboratoire sur trois échantillons en vrac de chaque section uniforme devraient être effectués afin de déterminer les valeurs du DN à la densité prévue du champ et à la teneur prévue en humidité à long terme.
8	<p>La méthode diffère de la plupart des méthodes de conception parce que la résistance des couches de chaussée est essentiellement une variable de conception (Tableau 5-12) qui est ajustée en fonction de la circulation, de la résistance des sol support et de la teneur en humidité présumée (teneur prévue à long terme en humidité des couches de la chaussée). Tableau 5-13</p> <p>Dans la méthode DCP-DN, les spécifications relatives aux résistances de la couche de base varient en fonction de la résistance des sol support et du niveau de trafic global. Dans d'autres méthodes de conception, y compris le CBR et les méthodes CBR-SN, les résistances requises de la couche de base et des couches de fondation et de forme (le cas échéant) sont spécifiées comme des valeurs minimales et celles-ci sont traitées comme des essais de réussite/échec plutôt que comme des variables de conception. Cela se fait parce que la défaillance des bases de route non liées est l'une des formes les plus courantes de défaillance des LVR. Cela s'explique en partie par le fait que les véhicules lourds à forte pression des pneus ne peuvent pas être empêchés de circuler sur de telles routes. En outre, les méthodes d'évaluation de la résistance du sol support pour la conception sont également assez différentes.</p>
9	La comparaison du diagramme de la profondeur de résistance avec les conceptions standard est effectuée et, si des faiblesses sont identifiées, une nouvelle couche supplémentaire est généralement spécifiée qui déplace essentiellement toutes les autres couches vers le bas d'une couche et restaure un équilibre de résistance adéquat. Ce n'est pas différent en principe de l'ajout d'une couche pour répondre à une nouvelle épaisseur de conception globale révisée ou valeur SN comme dans les deux méthodes TRL ORN 18 DCP discuté ci-dessus.

Étape	Action
10	<p>Pour utiliser la résistance actuelle de la route en terre battue/terre qui a été développée au fil des ans, les matériaux de la structure de la chaussée doivent être testés pour leur résistance in situ réelle, à l'aide d'un DCP.</p> <p>Le concepteur doit également déterminer les propriétés de résistance de conception sous-dégradées par l'utilisation de l'essai DN de laboratoire. Les essais de résistance en laboratoire sont effectués avec un DCP sur des spécimens compactés en moules CBR en laboratoire. Les échantillons sont compactés à une gamme de densités et testés pour la valeur DN à OMC, 0,75xOMC et dans l'état trempé comme pour les essais CBR normaux, sauf que le DN est mesuré au lieu de CBR.</p> <p>L'abaque conception DCP-DN est basé sur l'état prévu, à long terme, de l'humidité en service qui est supposé être OMC ou 0,75xOMC, mais s'il y a un risque d'infiltration prolongée de l'humidité dans la chaussée de la route, alors la conception de la chaussée devrait être basée sur l'état trempé ou plus humide sélectionné. La valeur du DN pour tout état d'humidité in situ sélectionné peut être estimée à partir d'une relation entre les valeurs de DN trempées standard et le DN in situ à divers contenus d'humidité pour différentes résistances matériaux, mais cela ne devrait être utilisé que comme guide et l'essai des matériaux réels impliqués devrait de préférence être effectué. Les valeurs de la relation ci-dessus peuvent être fortement dépendantes des matériaux, en particulier pour les matériaux sensibles à l'humidité et certains autres matériaux tels que les latérites et les calcretes.</p>
11	<p>Un résultat typique des essais de DN de laboratoire est indiquée à la Figure 5-6. Cela fournit au concepteur des informations sur l'humidité et la sensibilité à la densité des matériaux. Une grande différence entre les valeurs trempées et LES VALEURS DN DE L'OMC signifie que le matériau est très sensible à l'humidité. Le gradient des courbes indique la sensibilité du DN aux variations de densité, c'est-à-dire une courbe « plate » signifie que le matériau n'est pas très sensible aux variations de densité. Figure 5-6</p>
12	<p>Le programme recommandé des essais à effectuer est indiqué au Tableau 5-10.</p> <p>Le nombre d'essais dépendra de la zone climatique et du microclimat pour la section uniforme. Normalement, les essais à 0,75xOMC peuvent ne pas être nécessaires puisque la conception dans la plupart des cas sera basée sur la résistance de l'OMC ou sur la résistance trempée s'il y a un risque d'inondation ou avec des conditions de drainage défavorables. Ce n'est que dans un climat sec avec des conditions de drainage favorables que l'on devrait tenir compte de la conception sur la résistance de 0,75xOMC.</p>
13	<p>Pour chaque section uniforme, le programme DCP LVR AfCAP détermine le profil représentatif de la résistance de la couche (c'est-à-dire la valeur DN avec la profondeur et les valeurs requises pour la résistance des sol support et le niveau de trafic de la conception à la teneur en humidité à long terme prévue et la densité du champ.</p> <p>La Figure 5-7 montre un résultat typique du programme pp de l'AfCAP LVR pour l'analyse d'une section uniforme au moment de l'enquête sur le PCD :</p> <ol style="list-style-type: none"> a) Nombre de coups avec profondeur. b) L'équilibre de la chaussée par rapport aux courbes d'équilibre des chaussées standard (SPBC). c) Profil de résistance de couche in situ par rapport au profil de résistance de l'abaque.
14	<p>La comparaison du LSP représentatif pour chaque section uniforme avec le LSP requis, comme le montre l'abaque de conception DCP-DN (tableau 5-11) indique les exigences de mise à niveau en identifiant les couches de résistance et/ou d'épaisseur insuffisantes. Tableau 5-12</p>

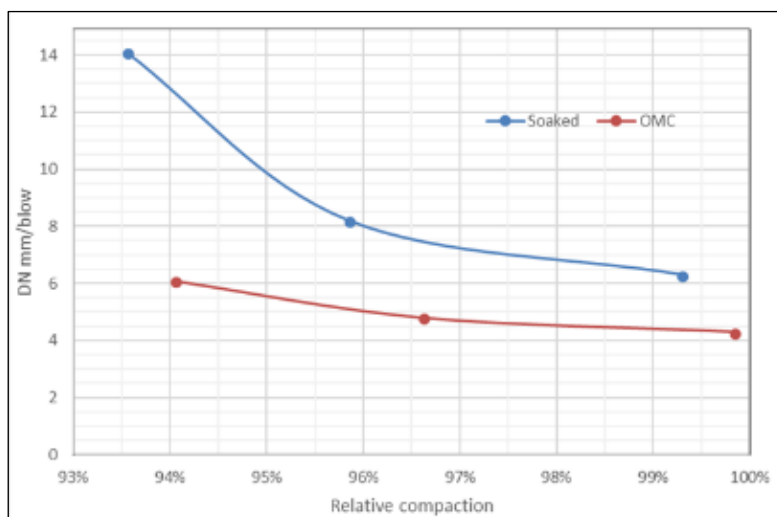


Figure 5-6: Résultats typiques des essais DCP en laboratoire

Tableau 5-11: programme des essais DN en laboratoire pour la détermination de la résistance à la conception des sol supports⁵

Zone climatique	Microclimat	Essais DN de laboratoire (à faire en triple)	
		Nombre à effort de compaction	Échantillon d'humidité lors des essais
Tous	Risque d'inondation, dans les zones marécageuses et/ou de mauvais état de drainage	2 à Lourd 2 à Intermédiaire 2 à Léger	Pour chaque effort de compaction : 1 à 4 jours trempés 1 à OMC
Humide et modéré	Aucun risque d'inondation, conditions de drainage raisonnables/bonnes	3 à Lourd 3 à Intermédiaire	Pour chaque effort de compaction : 1 à 4 jours trempés 1 à OMC
Sec		3 à Léger	

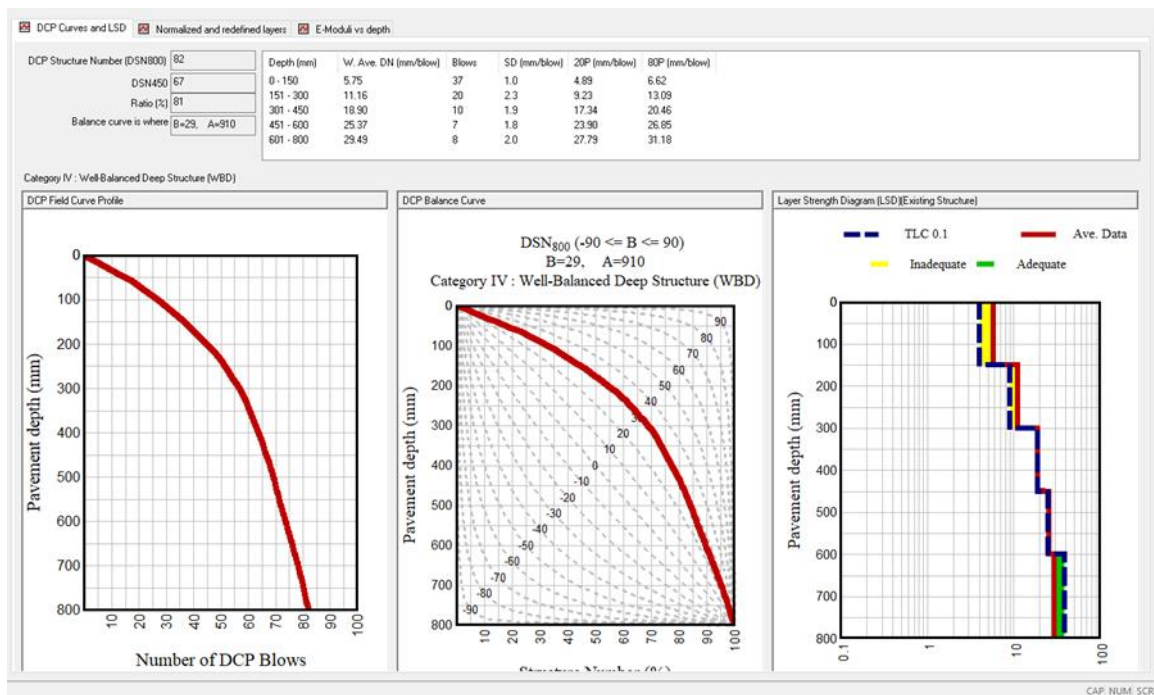


Figure 5-7: Résultat typique de l'analyse d'une section uniforme

(a) coups en fonction de la profondeur (b) équilibre des couches et (c) profil de résistance(layer balance) de l'abaque

5.3.2.2 Détermination des exigences en matière de couche de chaussée

L'exemple de profil de résistance des couches présenté à la Figure 5-7 est comparé dans le Tableau 5-11 avec le profil de résistance pour le niveau de trafic requis de l'abaque de conception (Tableau 5-12). La couleur rose indique les couches dont la résistance est insuffisante et la couleur verte indique les couches dont la résistance est suffisante par rapport à l'exigence de l'abaque de conception.

Tableau 5-12: Profil de résistance de couche en format tabulaire

Couche de chaussée (mm)	Valeur DN requise pour TLC 0.1	Section
		4 4.400 à 8.380 km
0-150	<=4	5.8
150-300	<=9	11
300-450	<=19	19
450-600	<=25	25
600-800	<=39	29

La méthode n'identifie pas les couches réelles d'une route existante par le changement de résistance entre elles, mais utilise une épaisseur fixe de 150 mm pour chaque couche supposée. Cela peut être modifié dans le logiciel d'analyse informatique DCP de l'AfCAP, mais le problème est que l'abaque de conception (Tableau 5-12) est fixé en couches de 150mm. S'il y a plusieurs couches de résistance différente dans les 150 mm, alors le logiciel caractérise les 150 mm au moyen d'une moyenne pondérée de DN. Cependant, la relation entre le DN et la capacité potentielle de transport est très non linéaire. Cela signifie que la résistance réelle de la couche de 150 mm sera surestimée. Le concepteur doit donc être vigilant pour identifier les situations où une couche relativement faible existe et pour concevoir un traitement correctif approprié.

Tableau 5-13: Abaque de conception DCP-DN pour différentes classes de charge de trafic (TLC)5

Class de Trafic MESA	TLC 0,01 0.003-0.01	TLC 0,03 0.01-0.03	TLC 0,1 0.03-0.10	TLC 0,3 0.1-0.3	TLC 0,7 0.3-0.7	TLC 1.0 0.7-1.0
Base de 0 à 150 mm ≥ 98% Mod. AASHTO	DN ≤ 8	DN ≤ 5,9	DN ≤ 4	DN ≤ 3,2	DN ≤ 2,6	DN ≤ 2,5
Fondation de 150 à 300 mm ≥ mod à 95%. AASHTO	DN ≤ 19	DN ≤ 14	DN ≤ 9	DN ≤ 6	DN ≤ 4,6	DN ≤ 4.0
300-450 mm couche de forme ≥ mod à 95%. AASHTO	DN ≤ 33	DN ≤ 25	DN ≤ 19	DN ≤ 12	DN ≤ 8	DN ≤ 6
450-600 mm couche de forme	DN ≤ 40	DN ≤ 33	DN ≤ 25	DN ≤ 19	DN ≤ 14	DN ≤ 13
600-800 mm Matériaux in situ	DN ≤ 50	DN ≤ 40	DN ≤ 39	DN ≤ 25	DN ≤ 24	DN ≤ 23
DSN ₈₀₀	≥ 39	≥ 52	≥ 73	≥ 100	≥ 128	≥ 143

Source: Ministère des Transports et des Travaux publics, Malawi, (2019).

En comparant le LSP représentatif avec les exigences de l'abaque de conception, les exigences de mise à niveau sont indiquées dans le Tableau 5-11. Dans cet exemple, aucune couche supplémentaire n'est nécessaire car toutes les couches sont suffisamment solides.

5.3.2.3 Exigences de mise à niveau

Les exigences de mise à niveau sont très similaires à celles décrites au point 5.3.1.1.

Option 1 : si le profil de résistance in situ de la route existante est conforme au profil de résistance requis indiqué dans l'abaque DCP-DN pour la classe de trafic concernée, la route devrait seulement être refaite, compactée et revêtue, en supposant que la route existante se trouve suffisamment au-dessus du niveau naturel du sol pour permettre les exigences de drainage nécessaires et que la chaussée existante est suffisamment large. Dans le cas d'un profil en creux, le sol de fondation doit être relevé pour obtenir un drainage adéquat en remplissant des couches conformes aux exigences de l'abaque de conception DCP-DN.

Option 2 : si le profil de résistance in situ de la route existante n'est pas conforme au profil de résistance requis pour la classe de trafic particulière, la ou les couches supérieures de la chaussée doivent être:

- 1) **Retravaillé** : Si seule la densité est insuffisante et que la valeur de DN requise peut être obtenue à la densité de construction spécifiée et à la teneur en humidité prévue en service.
- 2) **Recouvrement** : si la qualité du matériau (valeur DN à la densité de construction spécifiée et à la teneur en humidité en service prévue) est inadéquate, il faudra alors importer un matériau de qualité appropriée pour servir de nouvelle(s) couche(s) supérieure(s) de la chaussée.
- 3) **Stabilisé mécaniquement** : Comme ci-dessus, mais un nouveau matériau de meilleure qualité est mélangé au matériau existant pour améliorer la qualité globale de la couche.
- 4) **Augmentée** : Si la qualité du matériau (valeur DN) est adéquate mais que l'épaisseur de la couche est insuffisante, il faudra alors importer du matériau de qualité appropriée pour obtenir l'épaisseur requise avant le compactage.

Si aucune des options ci-dessus ne permet d'obtenir la qualité de matériau requise, il est possible de recourir à des options plus coûteuses, comme la stabilisation des sols. Toutefois, les exigences de conception et de construction des couches stabilisées ne relèvent pas du champ d'application de ce RRN qui se concentre sur l'utilisation de matériaux naturels ou légèrement traités chimiquement.

5.3.2.4 Les essais de laboratoire

La préparation des échantillons pour les matériaux dans les moules CBR et pour d'autres essais de classification en laboratoire pour la méthode DCP-DN suit les protocoles d'essai SANS de la République d'Afrique du Sud. Les méthodes ASTM ou AASHTO doivent être suivies uniquement si elles ne sont pas

disponibles. Il y a souvent des différences dans les résultats obtenus par les différentes méthodes d'essai. Il convient de noter qu'il n'existe pas de méthode SANS ou d'autres méthodes d'essai standard pour effectuer un essai DCP dans des moules. Bien que les limites de la granulométrie et de l'indice de plasticité du matériau ne soient pas spécifiées pour la méthode DCP-DN, les essais standard pour déterminer la distribution de la taille des particules, les limites d'Atterberg et les MDD/OMC doivent être effectués pour tous les échantillons de matériaux afin de permettre à l'ingénieur concepteur d'interpréter l'influence de ces propriétés sur la résistance du matériau dans les conditions prévues à long terme dans la chaussée.

La détermination de la résistance du matériau dans les conditions de densité de champ et d'humidité à long terme prévues est basée sur l'essai DN du laboratoire, ce qui en fait l'essai le plus important de la méthode de conception DCP-DN. Il est toujours recommandé de réaliser l'essai DCP au plus fort de la saison des pluies. Si cela n'est pas possible, les valeurs de DN doivent être ajustées en fonction des conditions de la saison humide.

La subdivision en sections uniformes limite la variabilité à l'intérieur des sections et donc le risque associé aux décisions de conception basées sur l'évaluation de la résistance moyenne de la chaussée in situ dans chaque section. En excluant les valeurs aberrantes de l'analyse CuSum, le risque est encore réduit. Cependant, tout point faible ainsi exclu doit ensuite être évalué séparément.

5.4 Risque lié à la performance des chaussées en général

Le risque de défaillance prématurée de la chaussée comprend deux éléments principaux, à savoir y :

- 1) le risque de défaillance parce que la plate-forme n'est pas protégée de manière adéquate, et
- 2) le risque de défaillance d'une des principales couches porteuses (fondation ou sous-fondation) en raison d'une faiblesse de la couche ou d'un véhicule très lourd.

Ces deux phénomènes peuvent être déclenchés par l'infiltration d'eau et le risque de l'un ou l'autre est accru si un entretien adéquat du drainage n'est pas effectué régulièrement et si de violentes tempêtes se produisent.

Les principales méthodes permettant de faire face aux différents niveaux de risque sont résumées dans le Tableau 5-13. S'il existe un risque perçu que la couche de fondation d'une route soit susceptible d'être saturée, une option consiste simplement à concevoir sur la couche de fondation de moindre résistance suivante (préférée) ou sur la catégorie de trafic immédiatement supérieure. En général, il est toujours possible de concevoir pour une plate-forme plus faible si des risques d'infiltration d'eau et d'affaiblissement par un mécanisme quelconque sont perçus, bien que cela ne soit pas toujours indiqué dans les manuels ou les guides.

Malheureusement, il s'est avéré difficile d'empêcher les véhicules lourds, souvent très surchargés, d'utiliser les LVR. On suppose souvent que les risques de défaillance des couches supérieures de la chaussée dus à la surcharge des véhicules sont corrélés au trafic cumulé, ce qui est généralement vrai. À mesure que le trafic augmente, le nombre d'essieux standard équivalents cumulés augmente également, et les méthodes de conception exigent toutes une structure plus solide pour faire face à l'augmentation du trafic. Cependant, il y a toujours un risque qu'une route transporte quelques véhicules fortement surchargés qui peuvent imposer des contraintes supérieures à celles que les matériaux peuvent supporter (par exemple des véhicules transportant des matériaux de construction denses). Les méthodes basées sur la CBR définissent une résistance minimale de la chaussée et de la fondation pour chaque classe de trafic qui devrait normalement être adéquate. Toutefois, si le spectre des charges à l'essieu dépasse la plage normalement prévue, ce qui pourrait mettre en péril la conception, le concepteur doit alors choisir un niveau de trafic plus élevé que celui strictement nécessaire sur la base des SEEE. Dans plusieurs des méthodes de conception, l'essai CBR standard par trempage est utilisé pour évaluer la résistance des matériaux de revêtement importés et bien que les conceptions développées dans certaines études récentes montrent clairement que les spécifications peuvent être réduites dans de nombreuses circonstances, le maintien des spécifications de résistance définies dans les différentes méthodes constitue un filet de sécurité pour les situations à haut risque.

Dans la méthode DCP-DN, les spécifications de résistance de la base et de la fondation de la route ainsi que du sol support sont également basées sur la teneur en humidité prévue, la densité de compactage et les

essieux standard équivalents cumulés et peuvent potentiellement couvrir une gamme plus large que dans les méthodes basées sur la méthode CBR. La méthode ne prévoit toutefois pas de choisir une classe de trafic plus élevée si un risque de surcharge est perçu.

Tableau 5-14: Réduction des risques

Méthode de conception	Défaillance du sol support	Défaillance de la couche de base	Autres
AASHTO, méthode	Conception pour sol support trempé	Il existe des options d'étalonnage adéquates pour renforcer la couche de base et/ou la fondation en utilisant : 1. Facteurs de drainage 2. Le facteur de fiabilité 3. Un niveau de service terminal inférieur	Exigences générales pour l'entretien en particulier du drainage et de l'alignement/Profil en travers
Overseas Road Note 31	1. Utilisez la valeur de résistance inférieure prévue 2. Option d'utilisation de CBR sous-dégradé trempé dans des situations graves	La résistance minimale des couches de chaussée (celles-ci sont légèrement conservatrices pour les LVRR	Exigences générales pour l'entretien en particulier du drainage et de l'alignement/Profil en travers
TRL-SADC	3 niveaux de protection 1. Abaques de conception pour deux climats différents. 2. Option de conception d'un sol support plus faible pour les scénarios à risque plus élevé	Résistance minimale de passage/défaillance pour la couche de base et la fondation afin d'éviter le risque de défaillance causé par des véhicules lourds supplémentaires.	Exigences générales pour l'entretien en particulier du drainage et de l'alignement/Profil en travers
DCP-DN	Concevoir l'épaisseur pour protéger le sol support lorsqu'il est à son équilibre à long terme la teneur en humidité	La DN des couches de chaussée augmente à mesure que la circulation diminue. Il n'y a pas de réduction spécifique des risques pour les camions plus lourds possibles, à l'exception de la catégorie du trafic cumulé (mesa). Mais il y a la possibilité d'utiliser une teneur en humidité plus élevée pour la conception (c.-à-d. la conception pour les sol support plus faibles).	Accent supplémentaire sur l'entretien en particulier du drainage et de l'alignement/Profil en travers

5.5 Structures revêtues alternatives

Les méthodes décrites ci-dessus sont basées sur des routes utilisant des matériaux granulaires non liés comme couches de revêtement, car ce sont les plus courantes et les plus populaires pour les LVRR. Toutefois, plusieurs autres structures sont également utilisées et peuvent présenter des avantages. Ceux-ci sont décrits ci-dessous.

5.5.1 Conception de routes avec des revêtements modulaires

Ces types de revêtement ne sont pas aussi courants que ceux construits avec des matériaux granulaires non liés et, par conséquent, la littérature concernant leur conception et leurs performances n'est pas aussi prolifique. Les pavés en blocs, tels que les revêtements modulaires en de béton et les briques, qui ont fait l'objet d'une conception adéquate, constituent l'exception. En utilisant les principes de la SN, ces conceptions peuvent être étendues à d'autres revêtements à éléments modulaires. Toutefois, leur succès dépend fortement de la compétence de l'entrepreneur et du maçon.

5.5.1.1 Pierres entassées à la main (HPS)

Le pavage HPS consiste en une couche de gros morceaux de pierre brisée (généralement de 150 à 300 mm d'épaisseur), serrés les uns contre les autres et calés en place avec des éclats de pierre plus petits, enfoncés à la main dans les joints à l'aide de marteaux et de tiges d'acier. Les vides restants sont remplis de sable ou de gravier. Un certain degré d'emboîtement est obtenu et a été supposé dans les conceptions présentées dans le Tableau 5-14. Les structures nécessitent également une couche de recouvrement lorsque la fondation est faible et une fondation conventionnelle en matériau G30 ou plus solide.

Le HPS est normalement posé sur une fine couche de sable (SBL). Une bordure ou un bord de trottoir construit, par exemple, avec de grosses pierres ou du mortier améliore la durabilité et la stabilité latérale.

Tableau 5-15: Épaisseurs conçues pour les pavés en pierre concassée à la main (HPS) (mm)

Classe de sol support (CBR)	TLC1	TLC2	TLC3	TLC4	TLC5
	< 01	0.01-0.1	0.1-0.3	0.3-0.5	0.5-1.0
S2 (3-4%)	150 HPS 50 SBL 175 G30	200 HPS 50 SBL 125 G30 150 G15 ^{1,2}	200 HPS 50 SBL 150 G30 200 G15 ^{1,2}	250 HPS 50 SBL 150 G30 200 G15 ^{1,2}	NA
S3(5-7%)	150 HPS 50 SBL 125 G30	200 HPS 50 SBL 200 G30	200 HPS 50 SBL 150 G30 150 G15 ^{1,2}	250 HPS 50 SBL 150 G30 150 G15 ^{1,2}	NA
S4(8-14%)	150 HPS 50 SBL 100 G30	200 HPS 50 SBL 150 G30	200 HPS 50 SBL 200 G30	250 HPS 50 SBL 200 G30	NA
S5(15-29%)	150 HPS 50 SBL <i>Note 3</i>	200 HPS 50 SBL <i>Note 3</i>	200 HPS 50 SBL <i>Note 3</i>	250 HPS 50 SBL <i>Note 3</i>	NA
S6(>30%)	150 HPS 50 SBL <i>Note 3</i>	200 HPS 50 SBL <i>Note 3</i>	200 HPS 50 SBL <i>Note 3</i>	250 HPS 50 SBL <i>Note 3</i>	NA

Notes:

1. La couche de couverture en matériau G15 (CBR trempé 15%) et la couche de base en matériau G30 (CBR trempé 30%) peuvent être réduites en épaisseur si un matériau plus résistant est disponible
2. La couche de couverture peut être du G10 (CBR trempé à 10 %) à condition qu'elle soit posée 7 % plus épaisse
3. Pour les sol support de CBR > 15 %, le matériau doit être scarifié et recompressé pour s'assurer que la profondeur du matériau de CBR in situ > 15 % est conforme aux recommandations du chapitre 6
4. HPS = pierre compactée à la main, SBL = couche de sable

5.5.1.2 Bloc de pierres de pavage

Le revêtement par pose de pierres consiste en une couche de pierres de taille grossièrement cubique (100 mm) posée sur un lit de sable ou de granulats fins dans des rebords de pierre ou de béton mortaisés. Les pierres individuelles doivent avoir au moins une face assez lisse pour être la face supérieure, ou surface, lorsqu'elles sont posées. Chaque pierre est ajustée à l'aide d'un petit marteau (de maçon), puis tapée en position au niveau des pierres environnantes. Du sable ou un agrégat fin est brossé dans les espaces entre les pierres et la couche est ensuite compactée à l'aide d'un rouleau. On suppose qu'il y a très peu d'imbrication entre les ensembles de pierres. Les conceptions structurelles appropriées sont présentées dans le Tableau 5-15.

5.5.1.3 Briques d'argile

Les briques d'argile cuites sont le produit de la cuisson de blocs moulés en argile limoneuse. Le revêtement est constitué d'une couche de briques de qualité technique posées en bordure, dans un lit de mortier et de bordures de chaque côté de la chaussée. Les épaisseurs sont indiquées dans le tableau 5-15 pour les TLC1 et TLC2. Les revêtements en briques d'argile cuites ne conviennent pas aux classes de circulation supérieures à la TLC2.

5.5.1.4 Cobble stones ou de pierres de taille ou pavés de blocs de béton

Les cobble stones ou en pierre de taille consiste en une couche de pierre de taille grossièrement rectangulaire posée sur un lit de sable ou de granulats fins dans des emprises en pierre mortaisée ou en béton. Les pierres individuelles doivent avoir au moins une face assez lisse, qui doit être la face supérieure ou de surface lorsqu'elles sont placées. Chaque pierre est ajustée à l'aide d'un petit marteau (de maçon), puis tapée en position au niveau des pierres environnantes. Du sable ou des agrégats fins sont brossés dans les espaces entre les pierres et la couche, puis compactés à l'aide d'un rouleau. Les pierres à paver ont généralement une épaisseur de 150 mm et les pierres de taille une épaisseur de 150 à 200mm. Ces options sont adaptées aux types de roches homogènes qui présentent des schémas de contrainte orthogonaux inhérents (comme le granit) qui permettent de casser facilement la roche fraîche dans les formes requises par des moyens basés sur la main-d'œuvre. La même technique est utilisée pour les pavés en blocs de béton. La seule différence est que les pavés sont fabriqués à partir de béton dans des moules. La Figure 5-8 montre des photographies de pavés en pierre de taille et en blocs de béton. Les épaisseurs sont indiquées dans le Tableau 5-15, sauf que l'épaisseur du pavé est généralement de 150 mm au lieu des 100 mm indiqués dans le Tableau 5-15.

Tableau 5-16: Dimensionnement d'épaisseurs pour divers revêtements à éléments modulaires (mm)

Classe de sol support (CBR)	TLC1	TLC2	TLC3	TLC4	TLC5
	< 01	0.01-0.1	0.1-0.3	0.3-0.5	0.5-1.0
S2 (3-4%)	100 DEL 25 SBL 100 G80 100 G30 100 G15	100 DEL 25 SBL 125 G65 150 G30 150 G15	100 DEL 25 SBL 150 G80 150 G30 175 G15	100 DEL 25 SBL 150 G80 175 G30 200 G15	100 DEL 25 SBL 150 G80 200 G30 200 G15
S3(5-7%)	100 DEL 25 SBL 125 G65 100 G30	100 DEL 25 SBL 150 G65 175 G30	100 DEL 25 SBL 125 G80 125 G30 150 G15	100 DEL 25 SBL 150 G80 150 G30 150 G15	100 DEL 25 SBL 150 G80 175 G30 175 G15
S4(8-14%)	100 DEL 25 SBL 150 G65	100 DEL 25 SBL 150 G65 100 G30	100 DEL 25 SBL 150 G80 150 G30	100 DEL 25 SBL 150 G80 200 G30	100 DEL 25 SBL 175 G80 225 G30
S5(15-29%)	100 DEL 25 SBL 125 G65	100 DEL 25 SBL 100 G65 125 G30	100 DEL 25 SBL 125 G80 125 G30	100 DEL 25 SBL 150 G80 125 G30	100 DEL 25 SBL 150 G80 150 G30
S6(>30%)	100 HPS 25 SBL 125 G65 <i>Note</i>	100 HPS 25 SBL 150 G65 <i>Note</i>	100 HPS 25 SBL 150 G80 <i>Note</i>	100 HPS 25 SBL 150 G80 <i>Note</i>	100 HPS 25 SBL 175 G80 <i>Note</i>
<p>Notes:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1 SBL est une couche de sable 2 La couche de couverture en matériau G15 (CBR trempé 15%) et la couche de base en matériau G30 (CBR trempé 30%) peuvent être réduites en épaisseur si un matériau plus résistant est disponible 3 La couche de couverture peut être du G10 (CBR trempé 10%) à condition qu'elle soit posée 7% plus épaisse 4 DEL = couche d'éléments modulaires, SBL = couche de sable 					



Dressed Stone



Concrete Block Pavers

Source: Cook et al. 2013

Figure 5-8: Pavés en béton et pierres entassées à la main

5.5.2 Méthodes de chaussées rigides

Ce type de chaussée a un coût initial élevé par rapport aux autres types, mais dure très longtemps si elle est bien construite. Ils sont bien adaptés à une utilisation sur des tronçons de route dont la pente est égale ou supérieure à 10 %, ou à des carrefours où les véhicules lourds effectuent un nombre important de virages. Ils sont également très bien adaptés à la construction à haute intensité de main-d'œuvre ou comme option à faible entretien pour les LVRR afin d'éviter un entretien constant. Toutefois, le coût initial est souvent élevé. Enfin, les chaussées en béton sont recommandées pour les sections de route conçues pour résister au climat. Les détails concernant l'utilisation des chaussées en béton comme option de résilience au climat se trouvent dans Johnson et al. (2019), notamment les informations relatives à la conception et à la construction des dalles de béton jointées, des pavés en blocs de béton, du béton géocellulaire et du béton compacté au rouleau.

Pour les routes à faible trafic, une couche de béton de 75 à 200 mm d'épaisseur placée sur une sous-fondation de 30 % de CBR, couvre la plupart des besoins du trafic sur des sous-fondations de 3 % de CBR et plus. Ainsi, le processus de conception n'est pas complexe. Pour les dalles de 100 mm ou moins, il est recommandé de les construire comme des chaussées en béton armé continu. Dans ce cas, il convient d'utiliser des armatures en acier à mailles. Les dalles de plus de 100 mm d'épaisseur peuvent être construites en béton ordinaire (non armé) - jointoyé et non érodé. Le béton doit être posé sur au moins 100 mm de matériau G30 compacté à 98% MDD Mod AASHTO. Sur les sous-niveaux de G30, le matériau doit être scarifié et recompressé pour s'assurer que la profondeur du matériau in situ est conforme aux recommandations.

Si une chaussée en béton simple sans joints est utilisée, les joints de dalles recommandés doivent être espacés de 4 à 5 m. Si la largeur de la chaussée est de 4,5 m ou plus, la largeur des dalles doit être égale à la moitié de la largeur de la chaussée. Sinon, pour les routes de 4,5 m de large ou moins, la largeur de la dalle peut être égale à la largeur de la chaussée. Les joints entre les dalles doivent être remplis de boue bitumineuse.

Le cube de béton (150 mm) doit avoir une résistance à la compression de 25 MPa ou plus à 28 jours de durcissement. Pour obtenir cette résistance, il faut utiliser une conception de mélange avec des matériaux à utiliser sur le site.

Pendant la construction, des coffrages de bonne qualité doivent être utilisés sur les bords pour assurer un bon compactage vibratoire. Des rainures doivent être pratiquées à la surface de la dalle après la prise initiale du béton pour améliorer la résistance au dérapage pendant l'utilisation. Une brosse métallique ou un balai peut être utilisé à cet effet.

Bien que les options de routes en béton soient généralement très durables, un bon drainage est toujours essentiel autour d'une chaussée en béton. Des défaillances se sont produites lorsque la dalle de béton a été sapée ou que le sol le long des bords a été érodé par l'eau courante. Les conceptions standard des routes en béton pour les LVR sont normalement disponibles dans les manuels énumérés dans la bibliographie.

5.6 Résumé des décisions clés

5.6.1 Matériaux

Le choix des matériaux est une décision majeure mais le respect des spécifications est la clé du succès. Il existe tout simplement de nombreuses options, mais peut-être pas beaucoup sur chaque site routier. Le Chapitre 3 traite des nombreuses façons dont les matériaux peuvent ne pas répondre aux spécifications et, dans de nombreux cas, de la manière de surmonter ces lacunes. Une situation courante se produit lorsque les matériaux ne répondent pas tout à fait aux spécifications mais, à moins que l'ingénieur concepteur n'ait l'expérience des matériaux en question, il n'est pas conseillé de s'écarter des spécifications. En cas de doute, il peut être conseillé de consulter un expert reconnu sur les matériaux en question.

5.6.2 Résistance du sol

Il existe essentiellement trois méthodes distinctes, mais la méthode utilisée doit être celle que les auteurs de la méthode de conception globale ont utilisée dans leur analyse des données à partir desquelles ils ont construit leur méthode de conception. Le Tableau 5-16 résume les options pour les méthodes considérées.

La plus faible condition prévue. Cela semble être un choix logique mais il est très difficile de le déterminer avec précision. Il est souvent suggéré de mesurer le niveau du sol sous une route voisine sur le même niveau de sol pendant la saison des pluies, mais non seulement cela risque de gêner l'entrepreneur ou le consultant, mais il y a une grande variabilité d'une année à l'autre, de sorte que le résultat peut ne pas être très représentatif. Deuxièmement, la route est généralement conçue pour au moins 15 ans, période au cours de laquelle de nombreux changements peuvent se produire et la période la plus faible peut se produire pour des raisons autres que le résultat direct du climat. Par exemple, un entretien insuffisant ou inadéquat, des pratiques agricoles.

Données empiriques à long terme. Ces dernières années, des données à long terme provenant d'études sur les performances des routes dans des climats modérés ont confirmé que, dans la plupart des circonstances, la teneur en humidité des couches de chaussée dépasse rarement la teneur en humidité optimale (MOC) pour le compactage au niveau de compactage prévu. Dans des conditions moins modérées, une teneur en humidité d'environ 0,75xOMC est souvent plus réaliste et ce n'est que dans des circonstances exceptionnelles que l'on trouve un état d'imprégnation. Dans certaines méthodes de conception, le choix est simplement laissé à l'expérience de l'ingénieur concepteur, sur la base d'une évaluation des caractéristiques de drainage de la route, principalement la hauteur de la couronne de la route au-dessus du fond du drain, la hauteur de la sous-fondation au-dessus du niveau probable de l'eau dans le drain latéral et l'étanchéité ou non des accotements de la route. Même avec ces caractéristiques, des risques supplémentaires peuvent survenir sur une période de conception de 15 ans. .

Une stratégie prudente à faible risque. Enfin, une stratégie à faible risque pour faire face aux pires conditions possibles consiste à supposer qu'à un certain stade de la conception de la route, la couche de forme sera saturée et que la conception sur la base de la valeur de résistance de la couche de forme sera l'option la plus sûre. Toutefois, cette méthode ne sera satisfaisante que si les tableaux de conception ont été élaborés en tenant compte de cette option. Toutefois, lorsque la couche de forme est très faible (< 3% CBR), un traitement spécial est généralement nécessaire et les plans de base peuvent ne pas tenir compte de cette valeur.

Tableau 5-17: Sélection de la résistance du sol pour la conception

Méthode conception	Résumé	Détails	Avantages
AASHTO	Basé sur un essai routier complet en un seul endroit et sur une plate-forme. Le niveau de sol est évalué comme une valeur pondérée basée sur les pires conditions prévues chaque mois, mais le concepteur ne s'y limite pas	L'équation de conception fournit 3 méthodes de calibrage de l'équation de conception basées sur les données de performance des routes locales. Les concepts d'essieux standards équivalents, de nombre structurel, de fiabilité (variabilité), de niveau de service sont des concepts développés lors de l'essai routier et sont utilisés dans le monde entier.	<p>Peut être utilisé partout à condition que des données sur les performances des routes soient disponibles pour calibrer la méthode et élaborer un abaque de conception. Ceci est essentiel.</p> <p>Le concepteur peut choisir n'importe quel taux d'humidité pour la classe de conception du sol en fonction de l'évaluation du risque.</p> <p>La résistance des couches de la chaussée est variable dans le cadre du concept SN et de la gamme utilisée dans l'essai routier</p>
ORN 31	Basé sur la valeur la plus faible prévue.	<p>Trois catégories de climat sont définies en fonction de la profondeur de la nappe phréatique et des caractéristiques techniques de la plate-forme pour produire la valeur la plus faible prévue de CBR de la plate-forme.</p> <p>La résistance des couches de la chaussée est l'essai CBR traditionnel de résistance minimale à l'imprégnation</p>	Seules la catégorie climatique générale, la profondeur de la nappe phréatique et les propriétés de base du sol de fondation sont requises, mais le concepteur peut choisir n'importe quelle teneur en humidité en fonction de l'évaluation des risques..
TRL-SADC	<p>Sur la base de la CBR in situ des chaussées dont les performances ont été contrôlées pour élaborer les chartes de conception.</p> <p>Le concepteur n'a pas besoin d'estimer la résistance du sol</p> <p>L'abaque de conception montre la CBR de la fondation trempée de ces chaussées et non la valeur in situ.</p>	<p>Le sol de fondation est mesuré à l'état trempé, mais cela permet simplement d'identifier la résistance du sol de fondation à utiliser dans la charte de conception pour s'assurer que la bonne charte est utilisée.</p> <p>Deux abaques de conception sont utilisés selon que les conditions sont modérées ou sèches avec un bon drainage et un pour les conditions qui</p>	<p>Trois niveaux de risque sont pris en compte.</p> <p>Les spécifications des matériaux sont exhaustives et le risque de défaillance est donc faible.</p>

Méthode conception	Résumé	Détails	Avantages
		<p>devraient être plus humides..</p> <p>Pour les conditions sévères, une classe supérieure ou une CBR de qualité inférieure peut être utilisée.</p> <p>La résistance des couches de la chaussée est l'essai CBR traditionnel de résistance minimale à l'imprégnation, mais les valeurs sont réduites pour les niveaux de trafic inférieurs.</p> <p>Cinq classes de trafic inférieures à 1,0 mesa ont été prévues. Cela permet de réduire la surdimensionnement.</p>	
FOUNDATION Class	<p>Pour chaque résistance du sol, la méthode consiste à unifier la conception des couches inférieures de la chaussée pour former la même fondation qui est utilisée pour tous les niveaux de trafic. Quatre fondations de ce type sont définies</p>	<p>Basé sur un essai CBR trempé. La résistance des couches de chaussée est l'essai CBR trempé traditionnel de résistance minimale à l'échec, mais les valeurs sont réduites pour les niveaux de trafic inférieurs..</p>	<p>Comme pour la plupart des méthodes, le concepteur peut choisir un niveau de fondation inférieur ou une classe de trafic supérieure en fonction de l'évaluation des risques.</p> <p>Les fondations peuvent se voir attribuer un niveau de fiabilité différent de celui des couches de la chaussée</p> <p>Les essais des fondations deviennent très routiniers et augmentent considérablement la qualité finale</p>
ORN 18 -DCP (DCP-CBR)	<p>C'est une méthode de conception pour la réhabilitation. C'est la méthode ORN 18 avec le DCP pour fournir des données suffisantes et le programme TRL DCP pour aider à l'analyse</p>	<p>La résistance de la couche de fondation est celle de la route existante et n'est pas évaluée ici</p>	<p>L'utilisation du DCP dans cette méthode, ainsi que dans d'autres méthodes d'évaluation in situ, permet de détecter facilement les points faibles en vue d'un examen plus approfondi et d'un traitement ultérieur. Les zones de faiblesse peuvent être le résultat d'un mauvais drainage, d'une densification ou d'une dégradation des matériaux.</p>
DCP-DN	<p>L'essai DCP remplace complètement l'essai CBR, tant sur le terrain qu'en laboratoire..</p>	<p>Basé sur la résistance des couches de fondation et de la chaussée in situ</p>	<p>L'utilisation du DCP dans cette méthode, ainsi que dans d'autres méthodes d'évaluation in situ, permet de détecter facilement les points faibles</p>

Méthode conception	Résumé	Détails	Avantages
			pour un examen plus approfondi et un traitement ultérieur. Les zones faibles peuvent être le résultat d'un mauvais drainage, d'une densification ou d'une dégradation des matériaux.
Méthodes Empiriques Pure	Macadam, Bases de Telford, HPS. Nécessite une estimation de la résistance du sol dans le pire des cas, mais l'estimation n'est pas critique		Utilise des matériaux grossiers qui pourraient être rejetés. Résistant au climat car la résistance du matériau est peu affectée par l'immersion ou la saturation.
Chaussée Rigide	Méthode standard tirée du manuel de conception		

5.7 Résumé des points forts et des limites des méthodes de conception

Ce résumé se concentre sur certains points forts et limites clés (Tableau 5-17) mais l'absence de commentaire concernant un aspect quelconque ne doit pas être considérée comme négative ou positive. Les commentaires présentés ici mettent en évidence des caractéristiques notables et ne doivent pas être considérés comme exhaustifs.

Tableau 5-18: Résumé des points forts et des limites des méthodes de conception des chaussées

Méthode	Points forts	Limitations
AASHTO	<p>Peut être facilement adapté ou calibré pour s'adapter à un large éventail de conditions.</p> <p>Les propriétés des matériaux, y compris les particules très grossières, peuvent être incorporées avec précision.</p> <p>C'est la seule méthode qui inclut un véritable facteur de fiabilité qui reconnaît la variabilité inhérente aux performances de la route.</p> <p>Largement utilisée aux États-Unis (et ailleurs), elle fait l'objet d'une littérature, d'un débat et d'un retour d'information considérables parmi les praticiens.</p>	<p>Les données de base sur les performances ont été dominées par le climat du nord des États-Unis, caractérisé par des conditions de gel et de dégel et par un sol support très faible, d'où la nécessité d'un calibrage minutieux pour les différents climats</p> <p>Pas suffisamment testé sur des sol support solides</p> <p>Principalement pour les routes à fort trafic, le manuel est donc un document substantiel, mais cela ne devrait pas dissuader les utilisateurs. Il est utilisé avec succès aux États-Unis depuis 60 ans et dans de nombreux autres pays.</p>
ORN 31	<p>La résistance du sol pour la conception peut être basée sur n'importe quelle teneur en humidité.</p> <p>Propose des conceptions pour 8 types de routes, y compris des fondations stabilisées</p> <p>Il est utilisé avec succès depuis plus de 40 ans dans un large éventail de climats.</p>	<p>N'est pas spécifiquement conçu pour les classes LVR les plus basses et ne fournit que 3 classes de trafic inférieures à 1,0 mésa.</p> <p>Pour les LVR, les spécifications des matériaux peuvent être prudentes, la méthode peut donc être plus coûteuse si d'autres matériaux appropriés sont disponibles..</p>

Méthode	Points forts	Limitations
TRL-SADC	<p>Propose deux abaques de conception basées sur le climat et la qualité de drainage de base et pour une gamme de différents types de routes adaptées aux LVR</p> <p>Fournit 5 classes de trafic jusqu'à 1,0 méga</p> <p>Traite de la résistance des fondations pour la conception en utilisant une méthode très pragmatique qui décourage la surdimensionnement.</p> <p>Les spécifications des matériaux sont complètes mais ont été adaptées à un niveau pragmatique adapté à la tâche d'un LVR et assouplies le cas échéant pour ce faire.</p> <p>Il s'agit essentiellement d'une version actualisée de l'ORN 31 pour les LVR, mais avec des spécifications de matériaux modifiées pour tenir compte des résultats de recherches récentes.</p>	<p>Plusieurs spécifications de matériaux doivent être respectées et le coût initial peut donc être un peu plus élevé que pour d'autres méthodes.</p> <p>D'après des recherches menées dans des climats relativement modérés.</p>
Foundation Class	<p>La construction de fondations fiables qui peuvent être facilement et régulièrement vérifiées par la mesure de la capacité portante au moyen d'essais sur plaque (FWD, LWD et essai sur plaque) et améliorées si nécessaire constitue une méthode très précieuse pour faciliter la construction d'une route uniforme et de haute qualité avec une fondation qui devrait bien servir pendant plusieurs vies de conception. La grande zone d'essai sur plaque permet également d'évaluer les contraintes de masse des matériaux contenant de grosses particules.</p> <p>La méthode est flexible car la fondation peut être construite avec un niveau de fiabilité différent de celui des couches de la chaussée.</p> <p>En principe, la méthode peut être adaptée pour être utilisée dans d'autres méthodes de conception</p>	<p>Elle exige la disponibilité d'équipements pour les essais (FWD, LWD, Plate bearing) pendant la construction pour que tous les avantages soient réalisés et elle exige que l'industrie locale de la construction routière se familiarise avec la méthode et que celle-ci devienne une routine.</p> <p>Basé sur des recherches en Afrique de l'Est et donc pas sur un climat extrême</p>
ORN 18 DCP-CBR	<p>La détection des couches est automatique ; elle n'est pas prédéterminée. Cela permet d'identifier et d'éliminer ou de traiter d'une autre manière les poches de fines couches faibles.</p> <p>Des sections uniformes peuvent être assignées en utilisant plusieurs paramètres différents (résistance du support, résistance de la couche, épaisseur, nombre total de structures, etc.) et donc une section dynamique des couches qui reflète la variabilité de chacun des paramètres peut améliorer la sélection des couches uniformes. Les erreurs ou les inexactitudes dans le calcul de la moyenne de la résistance</p>	<p>Ne convient qu'à l'amélioration ou à la réhabilitation d'une route existante</p> <p>L'utilisation du DCP signifie que le concepteur ne peut pas savoir avec certitude lequel des facteurs (teneur en humidité, répartition de la taille des particules ou densité) influence la résistance in situ. Ainsi, par exemple, l'amélioration du drainage peut suffire au lieu d'une nouvelle couche, mais d'autres essais en laboratoire peuvent également être effectués pour résoudre ce problème. Cela concerne tous les produits à base de DCP</p> <p>La méthode n'est pas applicable aux routes nécessitant des coupes profondes et des remblais de plus de 1,5 m, car la longueur d'une tige de DCP</p>

Méthode	Points forts	Limitations
	des couches, causées par la non-linéarité de la capacité de transport du trafic par rapport à l'épaisseur, sont très sensiblement réduites..	(y compris l'extension) ne peut pas pénétrer au-delà de cette profondeur.
DCP-DN	<p>L'utilisation d'un PDC pour identifier les sections uniformes permet d'économiser sur le coût des puits d'essai.</p> <p>La méthode est moins stricte en ce qui concerne les spécifications des matériaux, d'où la possibilité d'utiliser différents matériaux disponibles localement.</p> <p>Le processus de conception peut être réalisé avec un minimum d'équipement de laboratoire, comme c'est le cas dans un certain nombre de pays à faible revenu.</p>	<p>Pas encore établi dans des climats plus sévères, mais en cours d'essai dans plusieurs pays.</p> <p>Des spécifications moins strictes en matière de matériaux signifient que la sélection des matériaux pourrait entraîner un risque accru pour l'ingénieur le moins expérimenté.</p> <p>La méthode suppose que le sol de fondation se trouve toujours à 450 - 800 mm sous la surface de la chaussée finie. Ce n'est pas toujours le cas.</p> <p>La méthode n'est applicable qu'aux matériaux naturels non traités.</p> <p>L'instrument DCP seul ne peut pas être utilisé pour l'identification in situ de sections uniformes sur des routes nécessitant des coupes profondes et des remblais de plus de 1,5 m, car la longueur d'une tige DCP (y compris l'extension) ne peut pas pénétrer au-delà de cette profondeur.</p>
Méthodes purement empiriques	<p>Utilise des matériaux très grossiers qui sont autrement rejetés par plusieurs méthodes. Ces matériaux peuvent être extraits ou obtenus à partir de plantes de broyage.</p> <p>Souvent basé sur la main-d'œuvre et donc créateur d'emplois.</p> <p>Souvent très adapté comme option de résistance au climat, car la résistance des matériaux n'est pas affectée par le trempage ou la saturation.</p> <p>Le contrôle de la qualité pendant la construction n'est pas un défi majeur</p>	<p>Peu de régions disposent d'une abondance de roches adaptées</p> <p>Souvent lent à construire</p>
Méthode de la chaussée rigide	<p>Très bien adapté comme option de résilience au climat car les résistances des matériaux sont peu affectées par l'immersion ou la saturation.</p> <p>Convient bien aux pentes très raides.</p> <p>Le contrôle de la qualité pendant la construction n'est pas un défi majeur.</p> <p>Faibles coûts de maintenance</p>	<p>Coût initial élevé de la mise en place de l'option</p> <p>Il faut un durcissement suffisant pour que la conception soit réalisée - ce qui n'est pas toujours possible dans les régions où l'eau est rare ou où la supervision est médiocre.</p>

Bibliographie

American Association of State Highway and Transportation Officials. (1993). **AASHTO Guide for Design of Pavement Structures**. Washington, D.C., USA.

Administração Nacional de Estradas (ANE). (2016). **Manual for the Provision of Low Volume Roads**. Maputo, Mozambique.

Australian Road Research Board. (1995). **Sealed Local Roads Manual: Guideline to Good Practice for the Construction, Maintenance and Rehabilitation of Pavements**. ARRB, Transport Research Ltd., Australia.

Cook, J. R., Petts, R. C., and Rolt J., (2013). **Low Volume Rural Road Surfacing and Pavements: A Guide to Good Practice**. DFID, UK.

De Beer, M. (1991). **Use of the dynamic cone penetrometer (DCP) in the design of road structures**. Research Report DPVT-187. Department of Roads and Transport Technology, CSIR, Pretoria. RSA.

Department of Transport of South Africa. (1996). **TRH 4 Structural Design of Flexible Pavements for Inter-Urban and Rural Roads**. ISBN 1-86844-218-7. Pretoria, South Africa.

Emery, S J. (1988). **The prediction of moisture content in untreated pavement layers and an application to design in Southern Africa. DRTT Bulletin 20**. CSIR Research Report 644. CSIR, Pretoria, RSA.

Ethiopian Road Authority (2013). **Pavement rehabilitation and overlay design manual**. Addis Ababa, Ethiopia.

Ethiopian Road Authority. (2017). **Design of Low Volume Roads**. Addis Ababa, Ethiopia.

FHWA. (2012). **Field Reference Manual for Quality Concrete Pavements**. Publication No. FHWA-HIF-13-059 September 2012. Accessible at <https://www.fhwa.dot.gov/pavement/concrete/pubs/hif13059.pdf>.

FHWA. (2017). **Tech Brief: Bases and subbases for concrete pavements**. FHWA-HIF-16-005 Aug 2017. Accessible at:

<https://www.fhwa.dot.gov/pavement/concrete/pubs/hif16005.pdf>

Gourley, C. S. and Greening, P. A. K. (1999). **Performance of low volume sealed roads: results and recommendations from studies in Southern Africa**. TRL Project Report PR/OSC/167/99. Project Record 6020. Transport Research Laboratory, Crowthorne. UK.

Giummarra, G. (1995). **Sealed local roads manual**. ARRB Transport Research Ltd., Brisbane, Australia.

Highway Research Board. (1962). **The AASHO Road Test, Report 7. Summary Report**. Highway Research Board Special Report No 61G. Washington, DC, National Research Council.

Indian Roads Congress. (2014). **Guidelines for design and construction of cement concrete pavements for low-volume roads**. IRC:SP:62-2014, New Delhi. (Includes an excel file tailored for low-volume road structural design).

Irwin, H. I. (1994). **Practical realities and concerns regarding pavement evaluation**. 4th International Conference on the Bearing Capacity of Roads and Airfields, Minneapolis, USA.

Johnson, S., Faiz, A., Visser, A. (2019). **Concrete Pavements for Climate Resilient Low-Volume Roads in Pacific Island Countries**. © World Bank. Creative Commons Attribution (CC BY 3.0 IGO).

Jordaan, G. J. (1994). **Pavement rehabilitation design based on pavement layer component tests (CBR and DCP)**. Department of Transport Project Report PR 91/241, Pretoria.

Keller, G. and Sherar, J. (2003). **Low Volume Road Engineering: Best Management Practice Field Guide**. US Agency for International Development, USA.

Kleyn, E.G. (1984). **Aspects of pavement evaluation and design as determined with the aid of the Dynamic Cone penetrometer**. (In Afrikaans), M Eng Thesis, University of Pretoria., South Africa.

- Kleyn, E. G. and van Zyl, G. D. (1988). ***Application of the DCP to Light Pavement Design***. First Int. Symposium on Penetration testing, Orlando, USA.
- Kleyn, E. G. and Savage, P. V. (1981). ***The application of the pavement DCP to determine the bearing properties and performance of road pavements***. Proceedings of the International Symposium on Bearing Capacity of Roads and Airfields, Trondheim, Norway.
- Kleyn, E. G. and Steyn, W. J. vd M. (2010). ***Pavement strength balance and its practical implications***. 10th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa. Natal, RSA.
- MILLARD, R. S. (1993). ***Roadmaking in the tropics: materials and methods***. Transport Research Laboratory State of the Art Review. Her Majesty's Stationery Office, London.
- Ministry of Transport, Vietnam: RRST. (2007). ***Guidelines: Rural Road Pavement Construction – RRST Options***. Intech Associates/TRL in association with ITST. Vietnam.
- Ministry of Transport Housing and Urban Development Kenya (MoTIHUD). (2017). ***Pavement Design Guideline for Low Volume Sealed Roads***. Nairobi, Kenya.
- Ministry of Transport and Public Works, Malawi, (2019). ***Low Volume Roads Manual. Volume 1: Pavement Design***. Lilongwe, Malawi.
- Morosiuk, G., Gourley, C. S., Toole, T. and Hine, J. (2000). ***Whole life performance of low volume sealed roads in Southern Africa. TRL Annual Review***. Transport Research Laboratory, Crowthorne, Berkshire, UK.
- Neuman, T. R. (1999). ***Design Guidelines for Very Low-Volume Local Roads (<400 ADT)***, Final Report of NCHRP Project 20-7(75), CH2M Hill Chicago, Illinois.
- Nunn, M., Brown A., Weston, D., and Nicholls, J. C. (1997). ***Design of long-life flexible pavements for heavy traffic***. TRL Report 250. Transport Research Laboratory, Crowthorne, Berkshire, UK.
- Paige-Green, P. (1991). ***Recommendations on the use of marginal base course materials in low volume roads in South Africa***. Research Report RR 91/201, Department of Transport, Pretoria, RSA.
- Paige-Green, P. (1999). ***Materials for sealed low volume roads***. Transportation Research Record 1652, TRB, National Research Council, Washington, DC.
- Paige-Green, P. (2003). ***The strength and behaviour of materials for low volume roads as affected by moisture and density***. Transportation Research Record 1819, TRB, National Research Council, Washington, DC.
- Paige-Green, P. and Pinard, M. I. (2012). ***Optimum design of sustainable sealed low volume roads using the dynamic cone penetrometer (DCP)***. 25th ARRB conference, Perth. ARRB, Australia.
- Paige-Green, P. and van Zyl, G.D. (2019) ***A Review of the DCP-DN Pavement Design Method for Low Volume Sealed Roads: Development and Applications***. Journal of Transportation Technologies, 9, 397-422. <https://doi.org/10.4236/jtts.2019.94025>.
- Pinard M. I., Paige-Green, P. and Hongve, J. (2015): ***Developments in Low Volume Roads Technology: Challenging Traditional Paradigms***. Conference on Asphalt Pavement for Southern Africa, Sun City, South Africa.
- Pinard, M. I., van Zyl G. D., & Hongve, J. (2019). ***Evaluation of Cost-Effectiveness and Value-for-Money of DCP-DN Pavement Design Method for Low-Volume Roads in Comparison with Conventional Designs***. Final Evaluation Report. AFCAP Project RAF 2128A, RECAP, Cardno, Thame.
- Rolt, J., Mukura, K., Dangare, F. and Otto, A. (2013). ***Back analysis of previously constructed rural roads in Mozambique***. African Community Access Programme Project MOZ/001/G. CPR 1612. DFID, UK.
- Rolt, J., Smith, H. R. and Jones, C. R. (1986). ***The design and performance of bituminous overlays in tropical environments***. Proc. 2nd Int. Conf. on the Bearing Capacity of Roads and Airfields. Plymouth, UK.

Rolt, J., Williams, S. G., Jones, C. R. and Smith, H. R. (1987). ***Performance of a full scale pavement design experiment in Jamaica***. Transportation Research Record 1117. Transportation Research Board, Washington DC

Samuel, P. and Done, S. (2005). ***DCP analysis and design of low volume roads by the new TRL software UK-DCP***. Sustainable Access and Local Resource Solutions. PIARC. November 2005.

Southern Africa Development Community (SADC). (2003). ***Guideline on Low-volume Sealed Roads***. SADC House, Gaborone, Botswana.

South East Asia Community Access Programme (SEACAP). (2009). ***Low Volume Rural Road Environmentally Optimised Design Manual***. Department of Roads, Ministry of Public Works and Transportation, Lao PDR.

Smith, R.B. and Pratt, D. N. (1983). ***A field Study of in situ California Bearing Ratio and Dynamic Cone Penetrometer testing for Road Subgrade Investigations***. Australian Road Research, 13, No. 4, 1983, 285-94.

The United Republic of Tanzania, Ministry of Works, Transport and Communication. (2016). ***Low Volume Roads Manual, 2016***. Ministry of Works, Transport and Communication, Dar es Salaam, Tanzania.

Transport Research Laboratory (1993). ***A guide to the structural design of bitumen-surfaced roads in tropical and sub-tropical countries***. Overseas Road Note 31 (Fourth Edition). TRL, Crowthorne, UK.

Transport Research Laboratory. (1993). ***Measuring Road Pavement Strength and Designing Low Volume Sealed Roads Using the Dynamic Cone Penetrometer***. Unpublished Project Report UPR/IE/76/06. Project Record No. R7783. TRL Limited, Crowthorne, Berkshire, UK.

Transport Research Laboratory. (1993). ***Overseas Road Note 31. A guide to the structural design of bitumen-surfaced roads in tropical and sub-tropical climates***. Overseas Centre, TRL, Crowthorne, Berkshire, UK. (4th edition).

Transport Research Laboratory. (1999). ***Overseas Road Note 18 A guide to the pavement evaluation and maintenance of bitumen-surfaced roads in tropical and sub-tropical countries***. TRL Limited, Crowthorne, UK.

Transport Research Laboratory. (2002). ***Overseas Road Note 19 A guide to the design of hot mix asphalt in tropical and sub-tropical countries***. TRL Ltd., Crowthorne, UK.

Transport Research Laboratory. (2004). ***UK DCP version 2.2***. TRL Limited, Wokingham, UK.

Wolff, H., Emery, S. J., van Zyl, G. D .and Paige-Green, P. (1995). ***Design Catalogue for Low-Volume Roads Developed for South African Conditions***. Proc. Sixth Int. Conf. on Low-Volume Roads, Minneapolis, Minnesota, USA.

Design of Low Volume Roads Using the DCP-DN Method. (To be published in 2021)

6 CONCEPTION DE ROUTES NON REVÊTUES

6.1 Contexte

Dans leur forme la plus simple, les routes non revêtues sont constituées de pistes ou de chemins de terre sur lesquels les marchandises ou les personnes sont déplacées directement sur la surface matérielle in situ. Dans certains cas, cette surface peut être scarifié, façonnée et compactée (aménagée), mais en général, le seul compactage est celui appliqué par les véhicules qui la parcourent (non aménagée). Il arrive un moment avec ces routes où le passage est excessivement affecté par les conditions météorologiques et où les véhicules ne peuvent plus traverser la route en cas de mauvaises conditions.

Ce problème est résolu en appliquant un matériau sélectionné avec des propriétés spécifiques sur le matériau in-situ pour assurer un passage par tous les temps et les routes deviennent alors des routes de terre. Les routes avec une couche de roulement en gravier ne devraient être sérieusement envisagées que lorsque :

- 1) L'entretien est garanti ;
- 2) la qualité du gravier est adéquate ;
- 3) les quantités de gravier sont disponibles ;
- 4) les distances de transport sont courtes ;
- 5) les précipitations sont faibles à modérées ;
- 6) Il n'y a pas de fortes pentes ;
- 7) La poussière ne constitue pas une contrainte ;
- 8) Les niveaux de trafic sont faibles (moins de 300 vpd).
- 9) L'état du sol par temps humide ne permet pas le passage sans un certain renforcement structurel.

Les routes non revêtues peuvent généralement accueillir un maximum d'environ 200 à 300 véhicules par jour (moins de 10 % étant lourds), mais dans les zones où les matériaux sont pauvres, la mise aux normes du revêtement peut souvent se justifier économiquement pour des volumes de trafic bien inférieurs.

6.2 Objectif et portée

Ce chapitre traite de la fourniture de routes qui ne sont pas du tout revêtues. Ces routes sont soit des routes à revêtement naturel (ENS), soit des routes revêtues d'une couche de gravier non liée. L'objectif de ce chapitre est de fournir des conseils sur les meilleures pratiques en matière de conception de ces routes de manière économique et durable, afin d'atteindre et de maintenir les niveaux de qualité appropriés.

Les routes non revêtues nécessitent plus de soins que les routes revêtues. Lorsqu'elles sont bien construites et entretenues, leurs performances peuvent être très satisfaisantes et une grande partie de leurs couches peut finalement être pleinement utilisée dans une route revêtue si ou quand il est décidé de les améliorer.

Une analyse documentaire complète a été réalisée dans le cadre de ce projet et la littérature internationale montre qu'il existe deux écoles de pensée bien distinctes concernant la conception des routes non revêtues. La première est qu'une conception structurelle complète est nécessaire et que la profondeur et la résistance de la structure sous la surface en gravier doivent être identiques ou très similaires à celles d'une route revêtue. Cette approche est très coûteuse et inutile dans la plupart des situations, pour plusieurs raisons. Premièrement, toute déformation profonde induite par la structure est corrigée avant qu'elle ne devienne grave par un nivellement régulier et, deuxièmement, sur une route non revêtue à faible volume, la canalisation des roues des véhicules est moins concentrée que sur une route revêtue et la défaillance de la structure est donc beaucoup moins susceptible de se produire. Les routes non revêtues qui remplissent une fonction différente et qui doivent supporter un trafic beaucoup plus important et plus lourd font exception à cette règle. Toutefois, ces routes ne sont pas classées comme des routes à grande circulation et ne relèvent donc pas du champ d'application du présent guide. La deuxième école de pensée est que les routes en terre ne nécessitent pas de conception structurelle et qu'il faut se concentrer sur la fourniture d'une couche de roulement appropriée.

La dernière version du guide de la Federal Highways Administration (FHWA), "Gravel Roads Construction and Maintenance Guide ; FHWA Technology Partnership Programs, 2015", réécrit les recommandations de l'édition précédente publiée en 2000. Les recommandations formulées ici sont donc considérées comme les meilleures pratiques actuelles.

L'approche adoptée dans ce chapitre est donc qu'un ENS doit être fourni le cas échéant. Lorsque le niveau de trafic dépasse 25 véhicules par jour ou pour un accès de base sur un sol très riche en argile dans des conditions humides, il faut alors envisager des routes en terre. Pour les routes en terre, il est recommandé de se concentrer sur la recherche d'un matériau de couche de roulement approprié. Les exigences structurelles doivent être considérées comme secondaires car toute défaillance structurelle est facilement corrigée par un nivellement d'entretien de routine. Cette approche sera différente de celle qui est donnée dans de nombreux manuels nationaux.

6.3 Principes de bonne conception des routes non revêtues

Les principes suivants s'appliquent pour une bonne conception :

- 1) La hauteur de la couronne de la route en terre doit être d'au moins 350 mm au-dessus du lit du drain.
- 2) Lorsque la topographie le permet, des drains longitudinaux larges et peu profonds sont préférés. Ils minimisent l'érosion et ne se boucheront pas aussi facilement que les fossés étroits. Les fossés s'engazonnent avec le temps, ce qui lie la surface du sol et ralentit encore la vitesse de l'eau, deux facteurs qui contribuent à prévenir ou à réduire l'érosion. Les drains latéraux doivent être d'un mètre au niveau du radier avec des pentes latérales de 1:3.
- 3) La surface des routes en terre doit être nivelée et compactée pour fournir une surface de roulement durable et plane pour la circulation et la surface de la route doit avoir une cambrure minimale de 5 à 7 % pour garantir que l'eau s'écoule de la surface et dans les drains latéraux.
- 4) Les zones présentant des problèmes spécifiques (généralement dus à l'eau ou au mauvais état du sol) peuvent être traitées de manière isolée par le remplacement localisé du sol, le gravillonnage, l'installation de ponceaux, le rehaussement de la chaussée ou l'installation d'autres mesures de drainage. C'est la base d'une approche d'"amélioration ponctuelle".
- 5) L'eau doit être évacuée des drains latéraux de la chaussée en creusant des drains à onglet pour détourner l'écoulement vers l'espace ouvert. L'espacement des drains à onglet ne doit pas dépasser 100 m. La largeur au niveau du radier du drain doit être de 0,4 m à 0,6 m, avec une ouverture élargie à l'extrémité pour répartir l'eau et éviter l'affouillement.
- 6) Quoi qu'il en soit, les routes en terre qui ont été bien compactées ont tendance à présenter une perte de gravier nettement inférieure et une meilleure qualité de roulement. De plus, un gravier dense et bien nivelé aura de meilleures performances que des matériaux mal nivelés.

La conception des chaussées, qu'elles soient revêtues ou non, exige une connaissance du trafic prévu et de la résistance du sol de fondation. Pour la conception structurelle de la chaussée des LVR, trois classes de trafic ont été définies comme indiqué dans le tableau 6-1.

Tableau 6-1 Classes de trafic pour la conception des routes en terre

Intervalle de trafic (mesas)	LVR1	LVR2	LVR3	
	< 0.01	0.01 – 0.1	0.1 – 0.3	

Pour obtenir un drainage extérieur adéquat, la route doit également être surélevée par rapport au niveau du sol existant de manière à ce que le sommet de la route soit maintenu à une hauteur minimale (h_{min}) au-dessus des

radiers de drainage. La hauteur minimale dépend du climat et de la classe de conception de la route, comme indiqué dans le tableau 6-2.

Tableau 6-2: Hauteur minimale (h_{min}) entre le sommet de la route et le niveau d'inversion du drain.

Classe de route	Facteur climatique $N^{(1)}$	
	Humide ($N < 4$)	Sec ($N > 4$)
	h_{min} (mm)	h_{min} (mm)
LVR1	350	250
LVR2	400	300
LVR3	450	350

(Weinert, H, 1980.)

Diverses autorités routières ont publié des méthodes de conception pour les routes en terre, mais les principales méthodes sont essentiellement basées sur les éléments suivants :

- 1) Il faut une couche de revêtement comprenant un matériau qui se perdra ou s'usera progressivement au cours de l'utilisation. La perte de gravier est la principale forme de détérioration à long terme. (La perte de forme de la surface, par exemple, est simplement corrigée par un nivellement d'entretien). La perte de gravier dépend du trafic, du climat, de la géométrie et de la pente de la route, ainsi que des propriétés du matériau. De nombreuses études ont été réalisées pour quantifier la perte de gravier à des fins d'entretien et de gestion du réseau, par exemple Hodges et al. (1975) ; Paterson, W.D.O. (1987) ; Paige-Green (1989) ; Cook, J. et Petts, R. (2005) ; Mukura, K. (2008). L'épaisseur initiale d'une telle couche est généralement de 150 mm, mais des valeurs allant jusqu'à 300 mm ont parfois été recommandées. Les couches plus épaisses durent évidemment plus longtemps et doivent être remplacées moins fréquemment.
- 2) Au moins une couche supplémentaire est nécessaire pour maintenir la résistance structurale lorsque la couche de revêtement devient mince. Les couches de revêtement des routes non revêtues sont exposées aux conditions climatiques et sont fréquemment empruntées lorsque leur teneur en humidité est élevée et leur résistance faible.
- 3) Les recherches menées par le Centre de recherche en ingénierie de l'armée américaine sur la capacité de transport des sols et des graviers ont montré que les matériaux d'un CBR > 15 % sont capables de supporter plusieurs milliers de couvertures de véhicules lourds de l'armée. Si le chemin des roues n'est pas canalisé (comme sur une route de terre normale de largeur appropriée), chaque couverture équivaut à 2 ou 3 passages de véhicules, ce qui signifie que la capacité de circulation d'une route en terre relativement humide peut être substantielle.
- 4) Naturellement, différentes autorités routières ont développé leurs propres méthodes de conception pour les routes non revêtues, mais la méthode illustrée ci-dessous est assez représentative.

Le choix entre une route en terre, une route en terre et une route revêtue dépendra de nombreux facteurs, mais la considération économique décrite au chapitre 8 est peut-être le facteur le plus important. On trouvera de plus amples informations sur le choix entre les options revêtues et non revêtues dans Cook et al. (2013). Il convient de noter que la rareté des graviers de bonne qualité pour la construction de routes non revêtues est de plus en plus fréquente, ce qui a un impact sur la durabilité et entraîne des travaux de recrusage beaucoup plus fréquents, ce qui renforce les arguments en faveur du revêtement à des niveaux de trafic plus faibles.

6.4 Surfaces naturelles aménagées (ENS)

Ces routes ne sont construites qu'à partir du sol naturel, mais leur forme et la conception du drainage déterminent leurs performances. Lorsqu'elles sont bien conçues, leurs performances peuvent être grandement améliorées, d'où leur rôle important dans la fourniture d'accès pour les routes ou les pistes pouvant supporter jusqu'à 25 vpd.

Les détails du profil en travers d'une ENS sont présentés schématiquement dans la Figure 6-1.

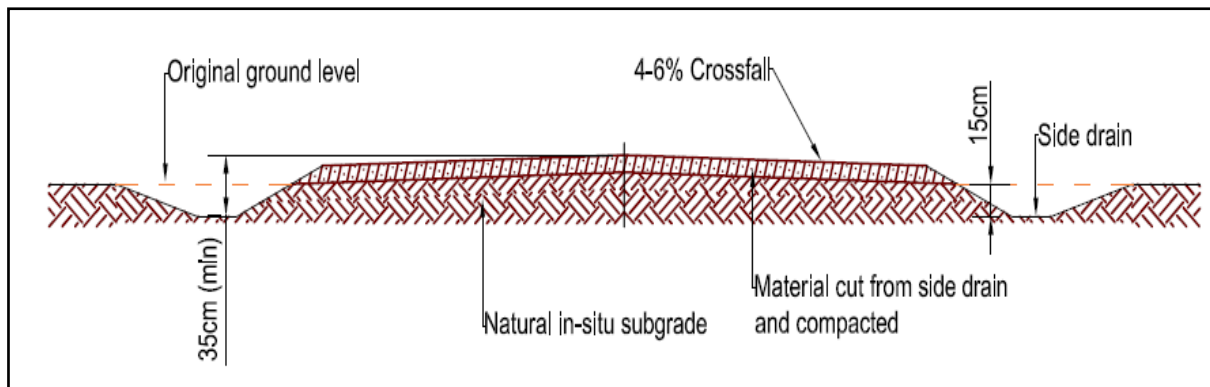


Figure 6-1: Profil en travers détaillé d'une ENS

6.5 Exigences en matière de conception des matériaux couche de roulement en gravier

6.5.1 Général

Les exigences en matière de matériaux pour la couche de roulement en gravier s'appliquent aux petites et grandes routes en gravier, mais PAS aux routes en terre. La couche de roulement doit faire partie des structures indiquées dans le tableau 6-6 et le tableau 6-7. Le but principal de la couche de roulement en gravier est de protéger la couche structurale et de fournir une bonne qualité de roulement. La couche de roulement doit être conçue de manière à permettre une conduite acceptable (faible rugosité). Le matériau utilisé pour la couche de roulement doit :

- 1) avoir une faible perte de gravier,
- 2) Ne doit pas être glissante,
- 3) La taille maximale des particules ne doit pas dépasser 40mm. Une taille maximale de 25 mm permet d'obtenir une conduite plus douce.

Lorsque les matériaux naturels sont rares, les matériaux mélangés peuvent fonctionner correctement. Des mélanges réussis peuvent souvent être obtenus en mélangeant du sable non plastique ou du gravier de rivière avec un matériau à I_p élevé. Des essais en laboratoire doivent être effectués afin de déterminer les proportions optimales des matériaux à mélanger. Les matériaux doivent être mélangés dans des proportions de 70/30, 60/40, 50/50, 40/60 et les meilleurs mélanges doivent être déterminés par comparaison avec les spécifications d'une couche de roulement en gravier.

6.5.2 La méthode du module granulométrique (GM) et du produit de plasticité (PP)

La Figure 6-2 illustre la relation entre les propriétés des matériaux et les performances d'une couche de roulement. L'épaisseur de la couche de roulement dépend de la perte annuelle de gravier (Tableau 6-5) et du nombre prévu d'années entre les opérations de reprofilage. Généralement, on utilise 150 mm au stade de la construction et la couche est regravellée à 150 mm d'épaisseur à chaque opération.

Tableau 6-3: Spécifications recommandées pour le revêtement de gravier basé sur GM

Propriété	Spécification
Taille maximale (mm)	37.5
Indice surdimensionné (% retenu sur tamis de 37,5 mm)	< 5%
Produit de plasticité (PP)	50 ⁽¹⁾ - 480
Module granulométrique (GM)	1.0 – 1.9

CBR trempé à 95% Mod AASHTO	>15%
Note 1. Un PP minimum de 280 est préférable pour améliorer l'adhérence des particules plus grandes	

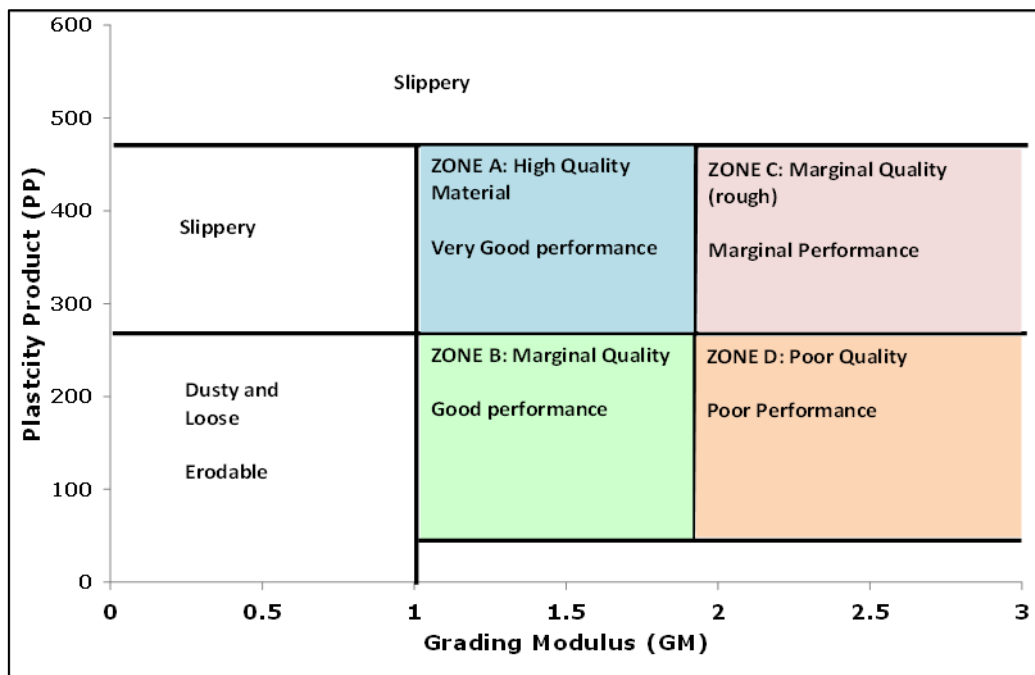


Figure 6-2 : Tableau de sélection pour les graviers des route en terre utilisant le PP et GM

Où

- a) PI = l'indice de plasticité du matériau passant au tamis de 0,425 mm
- b) Produit de plasticité (PP) = PI x P_{0,075} (la fourchette préférée est 280-480)
- c) Module granulométrique (GM) =

$$3 - \left(\frac{P_{2,36} + P_{0,425} + P_{0,075}}{100} \right)$$

Où : P_{2,36} = pourcentage de passage au tamis de 2,36 mm

P_{0,425} = pourcentage de passage au tamis de 0,425 mm

P_{0,075} = pourcentage de passage au tamis de 0,075 mm

La fourchette préférée est de 1,0 à 1,9

L'essai granulométrique du matériau doit être effectué selon la méthode du tamisage humide.

6.5.3 La méthode du coefficient de granulométrie et du produit de rétrécissement

Un tableau similaire basé sur le coefficient de granulométrie et le produit de la rétraction est présenté à la Figure 6-3. Les deux graphiques montrent des zones de qualité similaires, mais la Figure 6-2 est plus étroitement liée à des facteurs qui reflètent les coûts, à savoir la perte de gravier et la rugosité des routes.

Tableau 6-4: Spécifications recommandées pour le revêtement de gravier en fonction du GC

Propriété	Spécification
Taille maximale (mm)	37.5
Indice surdimensionné (% retenu sur tamis de 37,5 mm)	< 5%
Produit de gouvernement (région linéaire x P _{0,425}) (SP)	100 – 365 ⁽¹⁾
Coefficient de granulométrie (GC)	16-34
CBR trempé à 95% Mod AASHTO	>15%
Note 1. Un SP maximum de 240 préféré pour réduire la production de poussière en service	

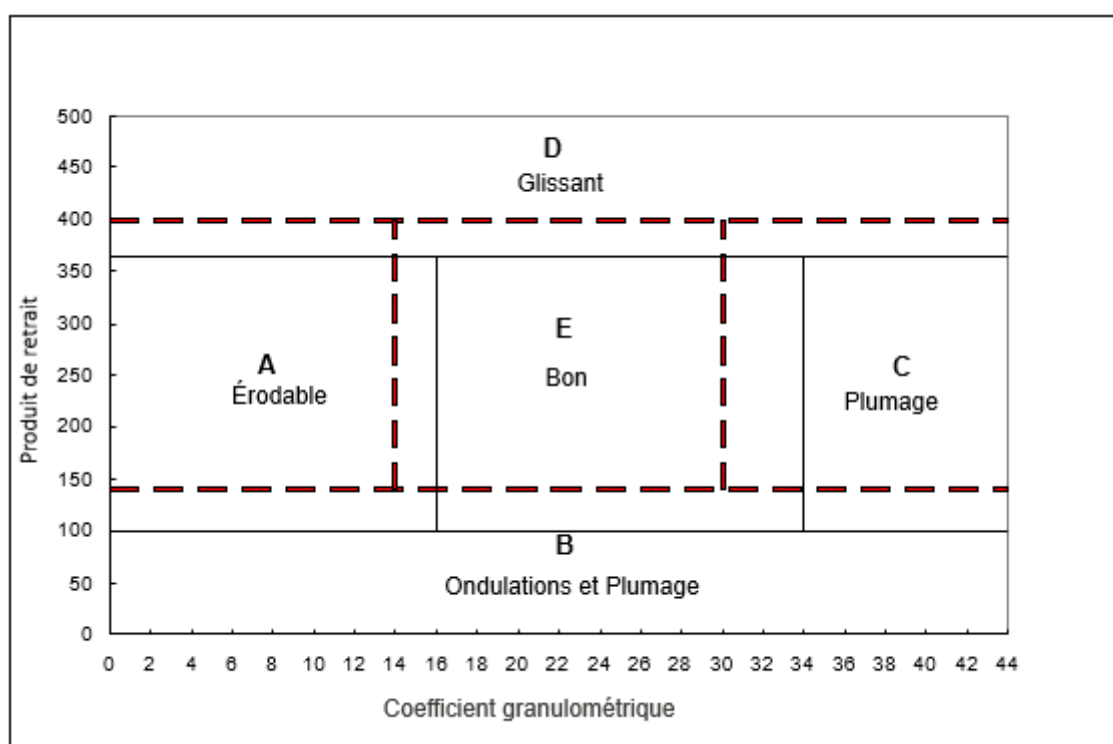


Figure 6-3: Tableau de sélection pour des graviers pour les routes en terre utilisant SP et GC (Source: Paige-Green 1989)

Sur le graphique de la Figure 6-3, les 5 zones indiquées (A à E) montrent les performances attendues des matériaux comme suit :

- Zone A : Matériau à grain fin sujet à l'érosion.
- Zone B : Matériaux non cohésifs qui entraînent une ondulation et un plumage / peignage ou un relâchement.
- Zone C : Matériaux à faible granulométrie, sujets au plumage / peignage.
- Zone D : Matériaux plastiques fins sujets au glissement et à une poussière excessive.
- Zone E : Matériaux optimaux pour une performance optimale.

Où :

Coefficient de granulométrie (GC) = (% de réussite 26,5 - % de réussite 2,00) x (% de réussite 4,75) / 100.

Produit de retrait (SP) = Retrait linéaire_{0,425} x P_{0,425}

ReCAP | Note sur les Routes Rurales 01 : Guide sur l'application des méthodes de conception des chaussées pour les routes rurales à faible volume

Il convient de noter que le graphique de la Figure 6-3 suppose un bon compactage de la couche de roulement (densité sèche maximale de 95%) lors de la construction et de l'entretien. En outre, il nécessite une modification (calibrage pour les conditions et les matériaux locaux) pour :

- l'utilisation dans les zones de forte pluviométrie (>1000 mm/an),
- les routes où circulent plus de 25 % de véhicules lourds,
- les matériaux dont les particules se décomposent facilement, par exemple les roches altérées par les intempéries et les graviers de scories (cendre).

Enfin, il convient de noter que deux matériaux différents, l'un à granulométrie fine et l'autre à granulométrie grossière, peuvent avoir exactement les mêmes valeurs Gc. Par exemple, l'argile fine et la pierre concassée grossière possèdent toutes deux une valeur Gc proche à zéro. Les matériaux se comporteraient évidemment différemment, mais des valeurs Gc identiques impliqueraient à tort qu'ils sont identiques et se comporteraient de la même manière.

Pensez à ajouter une figure qui montre les performances des matériaux sur la base de courbes de gradation, également utilisées dans de nombreuses régions du monde.

6.5.4 Perte de gravier

La perte de gravier est la principale raison pour laquelle les routes en terre sont chères en termes de coût sur toute leur durée de vie et souvent non durables sur le plan environnemental, en particulier lorsque le niveau de trafic augmente. Réduire la perte de gravier en sélectionnant des graviers de meilleure qualité ou en modifiant les propriétés des matériaux de moindre qualité est un moyen de réduire les coûts à long terme. Les pertes de gravier (perte de gravier en mm/an/100 vpd) sont déterminées en fonction de la qualité de la couche de roulement du gravier (Tableau 6-5).

Tableau 6-5: Perte de gravier typique

Zone de qualité des matériaux	Qualité des matériaux	Perte de gravier typique (mm/an/100vpd)
Zone A	Satisfaisant	20
Zone B	Pauvres	45
Zone C	Pauvres	45
Zone D	Marginal	25
Zone E	Habituellement bon	15

Note: Les zones se réfèrent aux zones indiquées à la Figure 6-3.

Les pertes de gravier indiquées dans le Tableau 6-5 ne sont valables que pour la première phase du cycle de détérioration, qui peut durer deux ou trois ans. Au-delà de cette période, l'épaisseur de la couche de roulement étant réduite, d'autres évolutions, telles que la formation d'ornières, affecteront également la perte de gravier. Les taux de perte de gravier augmentent de manière significative :

- 1) Sur les pentes supérieures à environ 6 %,
- 2) Dans les zones de fortes et intenses précipitations,
- 3) Lorsque les opérateurs de niveleuses coupent trop profondément,
- 4) Là où le compactage est faible. Des améliorations ponctuelles devraient être envisagées sur ces sections.

Le rechargement du gravier doit avoir lieu avant que la couche inférieure ne soit exposée. La fréquence de rechargement du gravier, R, est généralement comprise entre 5 et 8 ans.

L'épaisseur de la couche de roulement = R x GL

R = fréquence de rechargement du gravier en années

GL = perte annuelle de gravier.

6.5.5 Une approche fondée sur le risque pour la sélection des cours de port

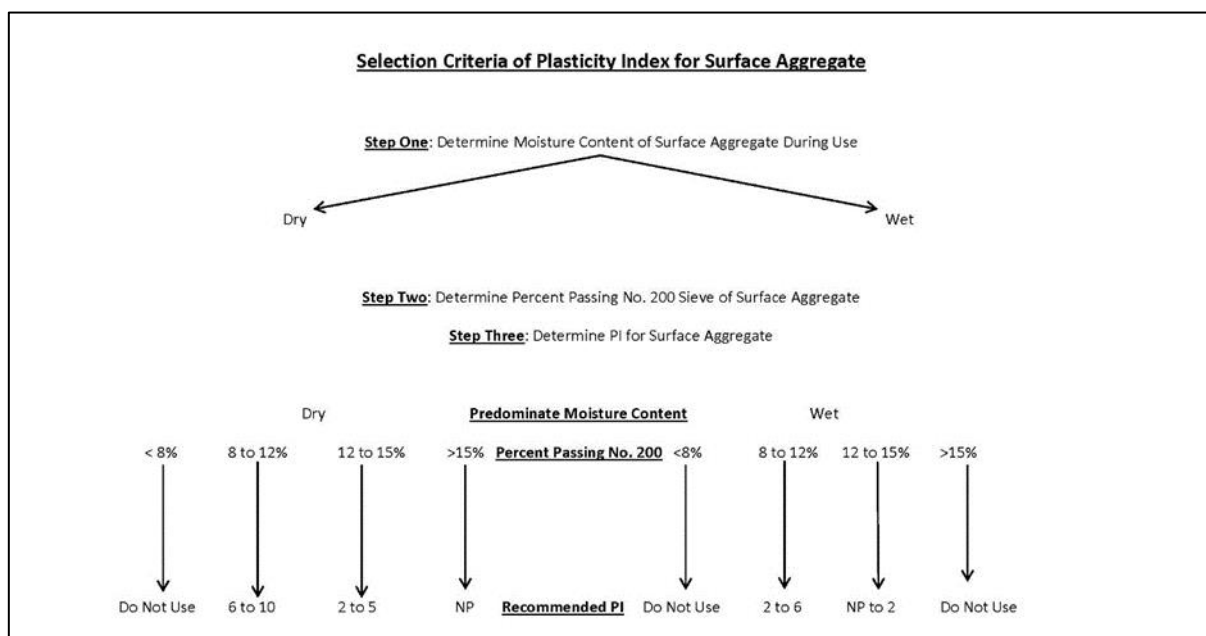
Une publication récente (Austroads, 2020) utilise une combinaison de facteurs pour sélectionner les matériaux appropriés pour les couches de roulement en gravier. Une matrice de la circulation mesurée en MESA et de la probabilité de précipitations annuelles moyennes supérieures à 500 mm/an est utilisée. Trois classes de trafic et trois niveaux de risque de précipitations supérieures à 500 mm/an sont utilisés pour former neuf niveaux de risque (une matrice 3 x 3). Sur la base du niveau de trafic et de la pluviosité annuelle moyenne attendue pour un site donné, par exemple un trafic inférieur à 0,25 MESA et une faible probabilité de précipitations supérieures à 500 mm/an, on obtient une catégorie de risque représentant cette combinaison. En utilisant la catégorie de risque obtenue à partir de la matrice, le risque d'utilisation de différents types de matériaux est donné. Les caractéristiques des matériaux sont mesurées en termes de module de granulométrie (GM) et de produit de retrait (SP). La décision du niveau de risque à sélectionner pour chaque projet doit être prise par l'ingénieur d'études sur la base du choix des matériaux disponibles. La plupart des matériaux dont le GM est compris entre 0,8 et 2 et le SP entre 50 et 360 sont classés comme présentant un niveau de risque faible à moyen pour la plupart des niveaux de trafic à faible volume et des niveaux de précipitations modérés. Des détails sur la manière d'utiliser cette approche se trouvent dans Austroads (2020).

6.5.6 Autres méthodes de sélection des cours de port

Une autre approche de la sélection du revêtement est basée principalement sur le pourcentage de matériau passant le tamis de 200 µm, l'indice de plasticité et les conditions climatiques, comme le montre la Figure 6-4.

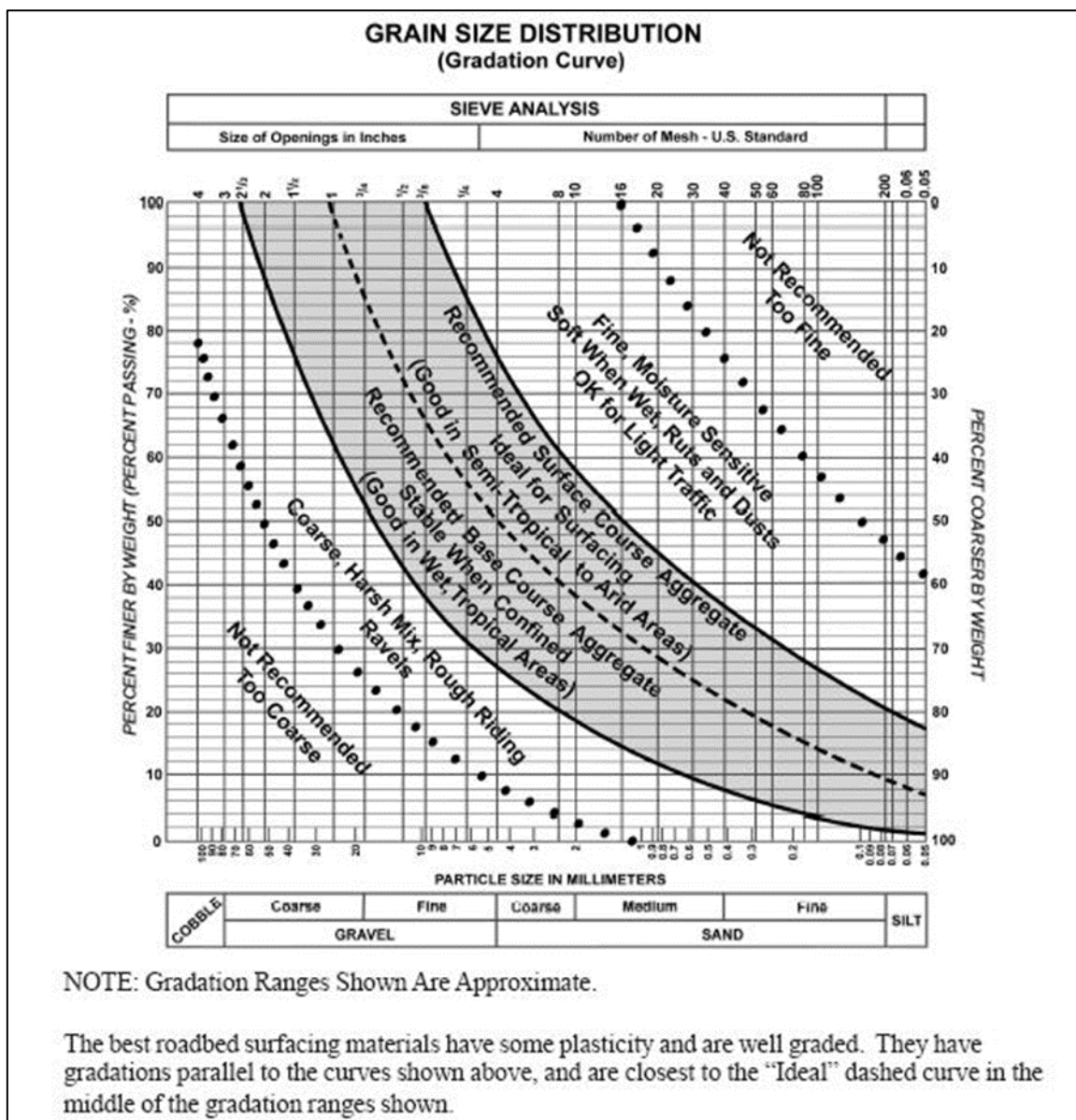
En général, la méthode est une approximation du produit de plasticité (PP) comme décrit dans la section 6.5.2.

Une autre approche est basée sur la gradation, comme le montre la Figure 6-5. En général, la couche de roulement a des exigences différentes de celles d'une couche de base, avec une plasticité généralement plus élevée et plus de fines pour aider à lier le matériau ensemble, même si elle compromet quelque peu la résistance.



Source: Bolander, P. 2020 - sous publication

Figure 6-4: Choix du gravier de la couche de roulement par produit de plasticité et la condition climatique



- 1) Lorsque la qualité du gravier est mauvaise.
- 2) Lorsqu'aucune source de gravier n'est disponible à une distance raisonnable.
- 3) Sur les routes dont la pente est supérieure à environ 6 %.
- 4) Dans les régions où les précipitations sont fortes et intenses.
- 5) Lorsque la route est en mauvais état en raison d'un mauvais entretien ou d'un entretien inadéquat.

Dans ces circonstances, des améliorations ponctuelles seront presque certainement justifiées et, dans certains cas, il peut s'avérer plus économique de construire une route entièrement revêtue dès le départ.

La procédure de conception comprend les étapes suivantes :

- 1) Déterminer le volume de trafic et la charge de trafic. La période de conception est généralement de 7 à 10 ans, mais elle varie selon les autorités routières.
- 2) Déterminer la résistance de la couche de fondation dans des conditions d'humidité appropriées.
- 3) Déterminer la qualité du gravier qui sera utilisé. Si seul du gravier de très mauvaise qualité est disponible, il est possible de le mélanger à un autre gravier ou sol pour améliorer ses propriétés.
- 4) Déterminez l'épaisseur de la base de gravier à partir du tableau 6-6 et du tableau 6-7.

5) Ces tableaux seront différents de ceux qui sont actuellement disponibles dans de nombreux manuels de conception. Ils ont été élaborés à partir des résultats de la FHWA (2015) lors de la préparation de ce RRN. Elles éliminent la nécessité de spécifier les 30 % et 45 % de CBR pour les matériaux de la couche de roulement dans certains manuels. La pratique courante est d'appliquer une épaisseur de 100 à 150 mm de gravier pour les sous-niveaux moyens à forts et le trafic léger, et pour le trafic plus lourd et les sous-niveaux faibles, les épaisseurs de 200 à 300mm.

6) Lorsque la couche de gravier requise est supérieure à 200 mm, on peut adopter une conception à deux couches en réservant le matériau de meilleure qualité, s'il existe, pour la couche de roulement.

Tableau 6-6: Épaisseur de base des principales routes en terre battue - Gravier moyen (CBR trempé à 20 %)

Classe de sol support CBR (%)	Classes de Trafic (mesas)		
	TLC1 (<0.01)	TLC2 (0.01-0.1)	TLC3 (0.1-0.3)
S1 <3	165	180	270
S2 (3-4)	165	165	245
S3 (5-7)	150 ¹	150 ¹	210
S4 (8-14)	150 ¹	150 ¹	185
S5 (15-29) ²	150 ¹	150 ¹	150

Notes:

1. L'épaisseur réelle requise est inférieure à 150mm. Ceci a été marqué pour réduire la fréquence de rechargement du gravier .
2. Si le CBR est égal ou supérieur à 20 %, remodeler à une cambrure de 4 à 6 %, scarifier à l'épaisseur recommandée et compacter.

Tableau 6-7: Épaisseur de base des principales routes en terre battue - Gravier faible résistance (CBR trempé à 15 %)

Classe de sol support CBR (%)	Classes de trafic (mesas)		
	TLC1 (<0.01)	TLC2 (0.01-0.1)	TLC3 (0.1-0.3)
S1 <3	180	200	300
S2 (3-4)	180	200	270
S3 (5-7)	160	200	250
S4 (8-14)	150	150	200
S5 (15-29) ²	150 ¹	150 ¹	160

Notes:

1. L'épaisseur réelle requise est inférieure à 150mm. Ceci a été marqué pour réduire la fréquence de rechargement du gravier .
2. Si le CBR est égal ou supérieur à 15 %, il faut alors remodeler à 4-6 % de cambrure, scarifier à l'épaisseur recommandée et compacter.
3. Si la couche de forme native est de classe S6 (CBR>30%), alors les épaisseurs du Tableau 6-6 doivent être utilisées.

Il convient de noter ce qui suit :

- 1) Il est peu probable que l'entretien des routes de terre conçues pour transporter plus de 0,3 MESA soit économique. Au-delà de ce niveau de trafic, les options revêtues seront probablement plus économiques.
- 2) Les épaisseurs requises augmentent si le gravier est faible ; il faut donc généralement utiliser des graviers plus résistants s'ils sont disponibles à un coût raisonnable.
- 3) Lorsque le gravier disponible n'est pas homogène, il sera nécessaire de remplacer une classe particulière de gravier par une ou plusieurs classes différentes de gravier d'une épaisseur appropriée. Les facteurs de conversion suivants peuvent être utilisés à cette fin.

$$G20 = 1,12 \times G15$$

Ainsi, une couche de 200 mm de matériau G20 pourrait être remplacée par une couche de 225 mm de matériau G15.

La couche d'usure fait partie des structures indiquées dans les tableaux 6-6 et 6-7, et doit être conforme aux exigences de la couche d'usure spécifiées dans le tableau 6-3 ou le tableau 6-4.

Pour un compactage efficace de la couche de gravier, il est nécessaire de limiter l'épaisseur libre du gravier à une levée maximale d'environ 200mm. Ainsi, toute couche de gravier nécessitant une épaisseur compactée de plus de 150 mm doit être compactée sur plus de 200 mm de hauteur.

Austroroads (2009) fournit des orientations alternatives sur la conception structurelle des routes non revêtues jusqu'à 0,5 MESA. L'approche adoptée consiste à fournir des conceptions similaires à celles des routes bitumées, à l'exception du fait que le joint bitumineux est remplacé par une couche de roulement en gravier d'au moins 150mm. Cette approche ne doit être adoptée que si le concepteur est certain que la route sera probablement revêtue d'ici la prochaine période de rechargement du gravier ou si la route compte un nombre élevé de véhicules lourds (>15 %). Toutefois, il convient de noter que l'une des principales fonctions de nombreuses routes de terre en Australie est le transport de marchandises en vrac et que les routes doivent donc résister à des charges de trafic lourdes circulant à des vitesses relativement plus élevées que les

transporteurs de passagers. Pour ces raisons, le risque d'affaissement de la couche de fondation doit être réduit.

En pratique, pour de nombreuses petites routes à faible volume qui ne reçoivent pas de trafic lourd, des épaisseurs de gravier de 100 à 150 mm sont souvent spécifiées, sans conception, sur la base d'un historique empirique des performances. Si les sols de fondation sont raisonnablement résistants et que le climat n'est pas tropical, une couche de 100 mm de gravier compacté est utilisée. Cette épaisseur est également utilisée pour le contrôle de l'érosion sur des sols très érosifs tels que les granits décomposés ou les cendres volcaniques. Sur les sols pauvres et dans des conditions humides, une couche de 150 mm de granulats est placée sur la route. En cas d'orniérage, du gravier supplémentaire est répandu dans les zones d'orniérage. Cette approche est quelque peu validée par les informations relatives à la conception de l'épaisseur approximative, comme le montre la Figure 6-4, basée sur les données des pistes d'essai du Corps of Engineers de l'armée américaine (Keller et al. 2011). L'épaisseur globale est déterminée en fonction de la présence de CBR et du trafic (ESAL) sur la plate-forme. Cette approche ne tient pas compte des coûts de resurfacement de la route ni des coûts du cycle de vie.

Bibliography

- Ahlin, R. G. and Hamitt, G. M. (1975). **Load-supporting Capability of Low-volume Roads**. Special Report 160. Transportation Research Board. National Academy of Sciences, Washington DC.
- ASIST. (1998). **Technical Brief Number 9: Material Selection and Quality Assurance for Labour-based Unsealed Road Projects**. International Labour Organisation Advisory Support, Information Services, and Training (ASIST) Nairobi, Kenya.
- Australian Road Research Board. (2000). **Unsealed roads manual: Guideline to good practice**. ARRB Transport Research Ltd., Australia.
- Austrroads. (2009). **Guide to Pavement Technology. Part 6, Unsealed Pavements**. Sydney, Australia.
- Austrroads. (2020). **Sustainable Roads Through Fit-for-purpose Use of Available Materials: Evaluation Tool and User Guide**. Austrroads Ltd, Sydney, Australia.
- Cook, J. R., Petts, R. C., and Rolt J., (2005). **Vietnam Rural Road Gravel Assessment Programme**. Intech Associates, TRL and ITST.
- Cook, J. R., Petts, R. C., and Rolt J., (2013). **Low Volume Rural Road Surfacing and Pavements: A Guide to Good Practice**. DFID, UK.
- Council for Scientific and Industrial Research. (1989). **The design, construction and maintenance of low volume rural roads and bridges in developing areas**. Synthesis Report No S89/2:1989. Department of Transport, Chief Directorate National Roads, Republic of South Africa.
- Federal Highway Administration (FHWA) and the South Dakota Local Technical Assistance Program. (2015). **Gravel Roads Construction and Maintenance Guide**. FHWA Technology Partnership Programs, FHWA, Washington DC. USA
- Hodges, J. W., Rolt, J. and Jones, T. E. (1975). **The Kenya Road Transport Cost Study: Research on Road Deterioration**, TRRL Laboratory Report 673, Transport Research Laboratory, Crowthorne, UK
- Jones, D. and Paige-Green, P. (2015). **Limitations of Using Conventional Unpaved Road Specifications for Understanding Unpaved Road Performance**. 11th TRB Low Volume Road Conference, 12th – 15th July 2015 Pittsburgh, USA.
- Keller, G., Wilson-Musser, S., Bolander, P., and Barandino, V. (2011). **Stabilization and rehabilitation measures for low-volume forest roads**. SDTDC-1177-1801. National Technology and Development Program, US Department of Agriculture, Forest Service, San Dimas, CA. USA.
- Paterson, W.D.O. (1987). **Road deterioration and maintenance effects: models for planning and management**, The Highway Design and Maintenance Standards Series, Washington DC: The World Bank.
- Mukura, K. (2005). **Engineering standards and low cost for low volume unpaved roads Increased Application of Labour-based Methods Through Appropriate Engineering Standards**. INT/01/03/UKM. Geneva, Switzerland: ILO.
- Mukura, K. (2008). **Performance Criteria and Life-Cycle Costing for Low-Volume and Labour-Based and Unpaved Roads in Ethiopia**. UUPR/III/028/08. Crowthorne, UK: Transport Research Laboratory (Report available on direct personal application only).
- Paige-Green, P. (1989). **The influence of geotechnical properties on the performance of gravel wearing course materials**. PhD thesis, University of Pretoria, Pretoria
- Weinert, H.H. (1980). **The natural road construction materials of southern Africa**. H & R Academica, Cape Town, South Africa, 298 p.
- Department of Transport of South Africa, (2009). **TRH 20 Unsealed roads: Design, construction and maintenance**. Pretoria, South Africa: The Department for Transport.

7 SÉLECTION DE REVÊTEMENTS

7.1 Objectif et portée

La conception des revêtements minces est similaire pour toutes les méthodes de conception des chaussées. Il n'entre pas dans le cadre du guide de discuter en détail de leur conception, mais le choix du revêtement est important pour la performance de la route. Des résumés et des recommandations seront faits quant aux avantages et aux inconvénients de chaque type de revêtement. Ce chapitre fournit des conseils sur :

- les facteurs à prendre en compte dans le choix des revêtements appropriés pour une chaussée donnée ;
- la durée de vie potentielle des différents revêtements et les facteurs qui influent sur ceux-ci, par exemple la compétence de l'entrepreneur ;
- la stratégie de construction et d'entretien du revêtement pour minimiser les coûts du cycle de vie.

7.2 Description des revêtements communs

Les revêtements les plus courants pour les LVRR sont les revêtements bitumineux minces décrits dans le tableau 7-1. En plus des revêtements bitumineux minces, les surfaces structurales, y compris les revêtements à "éléments modulaires" (par exemple, les blocs de béton, les pavés et les pierres emballées à la main) ont toutes une place pour les LVR. Le coût initial et la disponibilité des matériaux locaux sont généralement les facteurs contraignants, mais en raison de la valeur structurale de ces revêtements, l'épaisseur globale de la chaussée peut être réduite et les coûts sur toute la durée de vie peuvent parfois rendre ces options favorables. L'utilisation la plus courante est celle des zones semi-urbaines où la commercialisation et le commerce ont lieu et où les mouvements des véhicules sont imprévisibles, ainsi que sur les tronçons qui sont très raides ou autrement difficiles du point de vue de l'ingénierie.

Il convient de souligner ici que l'utilisation d'un revêtement bitumineux à application unique (par exemple, scellement de sable, coulis bitumineux et enduit superficiel unique également appelé "Single Chip Seal") se révélera souvent désastreuse sur le plan économique en raison de ses mauvaises performances. Un enduit superficiel monocouche est généralement appliqué sur une surface revêtue, mais un enduit superficiel bicouche est généralement nécessaire sur une surface de granulats non revêtue. Les raisons acceptées pour leurs mauvaises performances sont dues, au moins en partie, au fait que tout léger défaut de construction se transforme rapidement en nid-de-poule alors que dans le cas des joints doubles, outre la durabilité accrue due à l'augmentation de l'épaisseur, les risques de voir des défauts se produire sur les deux applications exactement au même endroit sont relativement faibles. L'application d'un joint d'étanchéité primaire (comme cela se fait en Australie et au Ghana) peut minimiser les problèmes.

Tableau 7-1: Caractéristiques générales des revêtements bitumineux

Surfaces	Description et caractéristiques	Durée de vie prévue (années)
Enduit superficiel de sable	<ul style="list-style-type: none">• Conception empirique.• Consiste en un film de liant (bitume coupé ou émulsion) suivi d'un sable naturel calibré ou d'un sable fin calibré à la machine ou d'un agrégat brisé à la main (taille maximale généralement 6 mm - 7 mm) qui doit ensuite être compacté.• Les joints de sable simple ne sont pas très durables, mais leur performance peut être améliorée par l'application d'un second joint après 6 à 12 mois, en fonction du trafic. Il devrait alors durer encore 6 à 7 ans avant qu'un autre revêtement ne soit nécessaire.• Particulièrement utile si un bon agrégat est difficile à trouver.• Convient parfaitement à la construction à haute intensité de main-d'œuvre, en particulier lorsque des émulsions sont utilisées, et nécessite une installation de construction simple.• Doit être remis en place dans les traces de roues "usées". Il y a une période de durcissement prolongée (généralement 8 à 12 semaines)	Monocouche 2-3 Bicouche 3-6

Surfaces	Description et caractéristiques	Durée de vie prévue (années)
	entre la première et la deuxième application de joint pour assurer une perte complète des volatiles et donc prévenir les hémorragies. Pendant cette période, le sable peut avoir besoin d'être brossé pour revenir dans les traces de roues "usées".	
Enduit à coulis bitumineux	<ul style="list-style-type: none"> • Une conception rationnelle avec des approches à la fois simplifiées et détaillées. • Consiste en un mélange d'agrégats fins, de ciment Portland, de liant d'émulsion et d'eau supplémentaire pour produire une consistance crémeuse et épaisse qui est étalée sur une épaisseur de 5 à 15mm. • Peut être utilisé sur les LVR ne transportant que du trafic léger. Plus généralement utilisé pour retexturer les enduits de surface avant de refaire l'étanchéité ou pour construire des joints de capot. • Très adapté à la construction à haute intensité de main d'œuvre en utilisant une installation de construction relativement simple (bétonnière) pour mélanger le coulis. Le coulis mince (5 mm) n'est pas très durable ; les performances peuvent être améliorées avec l'application d'un coulis plus épais (15 mm) ou l'application d'un second revêtement après 6 à 12 mois, selon le trafic. La durée de vie devrait alors être encore de 5 à 10 ans. 	<p>à une couche 3-5</p> <p>à double couche 5-8</p>
Monocouche + Enduit superficiel de sable	<ul style="list-style-type: none"> • Conception en partie rationnelle (traitement de surface) et en partie empirique. • Consiste en un seul traitement de surface de 13 mm ou 9,5 mm suivi d'une seule couche de scellement (sable de rivière ou poussière de concassage). • L'objectif principal du Sand Seal est de remplir les vides entre les granulats pour produire un revêtement à texture serrée et étroitement lié. • Il convient assez bien à la construction à la main d'œuvre et, lorsque l'émulsion est utilisée, nécessite une installation de construction relativement simple. • Plus durable qu'un simple revêtement de surface. 	8-11
Cape seal	<ul style="list-style-type: none"> • Conception en partie rationnelle (traitement de surface) et en partie empirique (coulis bitumineux). • Consiste en un simple enduit superficiel de 19 mm ou 13 mm suivi d'une ou deux couches de boue. L'objectif principal du coulis est de remplir les vides entre les granulats pour produire un revêtement dense et étroitement lié. • Convient assez bien à la construction à haute intensité de main-d'œuvre et, lorsque l'émulsion est utilisée avec l'enduit superficiel, peut être construite avec une installation relativement simple. • Produit un revêtement très durable, en particulier avec l'agrégat de 19 mm et deux applications de boue (durée de vie de 12 à 15 ans). 	(13 mm + une couche de coulis bitumineux) 10-14
Bicouche	<ul style="list-style-type: none"> • Conception en partie rationnelle (traitement de surface) et en partie empirique. • Se compose généralement d'un simple enduit superficiel de 19 mm ou 14 mm suivi d'une seule couche d'agrégat de 9 ou 7mm. 14 mm et 7 	10-14

Surfaces	Description et caractéristiques	Durée de vie prévue (années)
	<p>mm de préférence. Cependant, des recherches récentes ont montré que la taille de l'agrégat de la deuxième application devrait représenter environ 1/3 de l'agrégat utilisé dans la première application ; les tailles de 19 mm et 7 mm sont donc préférées.</p> <ul style="list-style-type: none"> Le but premier de la deuxième couche est de remplir les vides entre les granulats pour produire un revêtement à texture serrée et à liaison étroite. Convient assez bien à la construction à haute intensité de main-d'œuvre et, lorsque l'émulsion est utilisée, nécessite une installation de construction relativement simple. Plus durable qu'un simple revêtement de surface. 	
Otta Seal	<ul style="list-style-type: none"> Conception empirique. Consiste en un liant de faible viscosité (par exemple, du bitume coupé, du bitume de pénétration MC 3000 ou 150/200) suivi d'une couche de granulats calibrés (concassés ou criblés) d'une taille maximale de 19 mm, (normalement 16 mm). L'épaisseur est d'environ 16 mm pour une seule couche. En raison des fines contenues dans les agrégats, il faut procéder à un laminage important pour s'assurer que le liant est affleurant à la surface. Il peut être fabriqué en une seule couche ou, pour une meilleure durabilité, avec un joint de sable sur une seule couche ou en double couche. Convient assez bien à la construction à base de main-d'œuvre et d'équipement, nécessite un suivi prolongé (remplacement des agrégats et roulage). 	<p>à une couche : 8-10</p> <p>à une couche + enduit superficiel de sable de sable : 10-12</p> <p>Otta seal à double couches 12-15</p>
Enrobé coulé à froid	<ul style="list-style-type: none"> Conception empirique. Consiste en un mélange de granulats concassés (0-6/6-10 mm) et d'une émulsion stable à rupture lente, qui est mélangée à la main ou dans une bétonnière. Après avoir été mélangé, le matériau est étalé sur une couche de base apprêtée et roulée. L'épaisseur est d'environ 20mm. Convient très bien à la construction HIMO ; nécessite une installation de construction très simple ; réduit le risque potentiel de travailler avec du bitume chaud ; ne nécessite pas l'utilisation d'un distributeur de bitume relativement coûteux. 	8-10
Asphalte à base de sable	<ul style="list-style-type: none"> Conception empirique. Consiste en un mélange de 30 à 50 mm d'épaisseur de sable et de bitume, mélangé à haute température (130°C - 140°C) qui est étalé et roulé lorsque la température est descendue à 80 degrés Celsius. Les performances n'ont pas encore été prouvées, donc l'utilisation n'est pas souvent envisagée. 	8-10
Asphalte mince < 30 mm	<ul style="list-style-type: none"> Conception rationnelle. Consiste en un agrégat broyé de 10 mm nominal mélangé dans une centrale d'enrobage à chaud et placé par un finisseur. 	10-12

Avant l'application du premier joint bitumineux pour les nouvelles constructions, un primaire bitumineux (appelé "traitement de pénétration" aux États-Unis) doit être appliqué sur le substrat et il faut laisser 3 à 5 jours pour pénétrer et durcir avant d'appliquer le premier joint. Sélection des revêtements appropriés pour les LVR

Le choix du type de revêtement approprié dépendra de la pertinence ou non de nombreux facteurs :

- Le trafic (volume et type),
- Chaussée (type - résistance et propriétés de flexion),
- Matériaux (type, qualité et disponibilité),
- Environnement (climat - température, précipitations),
- Caractéristiques opérationnelles (géométrie - gradient, courbure, etc.),
- Sécurité (résistance au dérapage - texture de la surface),
- Construction (techniques et expérience des entrepreneurs),
- Maintenance (capacité et fiabilité),
- Facteurs économiques et financiers (financement disponible, coûts du cycle de vie, etc.),
- Autres facteurs externes.

L'adéquation des différents types de revêtements à l'utilisation sur les LVR, en termes d'efficacité et d'efficacité par rapport aux facteurs opérationnels décrits ci-dessus, est résumée dans le tableau 7-2. Les détails sur la manière de procéder à la conception de revêtements spécifiques se trouvent dans la plupart des manuels nationaux et dans des lignes directrices telles que Overby (1999), TRL (2000), SANRA (2007) et Austroads (2013).

Bien que non exhaustifs, les facteurs énumérés dans le tableau fournissent un format de base qui peut être adapté ou développé en fonction des conditions locales et utilisé par la suite pour aider à faire un choix final des options de revêtement. Ces options peuvent ensuite être soumises à une analyse des coûts du cycle de vie et une décision finale peut être prise.

Tableau 7-2: Adéquation de divers revêtements pour les LVR

Attributs	Enduit mince/stratégie par étapes				Stratégie de Bicouche/enduits superficiels combinés								
	SSS	DSS	SIS	SSD	SSD+SS	DSD	SOS	SOS+SS	DOS	CS 13mm	CS 19mm	CMA	
Facilité de conception	***	***	***	*	*	*	*	*	*	*	*	**	
Facilité de construction	***	***	***	*	*	*	**	**	**	*	*	***	
Durée de vie					**	***	***	***		***	***	**	
Adéquation au LBM				**	**	**	*	*	*	**	**	***	
Prévention des risques de mauvais entretien					*	*	*	***	***	***	***	**	
Haute résistance au dérapage			***	***	*	***	*	*	*	**	***	*	
Le marquage routier précoce	*	*	***	***	*	***				***	***	***	
Adéquation aux actions de retournement					*	*	**	**	**	**	***	***	
Insensibilité à la qualité des matériaux	*	*	*				***	***	***			**	
Sensibilité aux gradients >8%.					*	*				*	*	**	

***	Très bien	**	Bien	*	Raisonnable		Médiocre, pas adapté
-----	-----------	----	------	---	-------------	--	----------------------

Notes :

SSS-Single Sand Seal; DSS-Double Sand Seal; SLS-Slurry Seal; SSD-Single Surface Dressing; SSD+SS - Single Surface Dressing and Sand Seal capping; SOS-Single Otta Seal; SOS+SS - Single Otta Seal and Sand Seal capping; DSD-Double Surface Dressing; DOS-Double Otta Seal; CS-Cape Seal 13/19mm+ Single/Double SLS; CM-Cold Mix.

Le type de bitume ou d'émulsion utilisé sera largement influencé par la disponibilité de différents types dans la zone où le traitement de surface est effectué, ainsi que par les coûts associés. Le choix du bitume pour les traitements par pulvérisation est également influencé par les exigences suivantes.

Le bitume doit :

- 1) pouvoir être pulvérisé et mouiller la surface de la route en un film continu ;
- 2) ne pas s'écouler de la surface de la route sur la cambrure ou former des flaques dans les dépressions locales ;
- 3) mouiller les gravillons et y adhérer à température ambiante, l'adhérence étant suffisamment forte pour résister aux forces de circulation à la température ambiante la plus élevée ;
- 4) rester flexible à la température ambiante la plus basse, sans se fissurer ni devenir assez cassant pour permettre au trafic d'enlever les granulats.

Il n'est normalement pas possible de satisfaire pleinement à toutes ces exigences ; c'est pourquoi le choix du liant doit donner le meilleur compromis possible.

Parmi les facteurs importants (sans ordre particulier) qui influent sur le choix d'un revêtement bitumineux mince, on peut citer :

- 1) La circulation : Le volume de trafic prévu et les types de véhicules transportés par la route ; plus le volume de trafic lourd est élevé, plus la durée de vie du revêtement est courte ;
- 2) le climat : Les températures très élevées provoquent un durcissement rapide du liant et une fragilité extrême en raison de la perte accélérée des substances volatiles, tandis qu'à basse température, les liants sont également fragiles, ce qui entraîne des fissures ou la perte de granulats et réduit la durée de vie du revêtement.
- 3) Résistance de la chaussée : L'absence de rigidité sous-jacente de la chaussée entraîne une flexion excessive, une fissuration par fatigue et une réduction de la durée de vie du revêtement.
- 4) Matériaux de base : Des performances insatisfaisantes de la couche de base, notamment une rigidité et une résistance au cisaillement insuffisantes et l'absorption du liant dans certains matériaux de base (par exemple les matériaux pédogènes), entraîneront une réduction de la durée de vie du revêtement.
- 5) Durabilité du liant : Plus la durabilité du liant est faible, plus son taux de durcissement est élevé et plus la durée de vie du revêtement est courte.
- 6) Conception et construction du revêtement : Une mauvaise conception et de mauvaises techniques de construction (par exemple, une couche de fond inadéquate, un taux d'application du liant inégal ou des agrégats "sales") entraînent une réduction de la durée de vie du revêtement.
- 7) Polissage de la pierre : plus le polissage de la pierre est rapide, plus la nécessité d'un resurfaçage est précoce
- 8) Caractéristiques du projet : Qu'il s'agisse d'une nouvelle construction ou d'une refonte ;
- 9) Conditions environnementales du site : l'ombre et l'humidité en surface peuvent toutes deux affecter la façon dont les émulsions "se cassent".
- 10) Géométrie de la route : Acuité des virages et raideur des pentes ;
- 11) Exigences de sécurité ;
- 12) Expérience et compétences de l'entrepreneur et du consultant ;
- 13) Fiabilité et capacité de l'entretien futur ;
- 14) Qualité et état du matériel. Le camion épandeur de granulats et le camion distributeur d'huile doivent être capables d'appliquer des taux uniformes de matériaux. Les buses du distributeur d'huile doivent être propres et appliquer l'huile uniformément.
- 15) Fonds disponibles : pour **la construction initiale et l'entretien futur**.

Le Tableau 7-3 aborde de nombreux problèmes liés à l'utilisation de des enduits superficiels et la manière dont ils peuvent être résolus.

Tableau 7-3: Résoudre les problèmes liés aux puces électroniques

Situation	Résolution possible
Grades élevés (> 6 pour cent)	Utiliser des émulsions à haute flottabilité modifiées par des polymères ou des polymères ou utiliser du ciment asphaltique chaud
Alignement horizontal serré	Utiliser des émulsions à haute flottabilité modifiées par des polymères ou des polymères, ou augmenter le taux d'asphalte de 0,05 gal/SY (0,23 l/m ²), ou placer un joint de brouillard sur le gravillon terminé (CSS-lh mélangé à 50/50 avec de l'eau à 0,10 à 0,15 gal/SY(0. 45-0,70 l/m ²)), ou étouffer, ou un joint de brouillard avec étouffement de la surface finale, ou contrôler plus étroitement le trafic (vitesses <15 mph) (24 km/h), ou augmenter le pourcentage de faces fracturées dans l'agrégat, ou utiliser du ciment asphaltique chaud.
Pente transversale > 6 pourcents	Utiliser des émulsions à haute flottabilité modifiées par des polymères ou utiliser du ciment asphaltique chaud ou envisager un revêtement non bitumineux.
Forte couverture forestière ou autres situations où des températures basses et une humidité élevée décourageraient l'évaporation des émulsions standard	Utiliser des bitumes de réduction, ou des émulsions à haute flottabilité modifiées par des polymères ou des polymères, ou augmenter le taux d'asphalte de 0,05 gal/SY (0,23 l/m ²) ; ou placer un joint de brouillard sur le gravillon terminé (CSS-lh mélangé à 50/50 avec de l'eau à 0,10 à 0,15 gal/SY (0,45-0. 70 l/m ²)), ou étouffer, ou un joint de brouillard avec étouffement de la surface finale, ou contrôler plus étroitement la circulation (vitesses < 15 mph) (24 km/h), ou augmenter le pourcentage de faces fracturées dans l'agrégat, ou utiliser du ciment asphaltique chaud, ou utiliser une émulsion à prise rapide et à basse température (1)
Les granulats d'agrégat poussiéreux	Utiliser des bitumes de réduction ou laver l'agrégat, ou utiliser une émulsion à haute flottabilité ou utiliser le CMS-2, ou pré-enrober les granulats d'agrégat
Nécessité d'une rétention précoce des puces	Utiliser un revêtement à crémaillère (voir TRL, 2000), des émulsions à haute flottabilité modifiées par des polymères ou des polymères ou utiliser du ciment asphaltique chaud
Surface non uniforme	Sceller au sable les zones nécessaires quelques semaines avant le gravillonnage pour obtenir une surface à la texture plus uniforme, ou ajuster le taux d'application de l'asphalte dans le sens longitudinal en utilisant des buses de différentes tailles ; à noter que le taux d'agrégat peut également être ajusté dans le sens longitudinal en réglant les portes de l'épandeur de gravillons ; ces deux méthodes nécessitent une coordination étroite entre l'inspecteur et l'entrepreneur pour garantir les taux d'application appropriés
<p>Gal = gallon et SY = verge carrée (1) Les émulsions à prise rapide et à basse température sont conçues pour se rompre "chimiquement" à des températures aussi basses que 4 °C. Elles ont encore besoin de températures chaudes (60 à 70 o F) (16 o C à 21 o C) pour durcir complètement. 1 gallon US = 3,79 litres , 1 SY = 0,84 m²</p>	

Source: modifié d'après Keller et al., 2011

7.3 Choix des revêtements en fonction de la disponibilité des matériaux

Dans certaines circonstances, un seul type de matériau peut être disponible localement, ce qui influence le choix des revêtements. Le tableau 7-4 présente les options de revêtement les plus appropriées en fonction

du principal type de matériau. Dans d'autres circonstances, le risque de surcharge des véhicules circulant sur la route influence le choix du revêtement. Enfin, le risque d'érosion des sections de route non revêtues existantes influence parfois le type de revêtement, ainsi que le choix de revêtir ou non la route. C'est le cas dans les zones à forte pluviométrie ou dans les zones à forte pente de route où le potentiel d'érosion peut être très élevé, en particulier dans les sols à grain fin mais à faible plasticité. Ces questions sont traitées dans le tableau 7-6 et le tableau 7-7.

Tableau 7-4: Sélection des revêtements en fonction de la disponibilité des matériaux

	Surface naturelle aménagée	Surface en terre battue	Macadam lié à eau et lié à sec	Pierres entassées à main	Blocs de pierres de pavage ou Pavé	Tangage des pierres	Pierres taillées / Cobble Stone	Pavage en briques d'argile cuites: Joints avec/sans mortier	Enduit superficiel de sable (sand seal)	Enduit superficiel de coulis bitumineux (Slurry Seal)	Enduit superficiel de granulats(chip seal)	Cape Seal	Otta seal	Béton non armé
Matériaux économiquement disponibles	S01	S02	S03	S04	S05	S06	S07	S08	S09	S10	S11	S12	S13	S14
Agrégat de pierre concassée			✓	✓						✓	✓	✓		✓
Pièces/blocs de pierre				✓	✓	✓	✓							
Gravier naturel		✓											✓	
Gravier colluvial/alluvial		✓											✓	
La roche altérée		✓												
Briques d'argile cuites								✓						
Sol argileux								✓						
Sable					✓	✓	✓	✓	✓	✓				✓
Ciment						✓		●						✓
Chaux										✓				
Bitume									✓		✓	✓	✓	
Émulsion de bitume									✓	✓	✓	✓		

Notes: ● Ciment uniquement pour joints au mortier.

Source, Cook et. al., 2013

Tableau 7-5: Sélection des revêtements en fonction du trafic et des régimes d'érosion

CATÉGORIE DE REVETEMENT	BASIQUE		PIERRES				BR	BITUME						BETON		
	Surface naturelle aménagée	Surface en terre battue	Macadam lié à eau et lié à sec	Pierres entassées à main	Blocs de pierres de pavage ou Pavé	Tangage des pierres	Pierres taillées	Pavage en briques d'argile cuites: Joints avec/sans mortier	Enduit superficiel de sable (sand seal)	Enduit superficiel de coulis bitumineux (Slurry Seal)	Enduit superficiel monocouche	Enduit superficiel bicouche	Cape Seal	Otta seal (monocouche)	Otta seal (bicouche)	Béton non armé
Régime de trafic : (voir Tableau 7-5)	S01	S02	S03	S04	S05	S06	S07	S08	S09	S10	S11	S11	S12	S13	S13	S14
Trafic léger	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Trafic modéré		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓				✓	✓	✓	✓	✓
Trafic lourd (risque de surcharge)					✓		✓					✓			✓	✓
Régime d'érosion (voir Tableau 7-6)																
A : régime de faible érosion	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
B : Régime d'érosion modérée				✓	✓	✓	✓	✓				✓	✓	✓	✓	✓
C : Régime d'érosion élevé					✓	✓	✓							✓	✓	
D : Régime d'érosion très important					✓	✓	✓							✓	✓	

Source, Cook et al., 2013

Tableau 7-6: Définition du régime indicatif de trafic

Catégorie indicative	Description du trafic
Légère	Principalement non motorisé, modes piéton et animal, motos & moins de 25 véhicules à moteur par jour, avec peu de véhicules moyens/lourds. Pas d'accès pour les véhicules surchargés. Typique d'une route rurale avec des charges par essieu individuelles allant jusqu'à 2,5 tonnes.
Modéré	Jusqu'à environ 100 véhicules à moteur par jour, y compris jusqu'à 20 véhicules de transport de marchandises de taille moyenne (10 tonnes), sans surcharge importante. Typique d'une route rurale avec des charges à l'essieu individuelles allant jusqu'à 6 tonnes.
élevée	Entre 100 et 300 véhicules à moteur par jour. Accessible par tous les types de véhicules, y compris les camions lourds et les camions à essieux multiples (3 essieux +), les routes de transport de matériaux de construction et de bois. Méthodologie de conception spécifique à appliquer.

Tableau 7-7: Définition du potentiel d'érosion

Gradient longitudinal du tracé de la route	PRECIPITATIONS ANNUELLES (mm)			
	< 1000	1000 - 2500	2500 - 4000	>4000
Plate (< 1%)	A	A	B	C
Modéré (1-3%)	A	B	B	C
Élevé (3-6%)	B	C	C	D
Très élevé (>6%)	C	C	D	D
A = faible ; B = modéré ; C = élevé ; D = très élevé				

Note: Les zones sujettes à des inondations régulières devraient être classées comme "à haut risque", indépendamment des précipitations.

Source, Cook et al., 2013

Bibliography

Austrroads, (2013). **Update of double/double design for Austrroads sprayed seal design method, AP-T236-13**. Sydney, Australia.

Cook, J. R., Petts, R. C., and Rolt, J. (2013). **Low Volume Rural Road Surfacing and Pavements: A Guide to Good Practice**. DFID, UK.

Jones, C. R., Mee, T. F., & Ford, W. G. (1992). **Performance of slurry seals used in paved road maintenance in Malaysia**. IRF/ARF Asia Pacific Regional Road Conference, Brisbane.

Keller, G., Wilson-Musser, S., Bolander, P., and Barandino, V. (2011). **Stabilization and rehabilitation measures for low-volume forest roads**. SDTDC-1177-1801. National Technology and Development Program, US Department of Agriculture, Forest Service, San Dimas, CA. USA.

Louw, K., & Schoeman, S. (2004). **Performance of Sand Seals in the Kruger National Park**. CAPSA'04 Proceedings. Sun City, South Africa: CSIR Transportek, Asphalt Academy.

Overby, C. (1999). **Guide to the use of Otta Seals. Publication No.93**. Norwegian Public Roads Administration, Oslo, Norway.

Transport Research Laboratory. (2000). **Overseas Road Note 3 A guide to surface dressing in tropical and sub-tropical countries**. Transport Research Laboratory, Crowthorne, Berkshire, UK.

SANRA. (2007). **TRH3 2007: Design and Construction of Surfacing Seals**. Pretoria, South Africa: The South African National Roads Agency Ltd.

van Zyl, G. D., & Fourie, H. G. (2015). **Key Aspects of Good Performing cape Seals**. CAPSA'15 Proceedings. Sun City, South Africa.

Wolff, H. & Visser, A. T. (1991). **Review of Surfacing for Low-Volume Roads on the Basis of Experience in South Africa**. In Transport Research Record 1291, TRD, National Research Council, Washington, D.C.

8 ÉVALUATION ÉCONOMIQUE DES RÉSULTATS DE LA CONCEPTION DES CHAUSSÉES

8.1 Contexte

L'analyse économique est souvent un élément important du processus de décision relatif aux investissements routiers. En général, plus l'investissement routier est important, plus il est probable qu'une certaine forme d'évaluation économique devra être entreprise pour justifier l'investissement. Cela est particulièrement vrai pour les investissements financés par des donateurs ou réalisés par les gouvernements de pays à revenu élevé. De même, les petites interventions, par exemple celles qui concernent l'entretien des routes ou la fourniture et la mise à niveau de routes à très faible trafic, ne feront généralement pas l'objet d'une analyse économique. Dans les pays à revenu élevé, une analyse économique complète est très largement utilisée pour prendre en compte les gains de temps pour les passagers et les véhicules dans la planification et la conception des infrastructures routières interurbaines et urbaines. Cependant, la façon dont l'analyse économique est utilisée pour choisir la conception des chaussées est souvent beaucoup moins claire. Cette note sur les routes rurales fournit des conseils sur quelques outils économiques qui peuvent être utilisés pour choisir entre les options disponibles ou pour montrer qu'une option de conception est économiquement viable.

8.2 Objectif et portée

Ce chapitre examine les outils et procédures d'analyse économique alternatifs pour la planification des routes rurales à faible volume. Le processus commence souvent par un classement afin de sélectionner les routes rurales à améliorer, c'est pourquoi une méthodologie de classement est brièvement présentée. L'analyse du coût du cycle de vie - Life Cycle Cost Analysis (LCCA) - et des modèles tels que le modèle de décision économique routière (RED) et le modèle de développement et de gestion des routes (HDM-4) sont examinés. Les principales données d'entrée sont identifiées, ainsi que l'utilisation de différents critères de décision tels que la valeur actuelle nette (VAN) et le taux de rendement interne (TRI). Un exemple de l'utilisation du modèle RED est donné.

8.3 Classement et critères de rentabilité

Une approche simple pour décider d'améliorer une route ou un tronçon de route en fonction d'une norme de revêtement consiste à examiner les sommes dépensées annuellement pour le nivellement et le rechargement de gravier. Le volume de trafic et les facteurs environnementaux influencent souvent le nombre de cycles de nivellement et de rechargement de gravier requis. Si une route est importante sur le plan fonctionnel, elle sera maintenue en bon état grâce à un nivellement et un reprofilage opportuns. Par conséquent, les dépenses consacrées à ces routes sont souvent un bon indicateur des routes à prendre en considération pour leur mise à niveau et pour une analyse économique détaillée ultérieure.

Néanmoins, la sélection des routes rurales et des routes de desserte à faible volume à moderniser est souvent planifiée et hiérarchisée à l'aide de procédures formelles de "classement" ou de "sélection". La rentabilité et l'analyse multicritère (AMC) sont des exemples de ces procédures. Bien que ces méthodes ne soient pas principalement utilisées pour déterminer la conception des chaussées en fonction de critères d'ingénierie, elles influenceront inévitablement le choix des interventions dans différentes circonstances.

Les différentes procédures de classement et de rentabilité ont de nombreuses formulations, mais elles ne sont pas délibérément conçues pour s'inscrire dans un cadre économique conventionnel. Les procédures comprennent souvent des indicateurs ou des mesures de la demande, du besoin ou du bénéfice, tant sur le plan social qu'économique. Par rapport à une évaluation économique conventionnelle, on accorde moins d'attention à la précision de la couverture des prestations. Parfois, la procédure comprendra une méthode d'intégration de la consultation dans la sélection et la priorisation des investissements routiers.

Un exemple de critère de rentabilité a été proposé par Lebo et Schelling (2001) pour les routes à très faible trafic. Ici, les coûts de construction et la population sont les facteurs critiques.

Indicateur de rentabilité de la liaison (j)

$$= \frac{\text{(Coût de la mise à niveau du lien(j) vers la norme d'accès de base)}}{\text{Population desservie par le lien(j)}}$$

Avec cette méthode, l'amélioration des liaisons qui ont le plus faible ratio est la plus grande priorité. Dans cet exemple, on peut voir que les solutions de conception des routes qui atteignent un niveau d'accès de base, à un coût minimum pour la plus grande population, (par exemple par une approche d'"amélioration ponctuelle"), seront sélectionnées.

L'analyse multicritères (AMC) est souvent utilisée pour combiner les considérations économiques, sociales, environnementales et autres dans le choix final des alternatives pour les investissements dans les routes principales et rurales. Pour chaque caractéristique, les différents projets sont évalués et classés par ordre d'importance (par exemple, 1er, 2e, 3e, etc.). Ce processus est ensuite répété pour les autres caractéristiques. Des poids sont ensuite attribués à chaque caractéristique et une note globale est obtenue. Le processus est illustré ci-dessous dans le tableau 8-1. Dans ce tableau, pour obtenir le résultat souhaité, le classement est présenté dans l'ordre inverse, c'est-à-dire que le rang le plus élevé se rapporte au meilleur. Le classement et les pondérations attribuées sont généralement subjectifs, de sorte que la qualité de l'analyse dépend en grande partie des personnes bien informées et de leur expérience.

Tableau 8-1: Exemple d'analyse multicritères

Critères	Alternatif 1			Alternatif 2			Alternatif 3		
	Position	Pondération (%)	Résultat	Position	Pondération (%)	Résultat	Position	Pondération (%)	Résultat
Évaluation économique	3	50	150	1	50	50	2	50	100
Évaluation environnementale	2	30	60	3	30	90	3	30	90
Développement	3	10	30	2	10	20	1	10	10
Transports publics	3	5	15	2	5	10	2	5	10
Accessibilité/ Séparation	1	5	5	2	5	10	3	5	15
Résultat global	-	-	260	-	-	180	-	-	225

Bien que le modèle HDM-4 et le modèle RED soient principalement utilisés comme modèles économiques, tous deux disposent d'une fonction d'analyse multicritère pour aider à la planification.

8.4 Critères de décision économique (VAN, TRI, TRPA, VAN/C)

est très bon pour la sélection des projets, en particulier lorsque les informations sont limitées ou les incertitudes majeures. Les modèles d'évaluation économique des routes résumant leurs résultats finaux par des critères de décision économique. Les différents critères peuvent être utilisés pour répondre à différents objectifs.

- **Valeur actuelle nette (VAN).** La VAN est calculée en actualisant les coûts et les avantages du projet à l'aide d'un taux d'actualisation économique. (Le taux d'actualisation économique est abordé plus loin dans le chapitre.) Une VAN positive est le critère permettant de déterminer si un projet est valable ou non. Plus la VAN est importante, meilleur est le projet. La **VAN est le meilleur critère pour choisir entre différentes alternatives**, à condition qu'il n'y ait pas d'incertitudes majeures ou de problèmes de contraintes budgétaires.

- Taux de Rentabilité Interne (TRI). Le TRI (également appelé taux de rentabilité interne économique, TRIE) est calculé en estimant le taux d'actualisation qui égalise les flux de coûts et de bénéfices. Si le TRI est supérieur au taux d'actualisation économique, le projet est viable. Plus le TRI est élevé, plus le projet est solide. Le TRI. Cependant, le TRI ne peut pas faire la distinction entre un grand ou un petit projet. ***Il ne peut donc pas aider à choisir entre des projets qui s'excluent mutuellement, comme par exemple la construction d'une route en terre ou d'une route revêtue au même endroit.***
- Taux de Rentabilité de la Première Année (TRPA). Le TRPA est calculé en divisant la première année de bénéfices nets complets par les coûts de construction d'un projet. Le TRPA est utilisé pour voir si le calendrier du projet est optimal. Ainsi, si un projet a un TRPA supérieur au taux d'actualisation économique, alors le calendrier du projet est optimal et le projet peut aller de l'avant. Si, en revanche, le taux de croissance annuel moyen est inférieur au taux d'actualisation, même si le projet peut être économiquement viable à long terme, il est préférable de reporter le démarrage du projet.
- La Valeur Actuelle Nette/les coûts de Construction (VAN/C). La VAN/C est utilisée en cas de contraintes budgétaires. Un ensemble de projets peut être économiquement viable, mais en raison d'un manque de fonds, tous ne peuvent pas être construits. Si les projets sont classés dans l'ordre du ratio VAN/C, alors en sélectionnant le projet le mieux classé en premier et le suivant en second et ainsi de suite, il est possible d'obtenir la VAN la plus élevée pour le budget limité.

Il est possible de calculer la VAN et le TRI d'un flux d'avantages nets très simplement en utilisant un tableur comme Excel. Ainsi, l'expression Excel : =TRI (E5:E25) renverra le TRI de la colonne des nombres représentés de E5 à E25. De même, l'expression Excel : =VAN (0,06, E5:E25) renverra la VAN de la même colonne actualisée par un taux d'actualisation de 6%. L'exemple ci-dessous illustre l'utilisation de la VAN, du TRI et de l'TRPA.

8.5 Choix de l'outil économique approprié

Après avoir classé et sélectionné les routes à améliorer, l'outil d'analyse économique à utiliser pour l'évaluation des LVRR doit être choisi dans cette hiérarchie :

1. Une simple comparaison des coûts de construction initiaux si deux ou plusieurs options offrant une qualité de roulement similaire (rugosité) doivent être comparées ou si le trafic de conception est inférieur ou égal à 300 000 ESA ou si le coût initial total des travaux est inférieur à l'équivalent de 3 millions de dollars US. Les seuils spécifiques à chaque pays ont la priorité sur ces limites ;
2. Si le trafic de conception est supérieur à 300 000 ESA ou si le coût initial total des travaux est supérieur à l'équivalent de 3 millions de dollars US, ou s'il existe des différences significatives dans la qualité de roulement mais que le trafic de conception est inférieur à 300 000 ESA, alors effectuez une analyse du coût du cycle de vie (LCCA) en utilisant une simple feuille de calcul, le RED ou un autre outil. Inclure d'autres indicateurs tels que la VAN, le TRI, l'TRPA, la VAN/C pour la comparaison des options. Les seuils spécifiques à chaque pays ont la priorité sur ces limites ;
3. Utilisation du modèle de décision économique routière (RED) si les options à comparer entraînent des différences de qualité de conduite (rugosité) si le financier l'exige, quel que soit le niveau d'investissement ;
4. Utilisation de l'analyse HDM-4 pour l'amélioration d'un grand nombre de routes dans le cadre d'un programme d'amélioration ou si le financier l'exige, quel que soit le niveau d'investissement.

Il convient de noter que les options courantes à envisager sont souvent l'entretien d'une route en terre ou sa mise à niveau à une norme de revêtement.

Une analyse économique n'est pas requise dans les cas suivants :

1. Pour les travaux d'amélioration ponctuelle visant à améliorer l'accès ou la sécurité,
2. Les routes qui ont été sélectionnées pour être améliorées parce qu'elles remplissent une fonction importante sur le plan social, comme l'accès aux établissements de santé ou aux écoles.

8.6 Analyse du coût du cycle de vie (LCCA)

L'approche fondamentale de l'analyse du coût du cycle de vie est de minimiser les coûts à long terme de la fourniture du revêtement routier. Par conséquent, dans la plupart des exemples, le choix de la conception est basé sur l'estimation des coûts de construction et d'entretien des différentes conceptions pendant la durée de vie de la chaussée, qui peut aller de 15 à 20 ans. Toutefois, la période d'analyse peut aller jusqu'à 40 ans. Cela s'explique par le fait que la structure de la chaussée aura toujours une valeur de récupération à la fin de sa durée de vie (15-20 ans) et que d'autres améliorations, telles que les ponceaux et les drains revêtus, dureront plus de 20 ans. Pour la plupart des exemples de LCCA, les coûts d'entretien futurs sont actualisés à l'aide d'un taux d'actualisation de planification, de sorte qu'un dollar de coûts d'entretien vaut moins à l'avenir qu'aujourd'hui. (L'actualisation est abordée plus en détail plus loin dans le texte).

L'effet des revêtements routiers sur les coûts d'utilisation n'est généralement pas pris en compte dans les approches LCCA. Le ministère américain des transports (1998) et l'agence britannique des routes (2006) prennent en compte les coûts pour l'utilisateur associés aux perturbations pendant la construction et l'entretien, mais aucune des deux agences ne prend en compte les effets sur les coûts pour l'utilisateur résultant des différences de revêtements routiers (par exemple, la rugosité des routes). Il convient de noter que les perturbations du trafic ne s'appliquent pas aux LVRR dans les pays à faible revenu, sauf si la route en question est coupée. Le ministère américain des transports (1998) et le guide Austroads (2009) reconnaissent tous deux que les coûts d'exploitation des véhicules (COV) sont susceptibles d'augmenter avec la rugosité des revêtements routiers, mais en raison du manque de données pour leurs pays respectifs, ils ne prennent pas explicitement en compte les COV dans leur analyse. Austroads limite l'analyse du coût du cycle de vie à la construction et à l'entretien. Dans son analyse des chaussées routières souples, le ministère sud-africain des transports (1996) minimise la valeur actuelle des coûts de construction et d'entretien dans l'avenir et suppose que les coûts pour l'utilisateur dans les alternatives seront les mêmes.

Il convient de souligner qu'une analyse du coût du cycle de vie qui omet les coûts pour l'utilisateur a très peu de chances de favoriser une solution de route revêtue lorsqu'elle est comparée à une option de route en terre. Cela est dû au fait que les coûts de construction et d'entretien des routes en terre ont tendance à être beaucoup moins élevés que ceux des options revêtues. Dans un tel exemple, les avantages d'une réduction des coûts pour l'utilisateur associés à la route revêtue seraient ignorés. Il n'est donc pas recommandé d'utiliser l'approche LCCA pour comparer les routes en terre et les routes revêtues.

Un exemple détaillé de la manière de calculer et de comparer les coûts du cycle de vie est fourni par le ministère américain des transports¹. Les résultats de l'analyse sont présentés dans les tableaux 8-2 et 8-3. Dans l'exemple, deux alternatives sont envisagées qui impliquent des coûts initiaux et ultérieurs différents pour l'agence et l'utilisateur. Le tableau 8-1 montre les coûts en dollars constants des deux alternatives, tandis que le tableau 8-3 montre comment les coûts futurs sont actualisés avec un taux d'actualisation de planification de 4 %. Une valeur résiduelle est incluse à la fin de la période de planification, après 35 ans. Les valeurs actuelles des coûts totaux du cycle de vie sont calculées et présentées dans le tableau 8-3.

Tableau 8-2: Un exemple d'analyse du coût du cycle de vie (Source US DoT)

Année	Activités de l'alternatif A		Activités de l'alternatif B	
	Coûts de l'agence (\$)	Coûts de l'agence (\$)	Coûts de l'agence (\$)	Coûts de l'agence (\$)
0	26,000,000	11, 000,000	20,000,000	8,000,000
12			6,000,000	10,000,000
20	15,000,000	30,000,000	6,000,000	16,000,000
28			6,000,000	28,000,000
35	(3,750,000)	(7,500,000)	(750,000)	(3,500,000)

Les coûts de l'année 0 comprennent les coûts de construction initiaux et les coûts d'utilisation associés aux dérivations qui peuvent être nécessaires en raison de la construction. Les coûts des années 12, 20 et 28

¹ <https://www.fhwa.dot.gov/asset/lcca/010621.pdf>

sont les coûts de réhabilitation et les coûts d'utilisation associés. Chaque alternative a une durée de vie différente. Les valeurs (négatives) indiquées pour l'année 35 sont une valeur résiduelle de la durée de vie restante de l'investissement, y compris les estimations des coûts de l'agence et des coûts d'utilisation.

Tableau 8-3: Analyse des coûts du cycle de vie montrant les coûts actualisés

Année	Facteur d'actualisation	Alternatif A		Alternatif B	
		Facteur d'actualisation	Facteur d'actualisation	Facteur d'actualisation	Facteur d'actualisation
0	1.000	26,000,000	11,000,000	20,000,000	8,000,000
12	0.6246			3,747,582	6,245,970
20	0.4564	6,845,804	13,691,608	2,738,322	7,302,191
28	0.3335			2,000,865	9,337,369
35	0.2534	(950,308)	(1,900,616)	(190,062)	(886,954)
Valeur actuelle totale des coûts		31,895,496	22,790,992	28,296,707	29,998,567

Dans l'exemple, l'alternative avec les coûts initiaux d'agence les plus élevés (alternative A) est présentée dans le tableau 8-3 pour donner les coûts actualisés globaux les plus bas et donc la meilleure option. Cet exemple montre les dangers de n'utiliser que le coût initial pour évaluer les alternatives et l'avantage d'utiliser les coûts actualisés du cycle de vie.

Les valeurs résiduelles (ou de récupération) peuvent être incorporées dans l'analyse lorsqu'il reste une valeur économique substantielle à la fin de la période d'analyse. Comme le montre l'analyse des coûts du cycle de vie ci-dessus, un coût négatif (c'est-à-dire un avantage) peut être incorporé à la fin de la période d'analyse. Toutefois, il faudra multiplier ce coût par le facteur d'actualisation approprié. Lorsque la cote d'actualisation est élevée et que l'horizon de planification est long, les valeurs résiduelles ne feront généralement guère de différence pour la viabilité globale du projet. Néanmoins, il peut être utile de se pencher sur la question. À titre d'exemple, pour une cote d'actualisation de 6 %, le facteur d'actualisation après 20 ans est 0.3305. Si une valeur résiduelle de 20 % est estimée pour un investissement, cela équivaldrait à réduire les coûts d'investissement de 6,6 %.

8.7 Le Road Economic Decision Model (RED)

Le Road Economic Decision Model (RED) a été préparé pour le programme de transport de l'Afrique subsaharienne (SSATP) par la Banque mondiale (Banque mondiale 2006)². Le RED est un modèle basé sur un tableur qui est dérivé de HDM-4. Le RED est relativement simple à utiliser et ne nécessite pas de formation spécialisée. Cependant, le RED nécessite une personne ayant des connaissances d'ingénierie et connaissant bien les aspérités de la route et les interventions typiques. Le RED est principalement utilisé pour l'évaluation des routes non revêtues et peut être utilisé pour la mise à niveau vers une norme de route revêtue.

Le principal avantage de RED est qu'il permet de calculer les coûts d'exploitation des véhicules à partir de simples données d'entrée³. RED n'inclut pas les relations entre la détérioration des routes et les effets des travaux (par exemple les équations de perte de gravier) qui sont incorporées dans HDM-4. Par conséquent, contrairement à HDM-4, l'état des routes n'est pas censé changer d'année en année. Pour les besoins du modèle, les coûts d'entretien doivent être calculés en moyenne sur la durée de vie du projet et l'état de la route doit être considéré comme constant pendant la période d'évaluation pour chaque solution envisagée. En se basant sur son jugement technique, l'utilisateur doit sélectionner les niveaux de rugosité associés "avec" et "sans" l'intervention proposée. Comme la vitesse du véhicule est associée à l'uni, la vitesse peut également être utilisée dans le modèle pour vérifier ou déterminer les niveaux d'uni appropriés.

² <https://collaboration.worldbank.org/content/sites/collaboration-for-development/en/groups/world-bank-road-software-tools.html>

³ Une version actualisée du modèle de coût pour l'usager de la route, HDM4RUC Version 5.0.zip, est également disponible sur le même site de la Banque mondiale, Road Software Tools : : <https://collaboration.worldbank.org/content/sites/collaboration-for-development/en/groups/world-bank-road-software-tools.html>

Comme HDM-4, le modèle a un cadre économique et peut calculer des critères de décision tels que le TRIE et la VAN. Pour accroître la flexibilité et explorer les conséquences financières des différents traitements d'entretien périodique, de nombreux consultants utilisent le COV et le gain de temps du RED et intègrent les résultats dans leurs propres modèles. Un exemple de la manière dont le RED peut être utilisé est donné ci-dessous.

8.8 Le modèle de développement et de gestion des routes (HDM-4)

L'approche de base du HDM-4 (Banque mondiale 2000) diffère des approches LCCA décrites ci-dessus en ce sens qu'elle prend explicitement en compte l'effet des différents revêtements routiers sur les coûts pour les usagers de la route. En effet, elle adopte une approche d'"économies totales sur les coûts de transport", dans laquelle les économies réalisées sur les coûts des usagers de la route sont comparées aux coûts d'investissement et d'entretien supplémentaires. Les principaux facteurs affectant les coûts pour les usagers de la route sont la vitesse des véhicules (déterminée par la largeur et l'alignement de la route, en combinaison avec le volume de trafic) et la rugosité de la route. Un nombre important de recherches ont été menées au Brésil, au Kenya, dans les Caraïbes et en Inde pour développer ce modèle dans les années 1970 à 1990. HDM-4 contient un large éventail de relations modélisées pour les routes revêtues et non revêtues, couvrant la détérioration des routes, les effets de l'entretien, les vitesses des véhicules et les coûts d'exploitation des véhicules. Comme les routes se détériorent au fil du temps avec la circulation et les conditions météorologiques, on prévoit que la rugosité augmentera et que les coûts d'exploitation des véhicules augmenteront. Le modèle a un cadre économique qui comprend des critères de décision tels que le taux de rentabilité interne économique (TRIE) et la valeur actuelle nette (VAN). Les conceptions alternatives de routes et les traitements d'entretien peuvent être évalués en détail.

Malgré la sophistication de l'approche HDM, la précision de la modélisation des COV suscite des inquiétudes particulières (Cundill et. al. 1997), en outre, les parcs de véhicules ont considérablement changé au fil du temps, sans que les relations soient actualisées.

HDM-4 est la principale méthode d'évaluation recommandée par la Banque mondiale et d'autres organismes donateurs et elle est utilisée en particulier pour les routes à fort trafic. Le modèle peut également être utilisé pour étudier la pertinence et le calendrier des différentes interventions d'entretien des routes. Ainsi, pour les routes non revêtues, la perte de gravier peut être prédite à partir de données relatives au trafic, au climat, à la pente et aux propriétés du gravier. Pour les routes revêtues, il est possible de prévoir l'apparition de fissures, d'effritement et de nids-de-poule pour différentes surfaces et épaisseurs de couche en fonction du climat et du volume de trafic.

Cependant, l'utilisation du modèle nécessite au moins une semaine de formation formelle ainsi qu'une période de familiarisation substantielle.

8.9 Données clés pour une analyse économique des transports

8.9.1 Trafic

Les schémas de circulation varient d'un endroit à l'autre, d'un jour à l'autre et selon la période de l'année. En général, plus le débit est élevé, moins la variation est importante. Dans certains endroits, il peut y avoir une forte poussée les jours de marché. Toutefois, pour compliquer les choses, la périodicité des marchés variera également. Les jours fériés, les week-ends et la fin du mois peuvent également avoir des effets prononcés. De nombreux pays ont procédé à des comptages complets du trafic classifié jour par jour tout au long de l'année sur le réseau routier principal. Grâce à ces données, il est possible de fournir des facteurs qui montrent en gros comment le flux de trafic varie selon le type de véhicule et d'un mois à l'autre. À partir de ces données, les comptages de trafic peuvent être ajustés pour estimer les flux moyens annuels. En l'absence d'autres données, sur les routes rurales, il a été suggéré que les comptages soient effectués deux semaines par an, une semaine pendant la saison sèche et une semaine pendant la saison des pluies (Howe, 1972). Si le principal effort de comptage porte uniquement sur les flux diurnes, il faut procéder à des ajustements pour tenir compte des flux nocturnes (par exemple, compter pendant trois nuits). Il faut également veiller à ce

que les stations de comptage soient représentatives de la route étudiée, et prendre des mesures pour éviter de se trouver dans un village ou une ville, et loin des carrefours importants.

Les taux de croissance du trafic peuvent être établis à partir de programmes de comptage du trafic à long terme, organisés au même endroit chaque année. Les ventes annuelles de carburant peuvent également fournir une indication de la croissance du trafic.

8.9.2 8.9.2 Coûts d'exploitation des véhicules (COV) et valeurs temporelles

Pour estimer les coûts d'exploitation des véhicules dans des modèles tels que HDM-4 ou RED, il est nécessaire d'entrer le coût économique des véhicules, des pneus, du carburant, de l'huile, de l'équipage et des coûts des mécaniciens. Dans la modélisation de la consommation de pièces détachées, on utilise les prix des véhicules neufs, même si les véhicules sont importés dans le pays en seconde main. Dans la modélisation globale des coûts, on suppose qu'il y a un compromis entre les coûts d'amortissement et les coûts d'entretien. Tous les prix sont exprimés en termes économiques, de sorte que toutes les taxes et subventions doivent être supprimées. Des données telles que la distance parcourue par an, les heures d'utilisation annuelles, le nombre de passagers et la durée de vie sont nécessaires, ainsi que le poids brut des véhicules.

Les valeurs de temps des passagers sont également requises. Des études ont été menées pour estimer la valeur du temps dans les pays en développement (Whittington et Cook, 2018). Elles sont souvent estimées à environ un tiers à la moitié du taux de salaire. En Indonésie, par exemple, on a constaté que la valeur du temps passager par heure se situait entre un centième et deux centièmes des dépenses mensuelles des ménages, avec des valeurs plus élevées par rapport aux dépenses (ou aux revenus) pour les personnes les plus pauvres. (Hine et al, 2000).

8.9.3 Inflation

Tout au long de l'horizon de planification de l'analyse économique, tous les prix doivent être exprimés en termes de prix constants. Par conséquent, l'inflation des prix, dans le cadre de la planification, n'est pas autorisée pendant la période d'évaluation.

8.9.4 Prix économiques et facteurs de conversion standard (SCF)

Tant les coûts d'exploitation des véhicules que les coûts de construction et d'entretien doivent être exprimés en termes de prix économique, hors taxes et subventions, à une date donnée. Dans certains pays, des facteurs de conversion standard - Standard Conversion Factors (SCF) - sont publiés et utilisés pour convertir les coûts financiers de construction et d'entretien en prix économiques. Généralement, le SCF peut être d'environ 0,85 pour la conversion des coûts de construction et d'entretien.

Il n'est pas courant d'avoir un SCF pour les coûts d'exploitation des véhicules car le taux d'imposition varie considérablement selon les composants tels que le carburant, les pneus et les véhicules.

8.9.5 Le taux d'actualisation économique

Le taux d'escompte économique (parfois appelé taux d'escompte social) est similaire (mais pas identique) à un taux d'intérêt financier ou "taux d'escompte" utilisé par les gouvernements pour emprunter de l'argent. Il représente une baisse de valeur prévue dans le temps ; une livre, ou un dollar, vaut moins à l'avenir qu'aujourd'hui. Cela représente à la fois une préférence sociale et le fait que les fonds peuvent être investis pour produire un rendement plus élevé plus tard. Au cours des trente dernières années, il était courant d'adopter des taux d'actualisation relativement élevés (généralement de l'ordre de 10 à 12 %) pour les projets de développement. Cependant, en 2016, la Banque mondiale a publié de nouvelles orientations. Celle-ci suggère que pour les pays dont la croissance est d'environ 3 % par habitant et par an, le taux devrait être de 6 %. La note souligne qu'entre 1990 et 2010, la croissance annuelle moyenne par habitant dans les pays clients de la Banque mondiale était de 2,5 %.

Un taux plus élevé peut être justifié pour des taux de croissance exceptionnellement élevés, et un taux plus faible lorsque les perspectives de croissance à long terme sont limitées (Banque mondiale, 2016).

8.9.6 Coûts de construction et d'entretien

Les coûts de construction et d'entretien varient considérablement d'un pays à l'autre, d'un endroit à l'autre et dans le temps, avec des variations dans la disponibilité des matériaux, l'efficacité de l'économie et des facteurs tels que le prix du carburant. Toutefois, la source d'information la plus complète sur les coûts de construction et d'entretien est peut-être la base de données du système de connaissance des coûts routiers - World Bank's Road Cost Knowledge System (ROCKS database) - de la Banque mondiale, qui a été constituée à partir de plus de 3 000 enregistrements dans 89 pays, sur la période allant de 1995 à 2005 (Banque mondiale, 2006)⁴. Des exemples d'éléments de coûts clés sont présentés dans le tableau 8-4 (il est à noter que les coûts figurant dans le tableau sont désormais assez anciens et qu'il conviendrait de rechercher de nouveaux coûts actualisés si la Banque mondiale ne les met pas à jour).

Bien que les difficultés et les coûts liés à la recherche de gravier de bonne qualité aient suscité des inquiétudes, il a néanmoins été constaté que les routes en terre étaient nettement moins coûteuses à construire que les routes revêtues. C'est souvent l'analyse des coûts du cycle de vie qui montre les avantages de l'amélioration des routes en terre. Le tableau 8-4 indique que le coût initial de l'amélioration d'une route bitumineuse à deux voies de 6 mètres de large est environ quatre à cinq fois plus élevé que celui de l'amélioration d'une route en terre à deux voies de 6 mètres de large.

Ces dernières années, grâce au développement de routes bitumées à faible coût utilisant des matériaux locaux et moins chers, le coût des routes bitumées a diminué alors que le coût du gravillonnage régulier d'une route en terre n'a pas diminué. Bien que cela puisse réduire considérablement les coûts de revêtement, les routes revêtues restent néanmoins souvent coûteuses parce que des normes de conception beaucoup plus élevées, reflétant des vitesses de conception plus élevées et les normes de sécurité nécessaires, sont invariablement adoptées pour les routes revêtues.

Toutefois, lorsqu'une décision importante doit être prise concernant l'infrastructure, il est important qu'une évaluation précise et actualisée des coûts soit effectuée pour éclairer la décision, qu'une analyse économique soit entreprise ou non.

⁴ <https://collaboration.worldbank.org/content/sites/collaboration-for-development/en/groups/world-bank-road-software-tools.html>

Tableau 8-4: Coûts comparatifs de la base de données ROCKS (version 2.3)

Type de travail	(Coût moyen de l'intervention : US\$/Km pour des routes de 6 m de large)		
	Afrique	Asie de l'Est et Pacifique	Monde
Entretien de routine, route en terre battue	1,617	604	788
Entretien courant, revêtue	2,323	543	1,964
Nivellement léger	205	-	110
Nivellement lourde	491	-	430
Rechargement des gravier	9,775	11,362	11,278
Coulis bitumineux ou Cape Seal	12,970	6,256	8,695
Traitement monocouche	18,353	18,254	18,254
Traitement Bicouche	18,767	13,146	27,968
Rechargement enrobé de 40 à 59 mm	51,332	52,438	68,183
Rechargement enrobé de 60 à 79 mm	91,905	81,750	81,270
Rechargement enrobé de 80 à 99 mm	127,548	86,316	112,285
Rechargement enrobé de > 99 mm	181,992	114,365	157,360
Reconstruction route en terre	17,830	-	17,724
Reconstruction route en terre battue	30,473	56,054	43,924
Reconstruction route Bitumée	190,031	134,965	178,945
Mise à niveau vers route en terre 2L.	12,592	-	13,432
Mise à niveau vers route en terre battue 2L.	56,605	27,802	49,636
Mise à niveau vers la route Bitumée 2L.	254,578	165,754	222,707

Source : Banque mondiale, 2006. Note : Les données ont été tirées des projets de la Banque mondiale entrepris entre 1995 et 2005. Les prix sont exprimés en dollars américains pour l'année 2000. L'entretien de routine des routes en terre battue comprend le nivellement, le rechargement de gravier ponctuel, le nettoyage des drains et la tonte de l'herbe. L'entretien de routine des routes revêtues comprend le ragréage des nids de poule, la réparation des accotements, le nettoyage du drainage et la tonte de l'herbe.

8.9.7 Rugosité des routes

La rugosité de la route est une mesure de l'irrégularité de la surface de la route. Elle est particulièrement importante pour la planification des routes car elle est un facteur déterminant des coûts d'exploitation des véhicules et constitue un élément clé des modèles HDM-4 et RED. Plus la rugosité de la route est élevée, plus les coûts d'entretien et la consommation de carburant des véhicules sont importants. La rugosité est mesurée à l'aide de différents instruments (par exemple, un profilomètre laser, un intégrateur de chocs monté sur le véhicule) qui sont calibrés en fonction de l'indice international de rugosité (IRI). La rugosité est mesurée en termes de mètres par kilomètre.

Une route revêtue aura normalement une rugosité allant de 1 à 8 IRI alors que la rugosité d'une route en terre variera généralement de 4 à 16 IRI. Une route en mauvais état peut avoir une rugosité supérieure à 20 IRI. Une route avec une rugosité supérieure à 25 IRI est souvent considérée comme "non praticable".

Sur les routes en terre battue et en terre, la rugosité est fortement influencée par :

- 1) La politique d'entretien ;
- 2) le volume du trafic ;
- 3) Qualité du gravier. Les grosses particules augmentent la rugosité de la route. Les routes en terre se détériorent généralement plus vite que les routes en gravier. Ainsi, pour un même volume de trafic et une même fréquence de nivellement, elles auront tendance à être plus rugueuses que l'équivalent des routes en gravier.

Le modèle HDM-4 peut être utilisé pour prédire la rugosité des routes avec différentes fréquences de nivellement, différents niveaux de trafic et différentes caractéristiques du gravier. Les effets de la fréquence de nivellement sur la rugosité sont illustrés à la Figure 8-1.

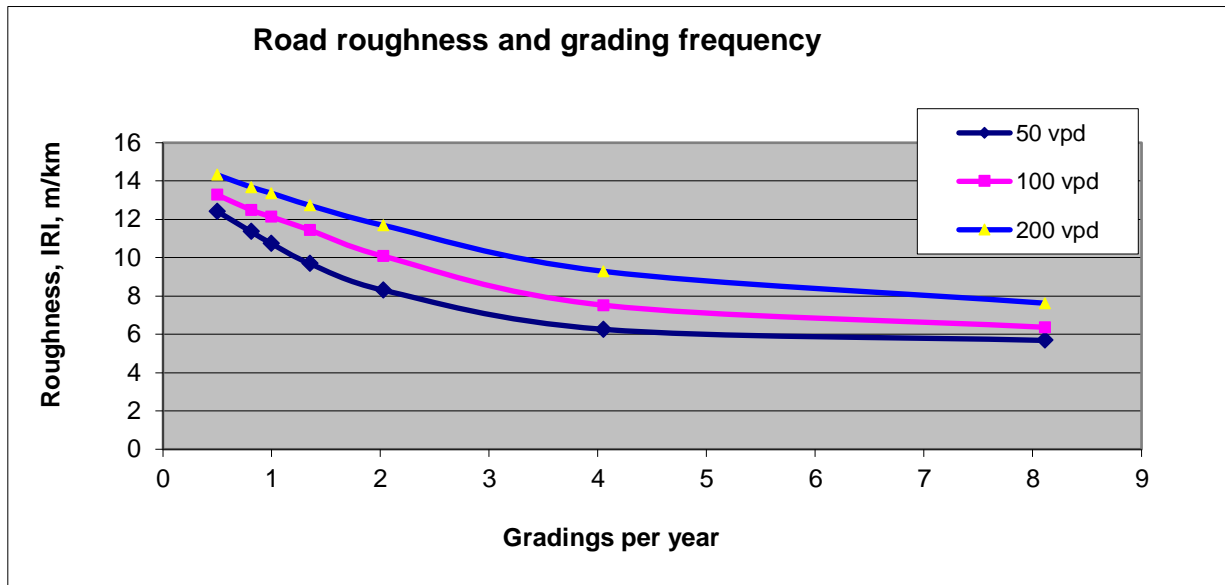


Figure 8-1:- Rugosité de la route et fréquence de nivellement pour une route en terre battue

La vitesse du véhicule peut être utilisée pour aider à prédire les aspérités de la route en termes de vitesse de conduite confortable sur une route droite plate. Les modèles HDM-4 et RED prédisent la vitesse du véhicule à partir de la rugosité, mais la vitesse est également fortement influencée par la pente, la largeur de la route, la distance de visibilité et la courbure de la route. Par exemple, sur une route présentant une rugosité de IRI 4, la vitesse d'une voiture sans contrainte peut être de 90 km/h, mais elle peut être de 40 km/h ou moins pour une rugosité de IRI 15.

8.10 Un exemple d'analyse économique utilisant le modèle

L'exemple hypothétique suivant est inclus pour montrer comment une analyse économique peut être effectuée en utilisant le modèle de décision économique routière (RED). Le RED est un modèle basé sur une feuille de calcul qui est relativement simple à utiliser et ne nécessite pas de formation spécialisée. En revanche, une formation est nécessaire pour utiliser efficacement le modèle HDM-4.

Le principal avantage du RED est qu'il permet de calculer les coûts d'exploitation des véhicules et les gains de temps à partir de simples données d'entrée. RED n'inclut pas les relations entre la détérioration des routes et les effets des travaux qui sont incorporées dans HDM-4. Cependant, RED nécessite une personne ayant des connaissances d'ingénierie qui connaît bien les conditions de la route et les interventions typiques. Pour chaque année de l'horizon de planification, HDM-4 prédira les valeurs de rugosité de la route à partir de la géométrie de la route, de l'état de la surface de la route, du trafic et des interventions d'entretien. Cependant, pour RED, l'utilisateur doit entrer la valeur moyenne de rugosité attendue pour chaque alternative envisagée. Pour les routes non revêtues, la rugosité dépend des volumes de trafic et des gradins par an.

Le modèle RED comprend un module de coût d'exploitation des véhicules (COV) et le module principal. L'utilisateur calcule d'abord les COV dans le module COV, puis ces données sont introduites dans le module principal qui peut calculer les COV et la valeur des avantages temporels, pour un investissement spécifique, ainsi qu'estimer la VAN et le TRI.

De nombreux planificateurs extraient les résultats du module COV de la RED et les bénéfices en temps du module principal de la RED pour entreprendre des analyses supplémentaires dans leur propre feuille de

calcul. Par exemple, il est plus facile d'ajouter un reclassement périodique, ou une nouvelle étanchéité, par le biais d'une analyse séparée, que dans le cadre du module RED.

Le tableau 8-5 donne un exemple de données saisies dans le module COV, où les données sur les coûts économiques et l'utilisation des véhicules sont saisies par l'utilisateur. Des prix économiques sont utilisés, qui excluent les taxes et les subventions. Le prix du véhicule se réfère à un véhicule neuf.

Une fois les COV calculés, l'utilisateur entre les données relatives au trafic (tableau 8-6) et à l'investissement (tableau 8-7), les coûts d'entretien (tableau 8-8) et la rugosité prévue. Le tableau 8-9 donne des exemples de COV par km et de vitesses de circulation.

Tableau 8-5: Données d'entrée des véhicules

Item	Voiture moyenne	Quatre roues motrices	Autobus léger	Bus lourd	Camion moyen	Chariot pour animaux	Motocyclette	Bicyclette
Coûts unitaires économiques								
Coût d'un nouveau véhicule (\$)	22,000	50,000	30,000	110,000	95,000	200	1,000	110
Coût du carburant (\$/litre)	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0
Coût du lubrifiant (\$/litre)	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	0
Coût des pneus neufs (\$/pneu)	100	180	160	370	370	20	40	0
Maint. Coût du main d'œuvre (\$/heure)	3	3	3	3	3	2	3	1
Coût de l'équipage (\$/heure)	1.8	1.8	3.9	5.4	3.9	1	1.5	1.5
Coût par passager/heure.	2	2	0.5	0.5	0.5	0	0.5	0.5
Taux d'intérêt (%)	10	10	10	10	10	10	10	10
Utilisation et chargement								
Nombre de passagers	3	3	10	40	2	0	1.5	0.5
km parcourus par an	25,000	45,000	90,000	90,000	60,000	3,000	1,5000	2,000
Heures de conduite par an.	500	1000	1200	2000	2000	1000	1000	300
Durée de service (années)	12	15	9	15	15	10	10	10
Poids brut du véhicule. (tonnes)	1.5	2.2	2	10	15	0.4	0.2	0.09

Tableau 8-6: Données de trafic

Valeurs de conception	
Type de véhicule	Trafic quotidien (veh/jour)
Voiture moyenne	30

Quatre roues motrices	48
Bus léger	36
Bus lourd	48
Camion moyen	60
Chariot pour animaux	12
Moto	30
Bicyclette	30
Total	294
Taux de croissance du trafic	3.5%

Tableau 8-7: Données d'investissement

Intervention sur la route	Coût économique (\$ km)
Mise à niveau d'une route en terre battue à deux voies	\$ 70,000
Mise à niveau d'une route bitumée à deux voies améliorée	\$ 250,000

Tableau 8-8: Entretien information

Type de surface	IRI	Activité de maintenance	Economic Cost
Base en terre / routes en terre battue en mauvais état	15	Entretien de routine (y compris le nivellement 2x par an et le ragréage au gravier)	\$ 3,000 par km /an
Route de terre battue en bon état	10	Entretien de routine, (y compris le nivellement 6 x par an) Re-gravillonnage tous les 5 ans	\$ 4,000 par km /an \$ 20,000 par km
Route revêtue	4	Entretien de routine (quelles tâches ?) Traitement de surface tous les 7 ans	\$ 2,500 par km/an \$ 20,000 par /km

Tableau 8-9: Coûts d'exploitation des véhicules et données de sortie sur la vitesse des véhicules RED

Terrain vallonné	Voiture moyenne	Quatre roues motrices	Bus léger	Bus lourd	Camion moyen	Chariot pour animaux	Motocycl ette	Bicyclet te
Coûts : \$ Veh-km								
Revêtue IRI 04	0.25	0.32	0.30	0.64	0.72	0.33	0.06	0.09
Terre battue, Rugosité : IRI 10	0.32	0.46	0.37	0.89	0.99	0.57	0.07	0.16
Terre, Rugosité : IRI 15	0.40	0.59	0.45	1.14	1.22	0.86	0.09	0.27
Vitesses : Km/h								
Revêtue IRI 04	91.15	89.78	81.92	78.59	71.25	3.31	86.85	18.02
Terre battue, Rugosité : IRI 10	60.77	59.91	57.98	54.91	53.66	1.90	60.38	9.90
Terre, Rugosité : IRI 15	41.45	40.84	40.49	36.88	39.57	1.26	41.42	5.85

Pour l'analyse économique, une route en terre/ terre battue dégradée (IRI 15) est transformée en une route en gravier passable (IRI 10) ou en une route en bitume (IRI 4). Les résultats de l'analyse économique sont présentés dans les tableaux 8-10 et 8-11, qui montrent que si la route en terre de bonne qualité donne un TRIE beaucoup plus élevé, la route bitumée donne la VAN la plus élevée. Pour des raisons économiques, la route revêtue devrait être choisie parce qu'elle donne les avantages globaux actualisés les plus élevés, mesurés par la VAN. Tant la route en terre que la route revêtue ont un TRIE (une mesure du moment optimal) supérieur au taux d'actualisation de 6 %, il n'y aurait donc aucun avantage à reporter l'une ou l'autre option.

Tableau 8-10: Analyse économique pour l'amélioration de 10 km de route en terre/terre battue en mauvais état (IRI 15) en route en terre battue en bon état (IRI 10)

Année	Investissement	Entretien avec Projet	Entretien sans projet	Bénéfices des COV	Bénéfices en temps		Bénéfices nets
1	700,000	0	0	0	0		-700,000
2		40,000	30,000	207,977	51,628		249,604
3		40,000	30,000	215,256	53,435		258,690
4		40,000	30,000	222,790	55,305		268,095
5		40,000	30,000	230,587	57,241		277,828
6		200,000	30,000	238,658	59,244		127,902
7		40,000	30,000	247,011	61,318		298,328
8		40,000	30,000	255,656	63,464		309,120
9		40,000	30,000	264,604	65,685		320,289
10		40,000	30,000	273,865	67,984		331,849
11		200,000	30,000	283,451	70,363		183,814
12		40,000	30,000	293,371	72,826		356,198
13		40,000	30,000	303,639	75,375		369,014
14		40,000	30,000	314,267	78,013		382,280
15		40,000	30,000	325,266	80,744		396,010
16		200,000	30,000	336,650	83,570		250,220
17		40,000	30,000	348,433	86,494		424,928
18		40,000	30,000	360,628	89,522		440,150
19		40,000	30,000	373,250	92,655		455,905
20		40,000	30,000	386,314	95,898		472,212
						TRIE	37.1%
				VAN at 6% disc rate			2,545,943
						TRPA	35.7%

Tableau 8-11: Analyse économique pour la transformation de 10 km de route en terre/ terre battue en mauvais état (IRI 15) en route revêtue (IRI 4)

Année	Investissement	Entretien avec projet	Entretien sans projet	Bénéfices COV	Bénéfices en temps		Bénéfices nets
1	2,500,000	0	0	0	0		-2,500,000
2	0	25,000	30,000	334,469	78,987		418,455
3	0	25,000	30,000	346,175	81,751		432,926
4	0	25,000	30,000	358,291	84,613		447,904
5	0	25,000	30,000	370,831	87,574		463,405
6	0	25,000	30,000	383,810	90,639		479,450
7	0	25,000	30,000	397,244	93,811		496,055
8	0	200,000	30,000	411,147	97,095		338,242
9	0	25,000	30,000	425,538	100,493		531,031
10	0	25,000	30,000	440,431	104,010		549,442
11	0	25,000	30,000	455,846	107,651		568,497
12	0	25,000	30,000	471,801	111,419		588,220
13	0	25,000	30,000	488,314	115,318		608,632
14	0	25,000	30,000	505,405	119,354		629,759
15	0	200,000	30,000	523,094	123,532		476,626
16	0	25,000	30,000	541,403	127,855		674,258
17	0	25,000	30,000	560,352	132,330		697,682
18	0	25,000	30,000	579,964	136,962		721,926
19	0	25,000	30,000	600,263	141,756		747,018
20	0	25,000	30,000	621,272	146,717		772,989
						TRIE	18.5%
				VAN at 6% disc rate			3,199,663
						TRPA	16.7%

8.11 Avantages sociaux, sécurité routière et coûts et avantages environnementaux

8.11.1 Prestations sociales

Un cadre économique coûts-avantages en matière de transport est le plus approprié lorsque les alternatives envisagées permettent l'accès des véhicules toute l'année. Dans la plupart des cas, lorsque l'accès aux véhicules est bon et que les revenus sont suffisants, les gens seront prêts à faire un voyage (à l'hôpital, au marché ou chez des amis), quel que soit le niveau des tarifs. Dans ce cas, l'approche conventionnelle des économies de coûts de transport représente une approximation raisonnable des bénéfices de l'investissement routier et il y a peu de pression pour inclure des bénéfices "sociaux" supplémentaires dans l'analyse. Cependant, des problèmes surviennent lorsque les niveaux de revenus sont faibles et lorsque les communautés sont inaccessibles ou que les routes sont coupées pendant une grande partie de l'année. Dans le cas extrême où une nouvelle route est introduite dans une communauté pauvre éloignée, où, par exemple, dans le cas "sans projet", les gens doivent marcher vingt kilomètres et transporter des parents malades à l'hôpital, mais dans le cas "avec projet", ils peuvent se déplacer en véhicule à moteur, l'objectif du voyage commence à importer. Il peut s'agir d'une question de "vie ou de mort" et l'évaluation conventionnelle des

économies réalisées par les usagers des transports est totalement irréaliste. De même, sans un accès adéquat aux véhicules, il est peu probable que les installations sociales telles que les écoles, les cliniques, les marchés et autres services gouvernementaux soient accessibles à la population locale.

Les approches économiques des transports sont inévitablement basées sur le volume du trafic et ne tiennent pas compte explicitement des inégalités de revenus. Lorsque l'on considère les avantages sociaux, dans la plupart des cas, c'est la taille de la population concernée, plutôt que le volume du trafic, qui est un facteur critique. Les approches de classement sont souvent la seule façon d'intégrer les avantages sociaux dans la planification des routes. Overseas Road Note 22 (TRL, 2004) aborde la question plus en détail.

Souvent, le moyen le plus rentable d'atteindre les objectifs sociaux et de garantir l'accès aux véhicules de base pour la population rurale est l'approche "d'amélioration ponctuelle". Les points problématiques identifiés comme un pont manquant ou cassé, une pente glissante, une route de faible élévation sujette aux inondations seront traités plutôt que la route entière. Cette approche est examinée au chapitre 6, Conception des routes non revêtues, et par Lebo et Schelling (2001).

8.11.2 Sécurité routière

En général, il existe deux approches pour intégrer la sécurité routière dans la conception et la planification des routes. Elle peut soit être directement incorporée dans l'analyse économique des options routières, soit être incluse dans la décision finale par le biais d'une forme d'AMC.

Par exemple, dans le programme HDM-4, le modèle des coûts pour l'utilisateur de la route, les coûts totaux des accidents mortels, des blessures ou des dommages seulement peuvent être calculés à partir de modèles développés dans le cadre de la méthodologie du programme international d'évaluation des routes (iRAP). L'utilisateur doit définir le taux de mortalité du parc de véhicules et le taux de blessures graves par 100 millions de véhicules-km. Il faut inclure des estimations de la valeur de la vie, ou des blessures graves, généralement basées sur un ratio du PIB par habitant. La valeur de la vie à utiliser dans la prise de décision économique est, bien sûr, controversée. Néanmoins, des techniques de préférence déclarée peuvent être utilisées pour évaluer la valeur de la vie statistique, c'est-à-dire pour estimer la valeur que le public dépenserait pour éviter la perte d'une vie.

8.11.3 Coûts et avantages environnementaux

Il existe un large éventail de questions environnementales et certaines peuvent être intégrées directement dans une analyse économique ; par exemple, les options de conception alternatives peuvent être classées par le biais d'une AMC. Il est parfois possible d'estimer directement les coûts de l'atténuation pour faire face aux conséquences négatives des investissements routiers. Par exemple, les coûts des obstacles sonores ou les coûts de déplacement. Ceux-ci peuvent être directement inclus dans les coûts de construction.

Le modèle HDM-4 et le modèle RED calculent tous deux les émissions de différents gaz des véhicules (par exemple, les hydrocarbures, le dioxyde de soufre, les particules, le plomb, etc.). Toutefois, ces émissions ont de vastes conséquences en termes de décès prématurés et de maladies respiratoires et autres, et contribuent également au réchauffement climatique. Les effets sur les maladies respiratoires se produisent principalement dans les zones urbaines et seront influencés par le terrain et les facteurs météorologiques tels que la vitesse du vent et les précipitations, et ne sont donc pas facilement intégrés directement dans les modèles de transport. Néanmoins, les deux modèles peuvent aider à fournir des indications relatives sur les différentes solutions dans le cadre d'une AMC.

L'analyse économique doit également inclure les coûts et les avantages des mesures d'atténuation environnementale telles que le contrôle de la poussière, l'ajout de structures de passage de la faune, de clôtures ou de ponts de passage des poissons relativement grands, de barrières antibruit, de mesures d'aménagement paysager et de contrôle de l'érosion, de revêtements durs tels que des pavés dans un village, etc. Les coûts de ces mesures peuvent généralement être directement mesurés et intégrés dans l'analyse. Les avantages de ces mesures sont souvent qualitatifs et plus difficiles à déterminer. Cependant, tous les efforts doivent être faits pour quantifier ces bénéfices et intégrer une certaine valeur dans l'analyse économique.

Bibliography

- Austrroads. (2009). **Guide to Pavement Technology. Part 6, Unsealed Pavements.** Sydney, Australia.
- Cundill, M., Hine, J. and Greening, P. A. K. (1997). **The Costs of Maintaining and Repairing Vehicles in Developing Countries, TRL Report 256.** Transport Research Laboratory, Crowthorne, Berkshire, UK.
- Department of Transport of South Africa. (1996). **Structural Design of Flexible Pavements for Interurban Roads and Rural Roads. Draft TRH4:1996.** Department of Transport, Republic of South Africa, Pretoria.
- Gourley, C., Toole, T., Morosiuk, G. and Hine, J. (2001). **Cost Effective Designs for Low Volume Sealed Roads in Tropical and Sub Tropical Countries.** TRL Annual Research Review, Crowthorne, Berkshire, UK.
- Hine, J., Pangihutan, H. and Rudjito, D. (2000). **Transport Costs for Highway Planning in Indonesia: Results from New Research into Speed and Fuel Consumption in Congestion, Values of Passenger Time and Vehicle Maintenance Costs.** REAAA Conference, September 2000. Tokyo.
- Howe, J. (1972). **A review of rural traffic counting methods in developing countries.** RRL Report LR 472. Road Research Laboratory, Crowthorne, Berkshire, UK.
- Highways Agency. (2006). **Design Manual for Roads and Bridges, Pavement Design.** Volume 7, Section 2. Part 3. HD 26/06.
- Lebo, J. and Schelling, D. (2001). **Design and Appraisal of Rural Infrastructure.** World Bank Technical Paper No. 496, World Bank, Washington DC.
- Transport Research Laboratory. (2004). **Overseas Road Note 22: A Guide to Pro-Poor Transport Appraisal: The Inclusion of Social Benefits in Road Investment Appraisal.** Transport Research Laboratory, Crowthorne, Berkshire, UK..
- Transport Research Laboratory. (1993). **Overseas Road Note 31. A Guide to the Structural Design of Bitumen surfaced Roads in Tropical and Sub-Tropical Countries.** Overseas Centre, Transport Research Laboratory, Crowthorne, Berkshire, UK.
- US Department of Transportation. (1998). **Life-Cycle Cost Analysis in Pavement Design –In Search of Better Investment Decisions.** Federal Highway Administration Pavement Division Interim Technical Bulletin Set 1998. Publication FHWA-SA-98-079
- Whittington, D. and Cook, J. (2018). **Guidelines for Benefit Cost Analysis Project Working Paper No.1. Prepared for the Benefit-Cost Analysis Reference Case Guidance Project.** Funded by the Bill and Melinda Gates Foundation. University of North Carolina at Chapel Hill, University of Manchester and Washington State University.
- World Bank. (2000). **Highway Development and Management Model (HDM-4).** Jointly published by World Bank, Washington, D.C, and the World Roads Association (PIARC), Paris
- World Bank. (2006). **Road Cost Knowledge System (ROCKS) Version 2.3.** Transport and Urban Development. World Bank, Washington DC
- World Bank. (2006). **Roads Economic Decision Model (RED).** Sub-Saharan African Transport Policy Program. World Bank, Washington DC.
- World Bank. (2016). **Discounting Costs and Benefits in Economic Analysis of World Bank projects.** OPSPQ Guidance Note. May 9, 2016. Washington DC.

9 FACTEURS ET CONSIDÉRATIONS ACCESSOIRES

9.1 Introduction

9.1.1 Contexte

Les concepts et la technologie de fourniture rentable de LVR ont connu des avancées significatives au cours des 20 à 30 dernières années pour aboutir à ce qui constitue aujourd'hui des solutions techniques appropriées pour la conception des chaussées et la conception géométrique, telles que présentées dans ce RRN. Néanmoins, plusieurs aspects de la fourniture de LVR, qui sont étroitement liés à la réussite de la mise en œuvre de projets LVR, ne sont pas couverts en détail dans le présent document. Toutefois, pour la plupart de ces aspects de la mise en œuvre du projet, de la planification et de la passation des marchés à la construction et à la maintenance, il existe des documents de référence, des notes de route et des manuels pertinents qui devraient être utilisés - tant par les clients que par les concepteurs et les entrepreneurs - selon les besoins.

9.1.2 Objectif

L'objectif de ce chapitre est de mettre en évidence certains des aspects les plus importants à prendre en compte lors de la conception et de la construction de routes à faible trafic. En outre, le chapitre présente certains des résultats des recherches les plus récentes pour les gardiens des manuels de conception et des spécifications à prendre en compte lors de la prochaine révision de leurs documents. Il souligne en outre comment les données de recherche des sections d'essai actuellement en cours de suivi dans certains pays peuvent être utilisées pour améliorer les méthodes de conception des chaussées présentées dans ce guide.

9.1.3 Champ d'application

La portée du chapitre est limitée à une discussion des aspects clés et l'utilisateur de la ligne directrice devrait chercher des conseils supplémentaires dans les documents inclus dans la liste bibliographique.

9.2 Quelques considérations d'ingénierie géotechnique pour les LVR

Cette section donne des conseils sur les aspects de l'amélioration des sols et des pentes, des remblais et des déblais pour les LVR.

Pour toutes les méthodes de revêtement décrites dans les sections précédentes du présent document, les aspects de l'amélioration du sol ainsi que les considérations relatives aux pentes et aux remblais seraient essentiellement les mêmes, le cas échéant.

Les considérations d'ingénierie géotechnique sont particulièrement importantes dans la conception des chaussées pour les LVR pour un certain nombre de raisons, notamment mais pas exclusivement :

- L'amélioration du sol offre un certain nombre d'options pour modifier le sol le long du tracé de la route. Cela offre un potentiel de réduction des coûts en éliminant les frais de transport et autres coûts associés à l'importation de matériaux de construction de meilleure qualité.
- Entreprendre une amélioration du sol appropriée pourrait potentiellement réduire l'épaisseur des couches de la chaussée. En améliorant la résistance des couches de fondation, il serait possible de réduire considérablement l'épaisseur et la classe de matériau de la ou des couches de revêtement recouvrant la fondation.
- Une conception appropriée des pentes, des déblais et des remblais permet d'atténuer la défaillance de la chaussée associée au plan de rupture d'un glissement de terrain qui se fraye un chemin dans la chaussée, ce qui pourrait compromettre l'intégrité de la structure de la chaussée et, par la suite, provoquer la rupture de la chaussée ou la suppression de la totalité de la route. En outre, des mesures suffisantes de protection des pentes protègent la route contre les dommages causés par les glissements de terrain, qui peuvent être dus à des débris endommageant physiquement la route, à des dépôts de débris dans les drains latéraux entraînant une défaillance due au drainage et à des

dépôts de débris sur la route qui pourraient la rendre impraticable, en plus des pertes humaines et matérielles.

- Intégrer un drainage de surface et souterrain adéquat dans la conception d'une route afin de prévenir les ruptures de pente, d'empêcher l'érosion et l'affouillement des structures, et de minimiser les dommages ou la perte de matériaux de revêtement. En outre, il est nécessaire d'avoir des structures de traversée de drainage correctement dimensionnées et protégées pour prévenir les affouillements et les défaillances des structures qui ferment souvent une route.

Toutefois, il convient de noter que, d'un point de vue économique, les RVL offrent des avantages relativement faibles pour l'utilisateur par rapport aux routes à fort trafic. Par conséquent, il est recommandé de procéder à une analyse du cycle de vie pour établir la faisabilité de l'utilisation d'interventions géotechniques étendues et coûteuses afin de déterminer si leurs avantages justifient leur coût. Les interventions appropriées dépendent également du besoin et de l'importance de la route, qu'il s'agisse d'une route de haut niveau ou d'une route à faible trafic, et de facteurs tels que l'existence d'autres itinéraires raisonnables.

9.2.1 Amélioration du terrain

Étant donné que la conception des LVR optimise autant que possible l'utilisation des matériaux du sol disponibles localement, une amélioration du sol peut être nécessaire dans certains cas pour renforcer les propriétés physiques qui affectent la performance de la chaussée. Dans certains cas, l'amélioration du sol peut être entreprise pour réduire l'épaisseur des couches de la chaussée et améliorer la résistance du sol afin de le rendre plus adapté aux structures de support.

En outre, l'amélioration du sol peut être entreprise pour atteindre l'un des objectifs suivants

- 1) Améliorer le drainage ;
- 2) améliorer la perméabilité ;
- 3) améliorer le compactage et la résistance du sol ;
- 4) Accélérer la consolidation et le gain de résistance au cisaillement ;
- 5) Fournir un soutien latéral ;
- 6) Améliorer la maniabilité du sol.

9.2.1.1 Identification des sols nécessitant une amélioration

Plusieurs spécifications de conception spécifiques à chaque pays recommandent des exigences différentes en matière de matériaux pour les remblais et les couches de chaussée en fonction du trafic et des conditions locales du sol. Ces spécifications donnent des indications à l'ingénieur sur les propriétés minimales admissibles des matériaux requises, telles qu'elles sont obtenues à partir des essais standard de nivellement, des limites d'Atterberg, de la résistance et du gonflement, entre autres (voir le manuel d'étude du site, le manuel d'essais en laboratoire et les spécifications pour les travaux de routes et de ponts, ou leur équivalent). Lorsque les propriétés des matériaux sont inférieures aux exigences des spécifications, le concepteur peut modifier le sol existant au lieu d'importer un nouveau matériau qui répond aux exigences.

Parmi les situations courantes où l'amélioration du sol peut être considérée comme une alternative pratique et rentable pour les LVR, on peut citer

- 1) Les argiles expansives qui subissent un retrait et un gonflement dans des conditions d'humidité variables ;
- 2) les sols à forte teneur en matières organiques ;
- 3) les sols à faible résistance (CBR < 3 %), y compris les conditions marécageuses ;
- 4) les sols qui s'effondrent. Il s'agit principalement de limons et/ou de sables meubles avec des traces d'argile qui subissent une diminution soudaine et irréversible de leur volume lorsqu'ils sont chargés après avoir été mouillés ;

5) Les sols de sol support salin contenant des sels solubles et d'autres matériaux contenant des sels solubles dont la forme aqueuse s'évapore, ce qui fait que les sels se cristallisent dans la couche de revêtement bitumineux. Cela entraîne ensuite des dommages à la chaussée ;

6) Sols micacés avec de grandes quantités de mica grossier (muscovite) ;

7) Sols dispersifs et érodables.

9.2.1.2 Techniques d'amélioration du sol

Cette section décrit les techniques d'amélioration des sols qui sont couramment utilisées pour traiter les sols "problématiques" le long de l'alignement des RVL. Pour les différents sols "problématiques" rencontrés, la mesure appropriée à mettre en œuvre dépend de l'étendue des sols problématiques, de la charge de trafic prévue, des aspects économiques, de l'équipement disponible, de l'expérience dans la mise en œuvre de la mesure et de l'environnement routier, entre autres. Dans certains cas, les conditions du sol peuvent nécessiter le remplacement localisé ou général du matériau existant (couche de fondation) avant l'amélioration du sol.

Le Tableau 9-1 résume les techniques communes d'amélioration du sol qui sont applicables à différentes conditions.

Tableau 9-1: Résumé des techniques d'amélioration des sols

Conditions	Technique	Candidature
Argiles expansives ²	Excavation d'argiles expansives et remblayage avec un matériau inerte ^{1,2,3}	Réduction de la colonisation
	Pré-humidification du sol pendant 2 à 3 mois	Induire une teneur en humidité d'équilibre avant la construction
	Supplément (augmentation de la hauteur du remplissage)	Supprimer le soulèvement
	Barrières latérales et verticales contre l'humidité	Minimiser les variations d'humidité dans la chaussée
	Stabilisation de la chaux	Amélioration de la capacité portante et d'autres propriétés du sol telles que la plasticité
	Géosynthétiques	Améliorer la résistance en réduisant le retrait et les contraintes de dilatation
Organics	Excavation et remblayage avec un matériau approprié ^{1,3}	Minimiser le tassement (pour une présence peu profonde de matière organique)
	Surtaxe ⁵	Réduction de la colonisation
	Géotextiles	Renforcement de la résistance
	Colonnes de sable	Réduction de la colonisation
Sols à faible résistance	Enlèvement et remplacement par un matériaux approprié ^{1,3}	Minimiser la colonisation
	Stabilisation de la chaux	Amélioration de la capacité portante et d'autres propriétés du sol
	Mélange avec du gravier	Améliorer la capacité portante et les autres propriétés du sol
	Géosynthétiques	Renforcer la résistance et améliorer le drainage
	Les sacs de renforcement "Do-nou" (technique développée au Japon pour protéger les sols à faible capacité de charge en les encapsulant dans des sacs).	Réduire la colonisation ; améliorer la circulation pendant la saison des pluies
	Techniques d'injection de coulis	Renforcer la capacité de charge
	Colonnes de sable	Réduire le tassement ; améliorer le drainage

	Les drains à mèche	Dissipation de l'excès de pression d'eau interstitielle qui peut se développer sous la charge appliquée au sol
Sols déformables	Mélange avec du gravier	Améliorer les propriétés du matériau de la couche de roulement
	Mélange de chaux	Stabilisation de la base et de la fondation limoneuse
	Mélange de ciment	Stabilisation de la base et de la fondation sableuses
	Compactage à fort impact énergétique	Densifier les sols
	Colonnes de pierre	Augmenter la capacité de soutien
Sols de sol support salins ⁴	Ajout de chaux	Augmenter le pH pour supprimer la solubilité des sels les plus solubles
	Utilisation d'un revêtement imperméable	Minimiser l'accumulation de sels dans les couches de la chaussée
Sols micacés	Enlever la couche de sol micacé	Éviter les problèmes de compactage liés aux matériaux moscovites
	Stabilisation à la chaux ou au ciment	Minimiser l'orniérage ultérieur
Sols dispersifs et érodables ⁶	Enlever et remplacer par des matériaux non érodables ¹	Éviter l'érosion
	Assurer un drainage adéquat	Gérer et réorienter les flux d'eau
	Compactage à 2 - 3 % au-dessus de la teneur en eau optimale pour obtenir la densité la plus élevée possible	Densifier les sols
	Traitement des sols à la chaux/gypse	Réduire l'érosion par échange cationique
<p>Note:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) La profondeur d'excavation des matériaux de remplacement varie généralement en fonction de l'étendue du sol inadapté et de la charge de trafic prévue sur la chaussée. 2) Pour la charge du trafic $\geq 0,3$ MESA sur un sol très expansif, excaver un sol expansif jusqu'à 600 mm et placer une couche de 100 à 200 mm d'épaisseur de sable, de gravier ou de remblai rocheux avant les couches de la chaussée. L'excavation ne dépasse normalement pas 200 mm pour une charge de trafic $< 0,3$ MESA. 3) Le matériau de remblai au-dessus du niveau du sol doit être construit avec des pentes latérales de 1:2 4) Des détails peuvent être trouvés dans les directives pour la prévention et la réparation des dommages causés par le sel aux routes et aux pistes d'atterrissage qui ont été développées par le département des routes du Botswana en 2003 (basées sur des recherches en Afrique australe) 5) Les hauteurs de la surtaxe varient en fonction de la charge de trafic prévue sur la chaussée. 6) Se référer à Elges (1985) 		

9.2.1.3 Données d'entrée pour l'analyse de l'amélioration des sols

En général, les études géotechniques menées pour la conception des couches de revêtement, des fondations des structures, des murs de soutènement, des coupes, des remblais, etc. qui seront soutenus par le sol amélioré sont adéquates pour la conception de la plupart des techniques d'amélioration des sols proposées. Toutefois, des informations spécifiques sur le sol peuvent être mises en avant en fonction de la technique d'amélioration du sol choisie. Par exemple, lors du choix du type de stabilisateur chimique à utiliser, la distribution granulométrique du sol non modifié ainsi que ses limites d'Atterberg sont normalement utilisées comme facteurs déterminants. Il peut également être nécessaire d'évaluer les exigences spécifiques du site.

9.2.2 *Pentes, remblais et déblais*

Cette section couvre les approches géotechniques, l'analyse de la stabilité et les considérations de conception pour les pentes, les déblais, les remblais ainsi que la protection des pentes. Elles ne diffèrent pas sensiblement de celles des routes à forte circulation, sauf que pour les LVR, le budget disponible est souvent insuffisant pour des interventions géotechniques coûteuses. Néanmoins, dans les zones montagneuses à forte pluviométrie et les zones à sols problématiques, une conception géotechnique détaillée des pentes, des remblais et des déblais est souvent nécessaire...

L'effondrement des pentes et des remblais peut prendre plusieurs formes, notamment mais pas exclusivement :

- Défaillance profonde dans le sol d'origine.
- Rupture le long de la surface de la pente/du remblai due à l'érosion. Cela peut conduire à la formation de ravines et à l'effondrement de la pente.
- Rupture à l'intérieur de la pente/du remblai, par exemple à la suite d'un surcroît de pente ou d'un manque de compactage
- Défaillance au pied de la pente/du talus due à la surcharge d'une pente ou au drainage insuffisant d'une zone d'infiltration.

Les défaillances ci-dessus peuvent se produire isolément ou en combinaison.

La performance des pentes, des remblais et des déblais repose sur une compréhension adéquate du sous-sol et sur l'interprétation des caractéristiques du sol et de la roche. Le tableau 9-2 fournit un résumé des propriétés techniques et des essais sur le terrain et en laboratoire qui sont essentiels pour la conception et l'analyse de la stabilité des pentes et des remblais.

Tableau 9-2: Études sur le terrain et en laboratoire pour la conception et l'analyse des pentes et des remblais

L'état des pentes et des remblais fait l'objet d'une enquête	Informations requises pour les analyses	Essais sur terrain	Tests de laboratoire
Ampleur et cote du règlement	<ul style="list-style-type: none"> • Paramètres de consolidation des cotes • Paramètres de compressibilité • Rétrécissement / gonflement et dégradation des sols 	<ul style="list-style-type: none"> • Essai au pénétromètre à cône (CPT) • Plaques de décantation • Essai de pénétration standard (SPT)) 	<ul style="list-style-type: none"> • Essai de consolidation • Contenu organique • Rétrécir/enfler
Évaluation des points forts	<ul style="list-style-type: none"> • Densité relative • La résistance in situ 	<ul style="list-style-type: none"> • CPT (pour les matériaux faibles tels que les argiles) • Essai de pénétration standard (SPT) - pour le sable et la vase • Essai de charge sur plaque 	<ul style="list-style-type: none"> • Rapport humidité-densité • Mesure de la résistance
Stabilité des pentes	<ul style="list-style-type: none"> • Paramètres de résistance au cisaillement • Poids unitaires • Pression de l'eau interstitielle 	<ul style="list-style-type: none"> • Inclinomètres de pente • Cisaille à ailettes (pour les argiles molles à fermes) • Piezocones 	<ul style="list-style-type: none"> • Essai triaxial • Poids unitaire • Essai de cisaillement direct
Pression latérale	<ul style="list-style-type: none"> • Coefficients de pression horizontale de la terre 	<ul style="list-style-type: none"> • Pressionmètre 	<p>Angle de frottement interne du sol d'après un essai de cisaillement triaxial ou direct</p> <p>Angle de frottement interne des remblais rocheux</p>
Évaluation des sources de matériaux de remblai (qualité et quantité)	<ul style="list-style-type: none"> • Classification générale des sols et des roches pour l'évaluation des matériaux • Résistance 	<ul style="list-style-type: none"> • CPT • SPT 	<ul style="list-style-type: none"> • granulométrie • Les limites d'Atterberg • Contenu organique • Densité relative • Rapport humidité-densité • CBR
Potentiel d'affaissement (karst, mines, etc.)	<ul style="list-style-type: none"> • Cartographie géologique incluant l'orientation et les caractéristiques des discontinuités de la roche 	<ul style="list-style-type: none"> • Essais géophysiques • Carottage de roche (RQD) 	<ul style="list-style-type: none"> • Durabilité Slake
Liquéfaction	<ul style="list-style-type: none"> • Potentiel de liquéfaction des sables saturés 	<ul style="list-style-type: none"> • SPT • CPT (où des piézocones sont utilisés) • Mesure du niveau des eaux souterraines 	<ul style="list-style-type: none"> • Granulométrie • Les limites d'Atterberg • Essai triaxial

La stabilité des pentes est généralement analysée en termes de facteur de sécurité (FS), qui est défini comme le rapport entre la force de résistance et la force motrice. Certaines valeurs minimales du FS sont recommandées lorsqu'un concepteur géotechnique dispose de suffisamment d'informations pour définir correctement le profil du sol, la géométrie de la pente, la résistance au cisaillement du sol et la pression d'eau interstitielle dans un modèle de stabilité des pentes. Une FS plus importante doit être utilisée s'il existe une incertitude importante dans les paramètres d'entrée de l'analyse. Pour l'analyse générale de la stabilité des pentes des coupes permanentes, des remblais et des réparations de glissements de terrain, un FS minimum de 1,25 est recommandé.

Pour les pentes adjacentes à des structures non directement porteuses, une FS minimale de 1,3 est recommandée. Une FS minimale de 1,5 est recommandée pour les pentes qui soutiennent des structures telles que des ponts et des murs de soutènement. Cette FS accrue s'applique également aux pentes qui ne supportent pas directement une structure, mais dont la défaillance pourrait endommager la structure. Les exceptions à cette règle comprennent les murs mineurs qui ont un impact minimal sur la stabilité de la pente existante, auquel cas une FS de 1,3 peut être appliquée.

Lorsqu'une analyse sismique est effectuée, un FS minimal de 1,1 est recommandé pour les pentes impliquant ou adjacentes à des murs et des fondations de structures. Pour les autres pentes (coupes, remblais et réparations de glissements de terrain), une FS minimale de 1,05 est recommandée.

Des informations détaillées sur l'analyse et la conception de la stabilité des pentes se trouvent dans un certain nombre de documents d'ingénierie géotechnique (Samtani & Nowatzki, 2006 ; WSDOT, 2013 ; NYSDOT, 2014 ; TRB (Turner et Schuster, 1996, 2012).

9.3 Considérations relatives à la conception des remblais et des déblais

9.3.1 Généralités

En général, les remblais de moins de 5 m de haut avec des pentes ne dépassant pas 1,5 horizontal (H):1 vertical (V) dans les zones de sol stable ne nécessitent pas d'investigations et d'analyses géotechniques aussi détaillées que les remblais de plus de 5 m de haut construits sur un sol mou. Cependant, dans tous les cas, la conception, la base de calcul et les recommandations doivent être méticuleusement effectuées. Le tableau 9-3 fournit un guide des angles de talus recommandés et de l'étendue H:V pour différentes conditions. Ces pentes sont basées sur les propriétés géotechniques des matériaux, les observations et l'expérience, mais des pentes latérales plus plates sont souvent préférées à des fins de sécurité routière sur des remblais bas.

Tableau 9-3: Angles de talus recommandés pour les conditions de sol et de roche*9-

Résistance et type de matériaux		Hauteur de pente de coupé (m)			Hauteur de la pente de remplissage (m)	
		< 5	5 - 10	10 - 15	< 5	5 - 10
Sol	Sol résiduel ferrugineux à grain plus grossier	1H:1V (45°)	1.5H:1V (34°)	NA	1.5H:1V (34°)	2H:1V (27°)
	Sol résiduel ferrugineux à grain fin	1.5H:1V (34°)	2H:1V (27°)	NA		
	Dense – moyen dense (comme les sables)	1H:1V (45°)	1.25H:1V (39°)			
	Moyennement dense – lâche (comme les limons et les limons sablonneux)	1.25H:1V (39°)	1.5H:1V (34°)		2H:1V (27°)	3H:1V (°18)
	Lâche (comme les limons)	1.5H:1V (34°)	1.75H:1V (30°)	2H:1V (27°)	3H:1V (°18)	NA
	Doux à raide (comme les argiles limoneuses ou les limons argileux)	1.5H:1V (34°)	2H:1V (27°)			
	Argiles expansives	2H:1V (27°)	NA	NA	NA	NA
Roche	Fort (comme le basalte légal altéré, le grès bien cimenté ou le calcaire)	0.2H:1V (79°)	0.25H:1V (76°)	0.3H:1V (73°)	1.5H:1V (34°)	
	Faible (basalte altéré, grès mal cimenté et cendres volcaniques, calcaire et Marl, roches pyroclastiques)	0.5H:1V (63°)	0.7H:1V (55°)	0.8H:1V (51°)		
	Très faible (tuf légèrement altérée, pierre de boue légèrement altérée ou marle)	1H:1V (45°)	1.25H:1V (39°)	1.5H:1V (34°)		
	Extrême faible (tuf très altéré, marle/mudstone/shale)	1H:1V (45°)	1.5H:1V (34°)	1.75H:1V (30°)		
<p>Note:</p> <p>Les angles de talus peuvent varier en fonction de la hauteur du remblai et de la profondeur de coupé.</p> <p>Les angles de pente stables sont très particuliers aux conditions locales de type de sol, de précipitations et d'historique du site. L'expérience et le jugement local d'être appliqués.</p> <p>Des angles de pente de coupé composés peut être souhaitables, où les pentes abruptes sont faites dans la roche et le sol sous-jacents, avec des pentes plus plaques utilisées dans un sol plus doux ou plus altéré</p>						

*Modifié de Keller & Sherar (2003) et Ethiopian Road Authority (2017)

Les considérations de conception suivantes doivent être prises en compte pour les pentes, les déblais et les remblais :

- 1) La rupture d'une pente se produit lorsque les forces agissant pour provoquer la rupture dépassent les forces résistant à la rupture. L'analyse nécessite donc l'application d'un facteur de sécurité (FS) pour empêcher les forces agissantes de provoquer la rupture.
- 2) L'état d'humidité du sol (sec, partiellement saturé ou saturé) affecte la stabilité des pentes et des remblais. Plus l'humidité du sol est élevée, plus l'ampleur des forces agissant pour provoquer la rupture est importante. Par conséquent, les paramètres du sol utilisés dans la conception doivent être conformes aux régimes de précipitations (humidité du sol) et au drainage.
- 3) En cas d'infiltration ou de nappe phréatique élevée, des mesures de drainage doivent être intégrées dans la pente, notamment des drains souterrains, des drains de surface, des galeries de collecte, des drains horizontaux, etc.

4) Il faut veiller à ce que les sols problématiques (sols expansifs, dispersifs, effondrés, etc.) ne soient pas utilisés comme matériau de remblai. Lorsque cela est inévitable, des mesures appropriées d'amélioration des sols (comme discuté dans la section 9-2-) doivent être mises en œuvre. La protection des pentes doit également être réalisée si nécessaire.

9.3.2 Protection des talus









Les mesures de protection des talus couramment appliquées pour différents scénarios de défaillance sont résumées dans le Tableau 9-4.

Tableau 9-4: Mesures de protection des talus

Condition de défaillance	Mesures de protection et de stabilité des talus	Intervention de drainage
Erosion ¹ et débit massique le long de la talus	<ul style="list-style-type: none"> Bioingénierie^{2,3} pour les surfaces de glissement dans la profondeur d'influence de l'herbe et des racines des plantes (max. 1-2 mètres) Petits barrages de retenue pour les longs ravins d'érosion et les talus raides Mur de protection pour le drain latéral Maçonnerie ou empierrement pour protéger la talus contre les intempéries Pour les talus rocheuses, protection par pulvérisation de béton dans les zones fortement fracturées 	<ul style="list-style-type: none"> Drain de coupure au-dessus de la talus ; il doit être bien entretenu pour éviter tout blocage Des trous d'évacuation peuvent être nécessaires lorsque des mesures de protection imperméables des talus sont utilisées pour empêcher le développement d'une pression d'eau élevée dans la talus en évacuant les eaux souterraines
Les défaillance dans le talus	<ul style="list-style-type: none"> Réduire la talus au niveau approprié Renforcement des talus internes (comme les ancrages, la bio-ingénierie, le clouage du sol, les colonnes de pierre, les boulons de roche, etc. Pour les talus de remblai, envisager d'enlever et de remplacer les remblais compacts, les talus de sol renforcé Mur de protection pour les défaillances qui ne risquent pas de se reproduire Les structures de retenue (telles que les murs en gabions, les murs de crèches, les murs MSE, etc.) ; les structures de retenue devraient être la dernière option pour les LVR. 	<ul style="list-style-type: none"> Drainage du sous-sol en cas d'infiltration d'eau Drainage de surface en chevrons si nécessaire Des drains horizontaux profonds pour abaisser la nappe phréatique
Défaillance du sol sous la route et/ou la pente	<ul style="list-style-type: none"> Bioingénierie^{2,3} et stabilisation biotechnologique des talus Conserver les structures Envisager le réalignement de la route à partir d'un sol instable 	<ul style="list-style-type: none"> Assurer le drainage de la surface et du sous-sol des routes
Suppression du soutien des talus en raison de l'érosion au pied	<ul style="list-style-type: none"> Murs (murs en gabions, murs en pierres sèches, murs en maçonnerie mortaisée) Rip-rap (enrochements) 	<ul style="list-style-type: none"> Aucune
Notes:		

- 1) D'autres mesures de lutte contre l'érosion peuvent être prises en fonction de l'angle de la pente (θ), comme suit:
- $\theta \leq 15^\circ$: Aucune exigence particulière
 - $15^\circ < \theta \leq 35^\circ$: Tapis anti-érosion biodégradable
 - $35^\circ < \theta \leq 45^\circ$: Tapis anti-érosion biodégradable à des angles plus faibles ou tapis anti-érosion non biodégradable
 - $5^\circ < \theta \leq 55^\circ$: Tapis anti-érosion non biodégradable avec grillage métallique si nécessaire
 - $\theta > 55^\circ$: Tapis anti-érosion non biodégradable avec treillis métallique, jusqu'à environ 60° si les conditions du sol sont favorables et si le captage en amont est faible ; par la suite, utiliser une couverture de surface dure
- 2) La bio-ingénierie peut être mise en œuvre par:
- Le gazon : Application de gazon avec des racines développées sur la surface de la pente. Lorsque l'herbe pousse, ses racines s'étendent dans le sol, renforçant ainsi la surface de la pente. Utilisez des espèces d'herbe aux racines relativement profondes sur les talus raides.
 - Ensemencement (manuel ou hydraulique) : l'ensemencement hydraulique consiste à pulvériser un mélange aqueux de graines de gazon et d'engrais sur la surface de la pente ; pour l'ensemencement manuel, les graines de gazon sont réparties manuellement de manière uniforme sur la surface de la pente. Les graines de gazon poussent et leurs racines agissent comme un renforcement organique du sol sur la pente
 - Boutures : placement de boutures de broussailles qui repousseront en couches de broussailles ou sous forme de piquets vivants
 - Haies de contour : plantation d'herbes telles que le vétiver, ou de broussailles, sur les talus en lignes de contour pour renforcer la pente et attraper l'érosion et les chutes de pierres.
 - Plantation d'arbres : L'effet de renforcement est assuré par les racines profondes des arbres.
 - Solutions biotechnologiques : Incorporation de la végétation dans des structures physiques, telles que des "gabions vivants".
- 3) La sélection des espèces de plantes et d'herbes est influencée par le type de racines (profondes ou étalées) nécessaires à la fonction ; les conditions du site telles que l'humidité, la perméabilité, la température, surface pierreuse, les éléments nutritifs du sol, etc.
- Les détails de la sélection des techniques de protection des talus se trouvent dans le Tableau 12-3 de la note 16 de Overseas Road (Transport Research Laboratory, 1997). Parmi les autres ressources utiles sur la bio-ingénierie et la stabilisation biotechnologique des talus, on peut citer Keller & Sherar (2003), Howell (2008), Hunt et al. (2008), Scott Wilson (2009), Salter et al. (2020), Gray et Leiser (1982), et Gray et Sotir (1996).
- Les espèces végétales qui sont normalement utilisées pour la protection des talus comprennent les herbes et les fougères, les plantes grimpantes, les arbustes, les petits arbres (≤ 3 m de haut), les arbres moyens (plus de 3 m de haut mais avec une petite couronne), les grands arbres (plus de 10 m de haut avec une grande couronne). Des photos de plantes typiques dans ces catégories ainsi que des directives pour la sélection des espèces végétales sont détaillées dans les directives techniques sur le traitement des paysages pour les talus (Bureau d'ingénierie géotechnique, 2011).
- Les espèces végétales utilisées en bio-ingénierie devraient idéalement être des espèces locales, indigènes à la région où elles sont utilisées. Les espèces pionnières sont souvent les meilleures pour la plantation initiale. Il est souvent souhaitable de travailler avec les pépinières locales, le personnel agronomique ou les agriculteurs locaux pour déterminer les meilleures espèces locales à utiliser. Certaines des plantes communes et leurs noms scientifiques sont indiqués dans le Tableau 9-5.

Tableau 9-5: Exemples d'espèces végétales communes pour la protection des talus par la bio-ingénierie

grimpantes	 <p><i>Bougainvillea spectabilis</i></p>	 <p><i>Smilax glabra</i></p>
Herbes	 <p><i>Axonopus compressus</i></p>	 <p><i>Paspalum notatum</i></p>
Arbustes	 <p><i>Ardisia crenata</i></p>	 <p><i>Rhapis excelsa</i></p>
Arbres	 <p><i>Cyclobalanopsis neglecta</i></p>	 <p><i>Machilus breviflora</i></p>

Il est important de noter qu'une conception géotechnique appropriée doit être entreprise pour les mesures de protection des talus énumérées ci-dessus. En outre, les considérations suivantes concernant les problèmes de stabilité des talus et les solutions pour les RVL doivent être prises en compte :

- Un drainage adéquat en bordure de route et sous la surface doit être assuré.
- La cause et l'étendue de l'instabilité et de l'érosion des talus doivent toujours être déterminées.
- L'effet de l'utilisation des terres sur la stabilité des talus doit toujours être déterminé et des mesures appropriées doivent être prises.

- Les talus latérales ainsi que les dispositifs de drainage des routes et des talus doivent être inspectés régulièrement afin d'identifier les problèmes potentiels.
- Il convient de s'assurer que la capacité portante de la roche ou du sol de fondation est suffisante pour les structures de retenue.

L'entretien ainsi que les mesures appropriées de protection et de renforcement des talus devraient être appliqués pour éviter d'endommager l'infrastructure routière. Cela permet de réduire au minimum l'accumulation de débris et les chutes de pierres dans les accotements et la chaussée.

9.4 Gestion de la fosse d'emprunt

9.4.1 Introduction

L'identification et le développement de bonnes sources de matériaux de construction de la chaussée à intervalles réguliers sur la longueur d'un LVR sont essentiels pour obtenir une construction rentable et des opérations d'entretien continu.

Jusqu'à 70 % du coût de construction d'un LVR type peut être lié à la production et à la fourniture de matériaux de revêtement. De plus, les coûts de remplacement des agrégats atteignent souvent 60 % des coûts d'entretien d'une route non revêtue. Il est donc possible de réaliser des coûts-avantages importants en mettant en œuvre des procédures améliorées de gestion des bancs d'emprunt et des stratégies d'approvisionnement en matériaux. Les sources de matériaux doivent avoir 1) une quantité adéquate de matériaux et 2) des matériaux de qualité satisfaisante, ou des matériaux qui peuvent être modifiés pour répondre aux spécifications LVR.

La gestion des sources de matériaux est essentielle pour garantir l'utilisation de matériaux disponibles de la meilleure qualité dans les couches supérieures de la structure de la chaussée. Les efforts déployés pour localiser ces matériaux, souvent rares, pour la chaussée ne servent pas à grand-chose si ces matériaux sont utilisés avec gaspillage dans les couches de terrassement. Trop souvent (et en particulier pour les bancs d'emprunt situés pour les LVR), l'excavation des bancs d'emprunt est effectuée en présence du seul opérateur de l'installation et sans supervision correcte. Dans de nombreux cas, il en résulte que du gravier de bonne qualité est contaminé et doit être gâché. Une bonne gestion des matériaux, comme le montre la Figure 9-1 (y compris une supervision compétente pendant toutes les opérations dans le banc d'emprunt), est donc une opération essentielle dans la construction de RVL. Les zones de matériaux de qualité doivent être identifiées, isolées et excavées en tant que matériaux utilisables. La terre arable doit être préservée pour être utilisée dans la remise en état du site.

Il faut également être conscient des effets potentiellement dommageables (impacts négatifs) que les bancs d'emprunt et les carrières peuvent avoir sur l'environnement local et sur les revenus des agriculteurs locaux si la terre arable n'est pas préservée, afin que des mesures d'atténuation puissent être intégrées dans les documents d'appel d'offres pour être appliquées pendant les opérations de construction. Un plan de développement et de remise en état (restauration) des carrières doit être élaboré pour toute carrière ou tout banc d'emprunt afin d'identifier les zones d'excavation, les zones de travail, les stocks de roche et de terre végétale, les voies d'accès, etc. Il convient également de montrer la forme finale du site et les talus excavés. Ce plan permet de contrôler l'aménagement et la remise en état du site afin de minimiser les problèmes, de dicter la manière la plus efficace d'aménager le site et de montrer l'état dans lequel le site sera laissé une fois l'exploitation terminée. La Figure 9-2 montre un exemple de plan d'aménagement de fosse utilisé pour une carrière de basalte.

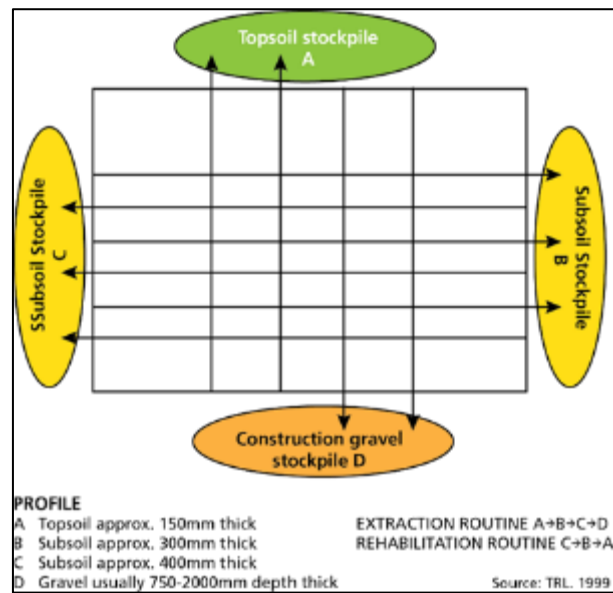
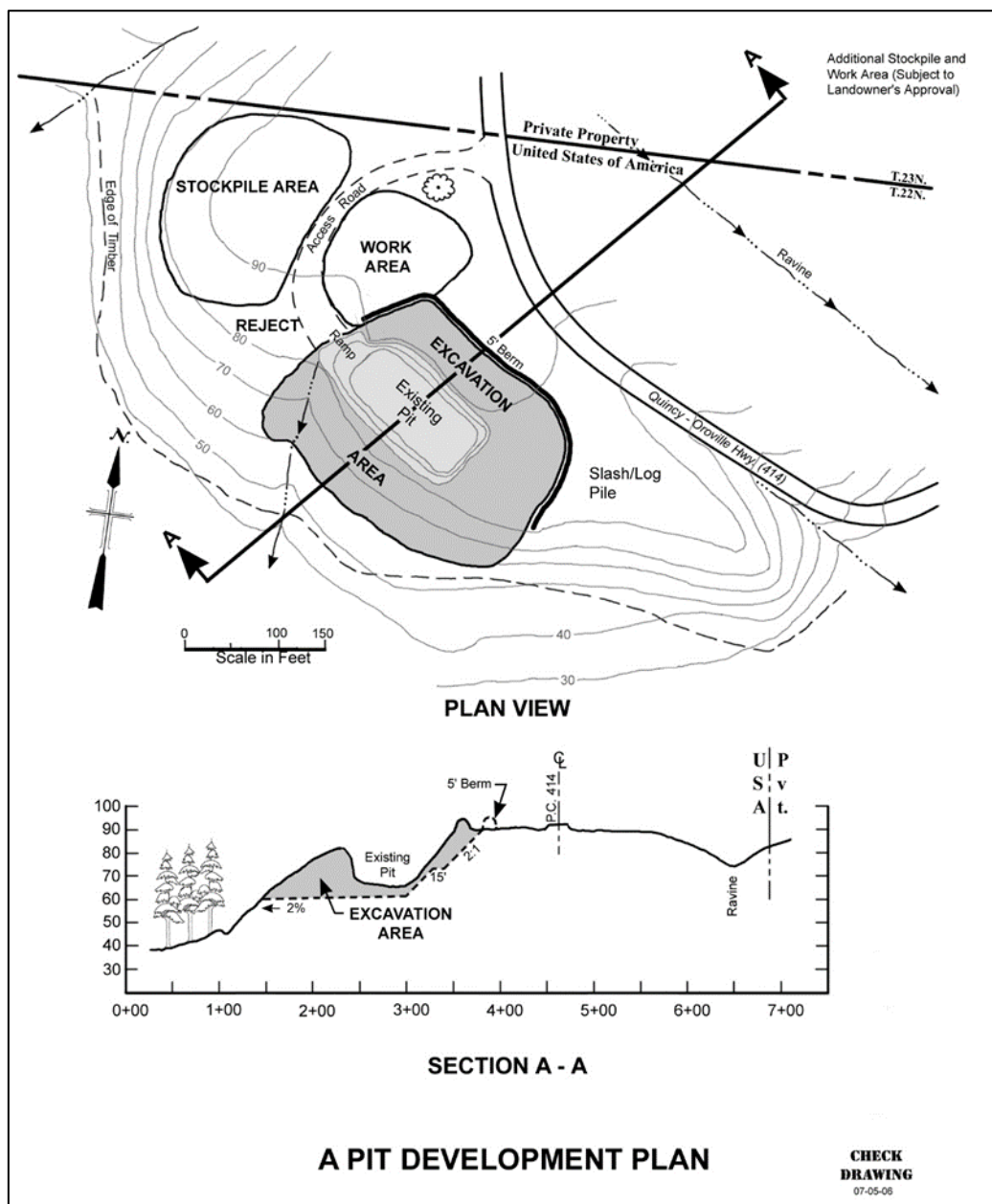


Figure 9-1: Procédure recommandée pour l'enlèvement des déblais et le stockage



Source: Keller, Unpublished "Minimum Impact Low-Volume Roads Manual".

Figure 9-2: Un exemple de plan de développement d'une fosse d'emprunt

9.4.2 Principaux facteurs

De nombreux facteurs doivent être pris en compte lors de la localisation et de l'exploitation des bancs d'emprunt :

- 1) Minimiser l'impact environnemental en réduisant la poussière et la pollution sonore pour les résidents de la zone. D'autres impacts environnementaux doivent être pris en compte tant pour la localisation d'un site que pour la restauration d'un site, notamment les impacts visuels, le drainage, le contrôle de l'érosion, la proximité des cours d'eau, les corridors et les impacts sur la faune, le développement de vecteurs dans les eaux stagnantes, une source d'eau, la proximité des villes, etc.
- 2) Préparation d'un plan d'emprunt pour s'assurer que la terre végétale et les morts-terrains sont stockés pour une utilisation ultérieure dans la restauration du site d'emprunt et séparation des différents types/qualités de matériaux dans les différents stocks pour s'assurer que les matériaux ne sont pas contaminés.
- 3) Drainage du site d'emprunt vers :

- garantir l'accessibilité et éviter que les matériaux ne soient trempés
 - prévenir la noyade accidentelle des enfants
- 4) Assurer une sécurité adéquate pour les personnes et le bétail en installant des clôtures, si nécessaire, et en évitant les pentes raides.
 - 5) Prévention des glissements de terrain lorsque les bancs d'emprunt sont situés sur des pentes de collines.
 - 6) Assurer la sécurité des travailleurs et des opérateurs de l'usine. Les travailleurs et les exploitants d'usines doivent recevoir une formation appropriée qui couvre les pratiques de travail sûres dans les bancs d'emprunt et les carrières. Des vêtements de sécurité appropriés doivent être fournis et peuvent inclure des casques, des bottes de protection et des gilets de sécurité routière. L'utilisation de ces derniers devrait être obligatoire.
 - 7) Assurer une quantité et une qualité adéquates de matériaux. Des échantillons représentatifs du matériaux devraient être testés. Des méthodes de forage, d'excavation ou d'autres méthodes d'investigation du sous-sol peuvent être nécessaires pour déterminer l'étendue du gisement, les zones de matériaux appropriés et non appropriés, et la qualité des matériaux.

9.5 Compactage

Le compactage efficace de la surface de roulement existante de la route en terre et/ou en terre battues qui doit être améliorée est l'un des moyens les plus rentables d'améliorer la capacité structurelle de la chaussée en LVR. Une surface de roulement bien compactée ;

- 1) possède une résistance, une rigidité et une capacité de charge accrues ;
- 2) est plus résistante à la pénétration de l'humidité et moins sensible au tassement différentiel ;
- 3) plus la densité est élevée, plus le support de la couche est solide, moins l'épaisseur requise des couches de revêtement superposées est importante et plus la structure de la chaussée est économique.

Il y a donc tout intérêt à obtenir une densité et une résistance correspondantes aussi élevées que possible, d'un point de vue économique, dans les couches de fondation et de chaussée.

Il est possible de maximiser le potentiel de résistance d'un sol de fondation, non pas nécessairement en le compactant à un niveau de compactage relatif prédéterminé, comme cela se fait traditionnellement, mais plutôt en le compactant avec la plante la plus lourde disponible pour atteindre le niveau uniforme de densité le plus élevé possible ("compactage jusqu'au quasi refus") sans dégradation significative de la résistance des particules. Ce faisant, il y a une réduction significative de la perméabilité ainsi qu'un gain bénéfique de densité, de résistance et de rigidité, ce dernier étant en corrélation directe avec une plus longue durée de vie de la chaussée, comme l'illustre la Figure 9-3. Pour ces raisons impératives, lorsque les densités plus élevées peuvent être atteintes de manière réaliste sur le terrain à partir de mesures sur des matériaux similaires ou d'autres informations établies, elles doivent être spécifiées dans les documents d'appel d'offres.

Il convient toutefois de faire preuve de prudence lors du compactage de certains matériaux pour les couches de base et de fondation (par exemple, les graviers latéritiques, les graviers de scories), car un compactage excessif peut entraîner une décomposition importante des particules individuelles et donc une perte de résistance au cisaillement. Au minimum, même si le compactage n'est pas spécifié, un certain compactage peut être réalisé avec les roues des engins de construction ou des camions de transport qui roulent sur le sol. Le mouvement de l'équipement doit s'étaler sur la surface de la route, et le sol ou les agrégats doivent être humides et proches du taux d'humidité optimal.

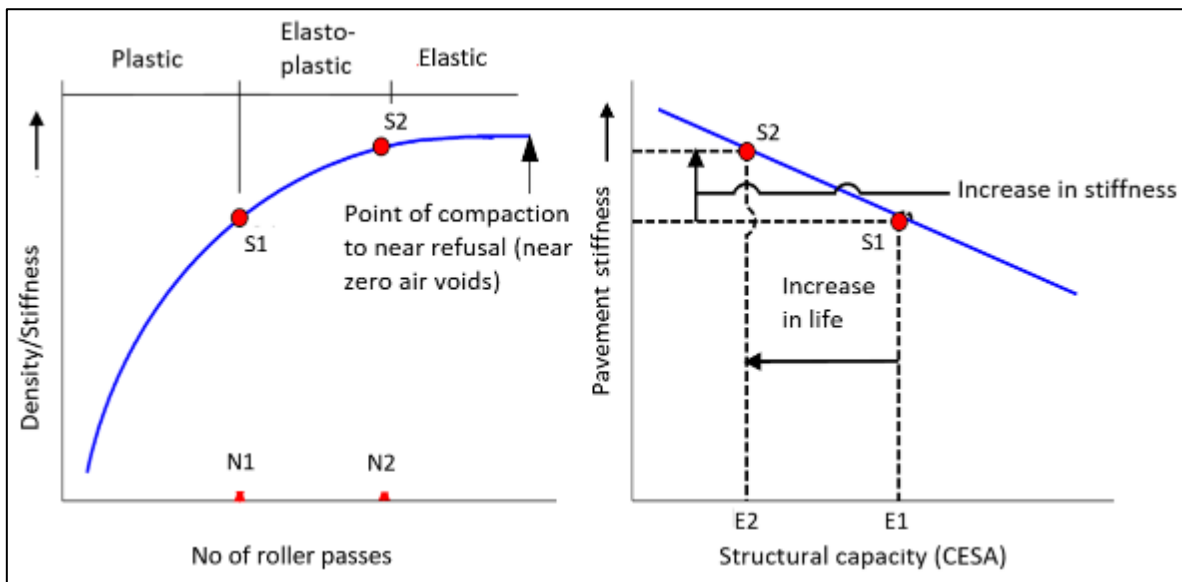


Figure 9-3: Avantages du compactage au refus

9.6 Amélioration des tableaux de conception des chaussées

Dans le cadre du programme ReCAP, plusieurs projets de recherche ont été réalisés en vue d'améliorer la fourniture et l'entretien des routes.

Le projet le plus pertinent pour la conception des chaussées est le projet "Développement de lignes directrices et de spécifications pour les routes à faible volume de trafic par analyse rétrospective", également connu sous le nom de projet d'analyse rétrospective. La principale conclusion de ce projet est que les matériaux naturels sélectionnés à partir desquels sont fabriquées les routes à faible trafic peuvent souvent supporter un trafic supérieur à 3 MESA. La plage climatique sur laquelle l'abaque de conception est applicable a également été étendue à un niveau de précipitations de 2200 mm/an. Le projet a fourni des propositions des abaques de conception de chaussée révisés pour la méthode de conception de chaussée basée sur la CBR. Les enveloppes de distribution de la taille des particules et les limites d'Atterberg ont également été révisées à la suite des preuves recueillies sur les performances des sections étudiées. Les nouvelles limites permettent l'utilisation d'une gamme plus large de matériaux appropriés pour les routes à faible volume. Les autorités routières pourront appliquer ces nouvelles limites lors de toute révision future des manuels ou des conceptions de LVR. Enfin, on a constaté une fois de plus que l'importance de fournir et d'entretenir un bon revêtement, de bons joints et un bon drainage influencent considérablement la performance des chaussées. Ces informations sont disponibles dans le rapport final du projet, disponible sur le site web ReCAP à l'adresse

<http://research4cap.org/Library/Ottoetal-TRL-2020-BackAnalysisLVR-Phase3FinalReport-AfCAP-RAF2069A-200504.pdf>.

9.7 Sections sur le rendement à long terme des chaussées

Il est important de noter que les méthodes de conception des chaussées présentées dans ce guide ont toutes été développées de manière empirique. Les performances des routes conçues par ces méthodes sont donc affectées par le climat, les caractéristiques du trafic et les caractéristiques des matériaux par rapport à celles utilisées à l'origine pour le développement des méthodes. Par conséquent, les conditions limites dans lesquelles chaque méthode a été développée et est applicable doivent être clairement comprises.

Dans le cadre de ReCAP, un projet intitulé "Renforcement des capacités et mentorat pour l'établissement et la mise en œuvre de programmes de suivi et d'évaluation des sections expérimentales et à long terme de la performance des chaussées dans six pays africains et au Myanmar", la capacité nationale a été développée pour effectuer le suivi de la performance de plusieurs sections de la performance à long terme des chaussées situées sur des routes à faible circulation. Ces routes sont composées de différents matériaux, climats et caractéristiques de trafic. Les chaussées de routes à faible trafic sont généralement conçues pour une durée

de 15 à 25 ans. Les données de performance de ces routes seront essentielles pour affiner les méthodes de conception empirique incluses dans les manuels des pays. Cela est d'autant plus vrai lorsque les routes sont en service depuis au moins 10 ans. L'affinement portera sur les structures des chaussées pour les différentes classes de trafic et d'infrastructure, ainsi que sur les caractéristiques des matériaux et les caractéristiques climatiques qui les accompagnent.

Bibliography

Botswana Roads Department, Ministry of Works, Transport and Communications. (2003). **Guideline No. 6: The Prevention and Repair of Salt Damage to Roads and Runways.**

Elges, H.F.W.K. (1985). **Dispersive soils.** The Civil Engineer in South Africa. 27(7):347-353.

Ethiopian Road Authority. (2017). **Design of Low Volume Roads.** Addis Ababa, Ethiopia.

Fukubayashi, Y., Kimura, M. (2014). **Improvement of Rural Access Roads in Developing Countries with Initiative for Self-reliance of communities.** Soils and Foundations Journal 54(1), 23 – 35.

Geotechnical Engineering Office. (2011). **Technical Guidelines on Landscape Treatment for Slopes.** GEO Publication No. 1/2011, Civil Engineering and Development Department. The Government of the Hong Kong Special Administrative Region.

Gray, D.; Leiser, A. (1982). **Biotechnical slope protection and erosion control.** Melbourne, FL: Krieger Publishing Co. 288 p. (ISBN 0-442-21222-4) (A good textbook covering various biotechnical erosion control techniques, their design and construction.)

Gray, D.; Sotir, R. (1996). **Biotechnical and soil bioengineering slope stabilization-A practical guide for erosion control.** New York, NY: A Wiley-Interscience Publication, John Wiley and Sons, Inc. 378 p. (ISBN 0-471-04978-6) (Covers various biotechnical erosion control techniques and their application.)

Howell, J. (2008). **Development of Local Resource Based Standards. Study of Road Embankment Erosion and Protection.** Technical Paper No. 6. SEACAP 19. Unpublished Project Report.

Hunt, T., Hearn, G., Chonephetsarath X., and Howell, J., (2008). **Slope maintenance manual.** Ministry of Public Works and Transport, Roads Administration Division, Laos.

Keller, G., Sherar, J. (2003). **Low-Volume Roads Engineering: Best Management Practices Field Guide.** The US Agency for International Development and the U.S. Department of Agriculture.

Lim, S. M., Wijeyesekera, D. C., Yek, C. S. (2015). **Slope Stabilisation for Rural Roads from a Geotechnical Perspective.** Proceedings of the 25th World Road Congress: Roads and Mobility – Creating New Value from Transport. Seoul, South Korea. 2 – 6 November 2015. 5(1), 4190 – 4204.

NYS DOT. (2014). **Slope Stability Analysis in Geotechnical Design Manual.** New York State Department of Transportation, New York. Pp. 10-1 – 10-15

Salter, D., Howell, J., Eagle, S. (2020). **Bioengineering for Green Infrastructure.** Asian Development Bank. Mandaluyong, Philippines.

Samtani, N. C., Nowatzki, E. A. (2006). **Soils and Foundations Reference Manual – Volume I.** FHWA-NHI-06-088. National Highway Institute, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Washington, D.C. 20590

Sassa, K. and Canuti, P. (2009). **Landslides Disaster Risk Reduction.** Springer-Verlag Berlin Heidelberg

Scott Wilson. (2009). **Mainstreaming Slope Stability Management – Hazard and Risk Assessment – to Lao Practitioners: Bio-engineering.** SEACAP 21/004. Basingstoke, United Kingdom. UK Department for International Development. Transport Research Laboratory. (1997). **Overseas Road Note 14. Hydrological Design Manual for Slope Stability in the Tropics.** Overseas Centre, TRL, Crowthorne, Berkshire, UK.

Transport Research Laboratory. (1997). **Overseas Road Note 16. Principles of Low Cost Road Engineering in Mountainous Regions.** Overseas Centre, TRL, Crowthorne, Berkshire, UK.

ReCAP | Note sur les Routes Rurales 01 : Guide sur l'application des méthodes de conception des chaussées pour les routes rurales à faible volume

Turner, K.; Schuster, R., eds. (1996). ***Landslides-investigation and mitigation***. Spec. Rep. 247. Washington, DC: National Academy of Sciences, Transportation Research Board. 673 p.

Turner, K.; Schuster, R., eds. (2012). ***Rockfall: characterization and control***. Washington, DC: National Academy of Sciences, Transportation Research Board.

Willey, D.C (1991). ***Rock slope stabilization and protection measures***. National Symposium of Highway and Railway Slope Maintenance. Symposium Series No 6. Association of Engineering Geologists.

WSDOT. (2013). ***Slope Stability Analysis in Geotechnical Design Manual***. Washington State Department of Transportation. Washington. pp 7-1 – 7-6.

ANNEX 1 MATERIALS SELECTION TABLES

Tableau A-1: Matériaux à plasticité élevées

Types de matériaux	Problèmes associés à la plasticité élevée	Méthodes d'essai et analyse pour quantifier et limiter le problème	Caractéristiques particulières qui influencent fortement le comportement matériaux	Options pour améliorer la qualité des matériaux / performance
<ul style="list-style-type: none"> • Coralline Gravels • Calcretes • Gravier de latérite • Gravier de quartz • Dépôts de la terrasse fluviale • Dépôts colluviaux • Sables argileux • Calcaires altérés • Autres roches ondulées • Sol et roche profondément altérés 	<p>Propriétés d'ingénierie</p> <ul style="list-style-type: none"> • Résultats faibles de CBR trempés (c.-à-d. faible capacité de roulement de charge) • Problèmes de compactage • Susceptibilité à la perte de résistance sur le mouillage • Défauts de chaussée • Nids-de-poule • Orniérage <p>Fissuration Expansion et gonflement</p>	<p>Essais standard:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Limite liquide (LL), limite plastique (PL), rétrécissement linéaire (LS), activité • Sédimentométrie (hydromètre) • Compactage et CBR • Module de granulométrie (Particules conservées sur 2.00mm + 0.425mm + 0.075mm/100) • Indice de plasticité (LL-PL) • Produit de plasticité (PI x % passant 0,075 mm tamis) • Module de plasticité (PI x % passant 0,425 mm tamis) • Module de rétrécissement (LS x % passant 0,425 mm tamis) <p>Essais spéciaux</p> <ul style="list-style-type: none"> • Minéralogie • Analyse chimique, Changement de volume • Activité de l'argile • (PI / %plus fin que 0,02 mm) • Minéralogie d'argile (% minéraux actifs et inactifs) • Perméabilité (temps pris pour absorber/transmettre l'eau) • Relation entre le 	<ul style="list-style-type: none"> • Limiter l'utilisation en fonction des facteurs climatiques ou routiers (prendre note des risques potentiels d'inondation ou de sécheresse) • Restreindre l'utilisation en fonction du type de trafic et du chargement, par exemple les routes à faible volume seulement • Assurer la protection contre la saturation de la chaussée; • Bon enduit superficiel • Accotements revêtues • Prévenir la migration vers le haut de l'humidité (c.-à-d. des couches sous-jacentes) <p>Entretien des joints étanches</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Mélange de stabilisation mécanique avec matériau de faible plasticité • Traitement à la chaux: généralement adapté à la base lorsque: Passant 0.425mm min 15% Passant 0.075 mm 5-35% PI 10-25% Trempé CBR min 20% • Traitement à la chaux, généralement adapté à la fondation lorsque: Passant 0.425mm min 15% Passant 0.075 mm max 40% PI 10-30% • Traitement du ciment: généralement adapté à la base lorsque: PI max 25%, Passant 0,075 mm 5-35%, Trempé CBR min 20% • Traitement du ciment: généralement adapté à la fondation lorsque: Passant 0.075 mm max 40%, PI max 30% • Traitement du bitume : généralement adapté à la base de sable argileux lorsque : • Passant 0.075 mm 10-30% LL max 40%, PI max 15%

1.		<ul style="list-style-type: none"> • Minéralogie d'argile (% minéraux actifs et inactifs) • Perméabilité (temps pris pour absorber/transmettre l'eau) • Relation entre le compactage, la teneur en humidité et le CBR (c.-à-d. la sensibilité à la perte de résistance avec l'augmentation de la teneur en humidité) 	•	<ul style="list-style-type: none"> • Traitement chimique: peut être considéré comme une alternative pour le traitement du ciment ou de la chaux, mais plus difficile à construire et plus cher.
----	--	---	---	--

Source : Cook et coll. 2002 – voir référence au Chapitre 3.

Tableau A-2: Matériaux mal calibrés

Matériaux typiques	Problèmes potentiels	Essais standard	Conception de chaussée pour les matériaux mal calibrés	Options pour améliorer la qualité des matériaux / performance
<ul style="list-style-type: none"> • Tout dépôt granulaire naturel • Matières faibles ou mal cimentées (p. ex. latérite, conglomérat faible) • Roches compétentes hautement fracturées 	<p>a) Écart grossier classé Problèmes de compactage</p> <p>b) Un pourcentage élevé de vides entraînera des charges de points élevés, une rupture de particules plus faibles et une forte perméabilité. Potentiel d'effondrement.</p> <p>c) Faible capacité de roulement de charge (CBR) associée à un mauvais verrouillage des particules et à une friction interne.</p> <p>d) Contenu en fins excédentaires</p> <ul style="list-style-type: none"> • Problèmes de compactage • De mauvaises caractéristiques de frottement interne avec un faible verrouillage entre les particules plus grosses (c.-à-d. elles « flottent ») ce qui entraîne un faible CBR. • Si les fins sont en plastique, le matériau sera sujet à un affaiblissement de la saturation <p>e) Classé uniformément Compactage médiocre, faible densité et perméabilité élevée</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Distribution de la taille des particules, - • Essai d'équivalence de sable • Module de granulométrie et coefficient d'uniformité • Indice de rejet (% retenu sur le tamis de 37,5 mm) • Indice de grossièreté • Indice de finesse <p>a) Matériaux fins</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ratio de vide • Perméabilité • Niveau de compactage et de vides d'air • Relation entre compactage, teneur en humidité et CBR 	<ul style="list-style-type: none"> • Limiter l'utilisation en fonction des facteurs climatiques et de l'environnement routier • Restreindre l'utilisation en fonction du type de trafic et du chargement. • Sélectionnez les spécifications de granulométrie spécifiée qui permettent une utilisation optimale du matériaux disponible. Par exemple, considérez : Macadam lié à l'eau, Macadam lié à sec, base de Telford • Assurer une protection contre la saturation de la chaussée en cas d'fins en plastique excessives. 	<ul style="list-style-type: none"> • Stabilisation mécanique - Mélanger avec des matériaux qui amélioreront les caractéristiques de granulométrie • Écran. L'élimination de la surdimensionner est habituellement possible, mais l'élimination des fins excessives collantes peut être difficile lorsque les matériaux sont humides. • Écraser et filtrer pour créer une granulométrie souhaitable, en utilisant une ou plusieurs sources de matériaux • Traitement de la chaux ou du ciment : généralement adapté à l'amélioration des matériaux avec des fins excessives

Tableau A-3: Matériaux de mauvaise forme

Matériaux typiques	Problèmes potentiels	Essais standard	Conception de la chaussée pour s'adapter à la mauvaise forme des particules	Options pour améliorer la qualité des matériaux / performance
<p>Roches métamorphiques foliées (aplatis et allongées) Graviers et sables alluviaux (arrondis à presque arrondis) Désert (Éolienne) Sables (arrondi) Conglomérats (arrondis à sous-arrondis)</p>	<p>Problèmes de compactage Un pourcentage élevé de vides, se traduira par des charges de point élevé qui causeront la dégradation des particules plus faibles et la perméabilité élevée. Peut donner de mauvais résultats CBR (c.-à-d. une faible capacité de roulement de charge) associés à un mauvais verrouillage des particules et à une friction interne.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Indice flakiness, • Allongement • Dimension moyenne la moins • Module de granulométrie (P2.00mm + P0.425mm + P0.075mm/100). • Distribution de la taille des particules, • Les matériaux bien classés sont mieux en mesure de tolérer les particules de mauvaise forme en raison de contacts de charge ponctuelle réduite, de vides en % et de perméabilité • % particules concassées • Inspection visuelle • Niveau de compactage 	<ul style="list-style-type: none"> • Restreindre l'utilisation en fonction du type de trafic et du chargement. • Restreindre l'utilisation en fonction des facteurs climatiques et de l'environnement routier. 	<ul style="list-style-type: none"> • Stabilisation mécanique (Mélanger avec des matériaux bien classés qui ont une bonne forme de particules (cubiques). • Crush (Les matériaux arrondis seront améliorés par le broyage) • Améliorer les procédures de concassage (matériaux feuilletés). Le type d'appareil de concassage (c.-à-d. si le broyeur de mâchoires ou le concasseur de cônes, etc.) peut influencer de façon significative la proportion de particules aplatis produites au cours du traitement global. <p>Choisissez une usine de compactage qui limitera la rupture des agrégats soigneusement traités pendant la pose de la chaussée.</p>

Source : Cook et coll. 2002 – voir référence au Chapitre 3.

Tableau A-4: Matériaux à faible résistance des particules

Matériaux typiques	Problèmes potentiels	Essais standard	Conception de la chaussée pour s'adapter à une faible résistance des particules	Options pour améliorer la qualité des matériaux / performance
<ul style="list-style-type: none"> • Roches intrinsèquement faibles : • Marles et calcaires; Mudstone et Siltstones; • Grès faibles • Tuffs faibles; • Roches partiellement altérées (tous types) • Gravier naturels faibles : • Quelques calcrettes; quelques latérites quelques silcrettes; la plupart des cendres volcaniques de scoria); cendres volcaniques et pierre ponce. • Matériaux manufacturés faibles • Briques faibles - Démolition faible et déchets industriels; D 	<ul style="list-style-type: none"> • Changement des caractéristiques de granulométrie lors du compactage. Y compris la génération d'fins excessives. • Difficulté à identifier MDD et OMC • Problèmes de compactage. Difficulté à atteindre la densité de champ requise. • Une faible densité sera liée à une faible résistance CBR. 	<p>Propriétés de résistance agrégées déterminées par des essais sélectionnés</p> <ul style="list-style-type: none"> • La durabilité des agrégats diminue en termes de résistance dans le temps d'ingénierie - c.f. Tableau 4.5. • Valeur de concassage des agrégats (ACV) • Los Angeles Abrasion (LAA) Valeur • Valeur d'impact des agrégats (AIV) • 10 % FACT Aggregate Plines Test (APT) • Aggregate Fingers Test (AFT). • Essai d'absorption de l'eau • 10% FACT Procédures modifiées d'AIV humides et sèches • Indice flakiness, • Indice d'élongation, • Distribution de la taille des particules, • % particules concassées • Dimension minimale moyenne • Inspection visuelle • La durabilité des agrégats diminue en résistance dans le temps d'ingénierie • Densité de chaussée réalisable 	<ul style="list-style-type: none"> • Restreindre l'utilisation en fonction du type de trafic et du chargement • Restreindre l'utilisation en fonction des facteurs climatiques - ne pas utiliser dans les environnements qui provoquera la détérioration des agrégats. 	<ul style="list-style-type: none"> • Stabilisation mécanique • Mélange avec des matériaux plus solides qui amélioreront les caractéristiques de granulométrie • Écrasement et criblage • Élimination des particules plus faibles dans un matériau à résistance mixte. • Le traitement de la chaux ou du ciment peut améliorer considérablement les performances des matériaux. • Faire correspondre les procédures d'installation de construction et de construction avec les caractéristiques des matériaux.

Source : Cook et coll. 2002 – voir référence au chapitre 3.

Tableau A-5: Matériaux dont la durabilité est médiocre

Matériaux typiques	Problèmes potentiels	Essai standard	Conception de la chaussée pour s'adapter à la durabilité des particules pauvres	Options pour améliorer la qualité des matériaux / performance
<ul style="list-style-type: none"> • Marl; Mudstone calcaire; Schiste; Grès d'Argillacé • Tuffs faibles de roche mal cimenté; Grès faibles • Roches partiellement altérées (tous types) • Quelques roches ignées intermédiaires de base Basalte; Dolérite; Gabbro; Andésite 	<ul style="list-style-type: none"> • Apparemment, de solides agrégats de chaussée se décomposent en service ou pendant les procédures de construction/stockage. (l'influence climatique est importante). • 	<ul style="list-style-type: none"> • Essais standard: • Essais de bon état de sulfate de sodium et de sulfate de magnésium LAA • Durabilité de Texas Ball Mill Slake • Analyse minéralogique Voir tableau 4.6 • Dégradation des propriétés techniques dans la conception-vie de la chaussée. • Résultats insatisfaisants des essais énumérés ci-dessus. 	<ul style="list-style-type: none"> • Restreindre l'utilisation en fonction des facteurs climatiques ou de l'environnement routier - ne pas utiliser dans les environnements qui conduiront une détérioration des agrégats. • Assurer la protection contre la saturation de la chaussée Bon enduit superficiel • Accotements revêtues Empêcher la migration vers le haut de l'humidité (c.-à-d. des couches sous-jacentes) Entretien des joints étanches 	<ul style="list-style-type: none"> • Stabilisation mécanique : Mélange avec des matériaux qui diminueront la dégradation des agrégats • Le traitement de la chaux ou du ciment peut inhiber les problèmes de durabilité, mais nécessitera une étude détaillée et peut-être des sentiers de terrain à long terme.

Source : Cook et coll. 2002 – voir référence au Chapitre 3

Tableau A-6: Procédures d'évaluation pétrographiques

Procédure pétrographique	Description de la procédure	Application de procédure
Agrégat : Examen visuel qualitatif	Enregistrer le caractère général de l'échantillon agrégé, y compris la granulométrie, la texture, la forme et le type de roche	Une évaluation rapide et rapide.
Agrégat : Examen visuel quantitatif	Tamiser en fractions de taille séparées et examiner chaque fraction en termes de granulométrie, de texture, de forme, de type de roche et de minéralogie. Utiliser des procédures supplémentaires énoncées ci-dessous, selon le cas.	Procédure pétrographique détaillée pour l'identification des matériaux faibles et/ou inadaptes et la reconnaissance des minéraux potentiellement délétères.
Valeur bleue de méthylène	Basé sur l'absorption du bleu de méthylène par les minéraux argileux. Roche en poudre ou échantillon de sol fin suspendu en solution, puis titré avec du bleu de méthylène.	Méthode rapide d'indication de la présence de minéraux argileux délétères ne donne aucune indication de type minéral. Peut-être besoin de travaux supplémentaires d'évaluation des tissus pour des résultats plus fiables.
Microscopie binoculaire	L'utilisation du microscope à jumelles légères plane nécessite peu de préparation d'échantillons. De petits microscopes portatifs peuvent être utilisés sur le terrain.	Une méthode rapide et simple pour l'examen du tissu du sol et de la texture des spécimens de main. Les photographies peuvent être facilement prises pour prendre en charge les descriptions
Mince Section Microscopie	La méthode géologique traditionnelle d'examen de la minéralogie et du tissu de sous-échantillons minces de spécimens de main sous le plan et la lumière polarisée.	Peut être utilisé pour l'examen du tissu et comme moyen d'établir la composition minérale par des techniques de comptage par point. Difficile de faire des sections en matériaux friables. Possibilité de prendre des photos.
Microscope électronique à balayage (SEM)	Utilise un faisceau concentré d'électrons pour numériser un échantillon spécialement préparé. Certains électrons en arrière dispersés d'autres produisent des électrons secondaires. Les motifs peuvent être capturés sur le film pour observation.	A besoin d'un fonctionnement minutieux pour obtenir des résultats significatifs. Le plus utile dans les sols à grain plus fins. L'utilisation de paires photographiques stéréoscopiques de photographies augmente l'efficacité de l'interprétation.
Diffraction des rayons X (XRD)	Utilise l'angle de diffraction identifiable que les rayons X font avec des minéraux différents. Les échantillons en poudre peuvent être orientés, non orientés, séchés, glycolés ou chauffés pour faciliter l'identification.	Largement utilisé dans l'identification de la minéralogie du sol tropical. En soi, cette méthode n'est que semi-quantitative. Impossible d'identifier les minéraux argileux non cristallins
Analyse thermique	Selon la base de la question de savoir si la réaction thermique, qui se produit comme un minéral d'argile est chauffé est exothermique ou endothermique et une interprétation du diagramme résultant.	Ces méthodes peuvent être utilement utilisées dans l'étude des argiles et peuvent fournir des informations minéralogiques utiles en conjonction avec les méthodes énumérées ci-dessus.

Source : Cook et coll. 2002 – voir référence au Chapitre 3

