

Adaptation au climat : Gestion des risques et optimisation de la résilience pour les accès routiers vulnérables en Afrique

Lignes directrices pour l'adaptation de l'ingénierie



Council for Scientific and Industrial Research (CSIR), Paige-Green Consulting (Pty) Ltd and St Helens Consulting Ltd

Projet ReCAP GEN2014C

Août 2019

Citation préférée : Paige-Green, P., Verhaeghe, B., Head, M., Council for Scientific and Industrial Research (CSIR), Paige-Green Consulting (Pty) Ltd et St Helens Consulting Ltd (2019). Adaptation au climat : Gestion des risques et optimisation de la résilience pour les accès routiers vulnérables en Afrique, Lignes directrices pour l'adaptation de l'ingénierie, GEN2014C. Londres : ReCAP pour le DFID

Pour de plus amples informations, veuillez contacter : Benoît Verhaeghe, BVerhaeg@csir.co.za

Unité de gestion du projet ReCAP
 Cardno Emerging Market (UK) Ltd
 Niveau 5, Centre d'affaires de Clarendon
 42 Upper Berkeley Street, Marylebone
 Londres W1H 5PW Royaume-Uni



Les opinions exprimées dans ce document sont celles des auteurs et ne reflètent pas nécessairement celles de Research for Community Access Partnership (ReCAP), du CSIR, de Paige-Green Consulting (Pty) Ltd, de St Helens Consulting Ltd ou de Cardno Emerging Markets (UK) Ltd pour lesquels le document a été préparé.

Photo de couverture: Phil Paige- Green

Quality assurance and review table

Version	Auteurs	Réviser(s)	Date
1	P Paige-Green, B Verhaeghe, M Head	L Sampson & Dr J Cook, ReCAP PMU	Août 2017
2	P Paige-Green, B Verhaeghe, M Head	N Leta, ReCAP PMU Dr J Cook, ReCAP TP	Novembre 2018
3	P Paige-Green, B Verhaeghe, M Head	Prof R Wilby	Juillet 2019
4	P Paige-Green, B Verhaeghe, M Head	N Leta, ReCAP PMU	Septembre 2019

Détails de la base de données ReCAP : Adaptation au climat : Gestion des risques et optimisation de la résilience pour les accès routiers vulnérables en Afrique, Lignes directrices pour l'adaptation de l'ingénierie

N° de référence:	GEN2014C	Lieu	L'Afrique subsaharienne
Source de la proposition	DFID/ReCAP	Méthode de passation des marchés	Appel d'offres
Thème	Sustainability of access	Sous-thème	Climate resilience
Organisation chef de file de la mise en œuvre	CSIR	Organisation partenaire	Paige-Green Consulting St Helens Consulting
Date de début	Avril2017	Date de fin	Septembre 2019
Date d'échéance du	Août 2019	Date de réception	Septembre 2019

Contenu

Contenu	ii
Résumé	vi
Mots clés	vi
Glossaire (basé sur le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, GIEC, 2018)	vii
Acronymes, unités et monnaies	xi
Synthèse	1
1 Généralités et contexte	3
1.1 Contexte du projet	3
1.1.1 Buts et objectifs	3
1.1.2 Portée de l'action	3
1.1.3 Aperçu du manuel d'adaptation	4
1.1.4 Le contenu du manuel	5
1.2 Contexte	7
1.2.1 Vulnérabilité climatique	7
1.2.2 Accès rural	7
2 Effets du changement climatique	12
2.1 Généralités	12
2.2 Changements de température	13
2.3 Changements dans les précipitations	14
2.4 Des événements extrêmes plus fréquents.....	14
2.5 Élévation du niveau de la mer	15
2.6 Migration de la ceinture de cyclones tropicaux.....	15
2.7 Augmentation de la vitesse du vent.....	15
3 Éléments routiers susceptibles d'être affectés par la variabilité et le changement climatique	25
4 Aperçu de la méthodologie d'adaptation	26
4.1 Stratégies d'adaptation	26
4.2 Méthodologie.....	27
4.2.1 Évaluation de l'adaptation	28
4.2.2 Modalités de mise en œuvre	29
4.2.3 Suivi et évaluation	30
4.3 Hiérarchisation des besoins d'adaptation.....	31
4.4 Options d'adaptation dans le secteur routier	36
4.5 Ne rien faire ou faire des options minimales	38
5 Options d'adaptation	38
5.1 Dangers, exposition et vulnérabilité	38
5.2 Conséquences et adaptation.....	41

5.3	Les routes	42	
5.3.1	Routes non revêtues		42
5.3.2	Routes revêtues		48
5.3.3	Travaux de terrassement		56
5.4	Sols supports	71	
5.4.1	Argiles expansives		72
5.4.2	Sols dispersifs		76
5.4.3	Sols salins		77
5.4.4	Argiles tendres		78
5.4.5	Zones humides/nappes phréatiques élevées		78
5.4.6	Sols déformables		78
5.5	Drainage (eau provenant de la réserve routière)	79	
5.5.1	Description		79
5.5.2	Considérations relatives à la conception		80
5.6	Drainage (eau provenant de l'extérieur de la réserve routière)	84	
5.6.1	Description		84
5.6.2	Considérations relatives à la conception		90
5.7	Construction	93	
5.8	Entretien	95	
5.8.1	Description		95
5.8.2	Adaptation		96
5.9	Autres questions	98	
5.10	Résumé	99	
6	Résumé et conclusions		109
	Références		110

Tableaux

Tableau 1 Dangers liés à l'augmentation des précipitations	16
Tableau 2 Dangers liés à la diminution des précipitations (mais à des événements plus extrêmes)	18
Tableau 3 Dangers liés à l'augmentation des températures	19
Tableau 4 Dangers liés à la baisse des températures	20
Tableau 5 Dangers liés à l'augmentation du vent (et aux feux de forêt qui en résultent)	21
Tableau 6 Dangers liés à l'élévation du niveau de la mer et les vagues de tempête	22
Tableau 7 Dangers liés aux variations du niveau des eaux souterraines	23
Tableau 8 Indicateurs types de suivi des résultats (après : BAD, 2011)	31
Tableau 9 Lignes directrices sur les niveaux de service pour l'accessibilité	33
Tableau 10 Lignes directrices sur les niveaux de service pour la mobilité	33

Tableau 11	Espérance de vie nominale de plusieurs types d'infrastructures.....	35
Tableau 12	Utilisations et options de la bio-ingénierie (Shresta et al, 2012)	62
Tableau 13	Valeurs des h_{min} pour les routes non revêtues	81
Tableau 14	Valeurs des h_{min} pour les routes revêtues	82
Tableau 15	Intervalles suggérés pour les drains à onglet en fonction de la pente et de la cohésion du matériau.....	83
Tableau 16	Dangers et adaptations liés à l'augmentation des précipitations.....	99
Tableau 17	Dangers et adaptations liés à la diminution des précipitations (mais à des événements plus extrêmes)	101
Tableau 18	Dangers et adaptations liés à l'augmentation des températures	103
Tableau 19	Dangers et adaptations liés à la baisse des températures.....	104
Tableau 20	Dangers et adaptations liés à l'augmentation du vent (et aux feux de forêt qui en résultent).....	105
Tableau 21	Dangers et adaptations liés à l'élévation du niveau de la mer et aux ondes de tempête.....	107
Tableau 22	Dangers et adaptations liés aux variations du niveau des eaux souterraines	108

Figures

Figure 1.	Applications couvertes par le manuel	5
Figure 2	Utilisation de différents types de routes en termes d'accessibilité et de mobilité AASHO, 1964)	8
Figure 3	Relation entre la détérioration des routes et l'environnement et le trafic (SATCC, 2003)	9
Figure 4	Approche stratégique basée sur le type d'activité et l'adéquation du financement disponible	10
Figure 5	Route en terre typique non aménagée montrant les dommages causés par la rétention d'eau	43
Figure 6	Route typique construite en terre montrant la structure façonnée et les drains latéraux	44
Figure 7	Route en terre battue typique montrant la structure façonnée et la couche de roulement en gravier	46
Figure 8	Spécification pour les graviers de la couche de roulement en utilisant les méthodes d'essai basées sur l'ASTM/AASHTO (lignes noires) et les méthodes d'essai BS (lignes rouges brisées)	47
Figure 9	Perte de surface causée par de fortes pressions de soulèvement lors d'une inondation	49
Figure 10	Détérioration de l'accotement du joint à un seul éclat par rapport au joint à deux éclats sur la chaussée	51
Figure 11	Orniérage et déformation de l'asphalte résultant des températures élevées et de la charge du trafic	52
Figure 12	Fluctuation quotidienne et saisonnière des températures de l'air et de la route (bleu = air, rose = 20 mm sous la surface de la route et rouge = 200 mm sous la surface de la route)	53
Figure 13	Soulèvement d'une route en béton armé continu à couche mince résultant de la dilatation thermique	54
Figure 14	Dommages subis par une route en pierre emballée à la main après une inondation	56
Figure 15	Fermeture d'une route pour cause de rupture de pente. Notez la déviation à gauche créée pour contourner la rupture	57
Figure 16	Diagramme de décision pour la conception des déblais routiers	59
Figure 17	Effet de la topographie sur le volume de matériau défectueux	59
Figure 18	Sous-coupe et effondrement de la chaussée dus à l'érosion du talus	64
Figure 19	Perte complète du remblai et de la route en raison des conditions d'écoulement turbulentes lors du débordement et de la faiblesse de la couche de fondation	64

Figure 20 Protection des remblais de pierre coulés de matériaux érodables	65
Figure 21 Mur en béton de masse pour minimiser les dommages causés par les inondations dans les vallées par des matériaux érodables	68
Figure 22 Gué en béton complexe avec régulateurs de vitesse de l'eau et bassin de tranquillisation	68
Figure 23 Érosion causée par l'accès des véhicules, des piétons et des animaux hors de la route	69
Figure 24 Perte de sol non protégé au centre de la photographie. La zone brûlée sur la gauche est exposée à l'impact de la pluie et à l'érosion par rapport à la zone végétalisée sur la droite	70
Figure 25 Solutions possibles pour les routes sur des argiles actives en fonction de la dilatation potentielle	73
Figure 26 Régime typique de déplacement de l'humidité sous les routes sur des argiles expansives	74
Figure 27 Quelques contre-mesures utilisées pour augmenter la zone d'équilibre de l'humidité	74
Figure 28 Exemple de fissuration due à la déshydratation causée par des arbres à côté de la route, entraînant un affaissement de plus de 150 mm dans la zone rapiécée	75
Figure 29 Exemple de détresse récurrente dans un remblai en raison de l'utilisation de sols hautement dispersifs comme matériau de remblai	77
Figure 30 Accotements gazonnés et encombrés réduisant à néant l'efficacité du drainage de la surface de la route	79
Figure 31 Exigences en matière de drainage pour les routes non revêtues	80
Figure 32 Exigences de drainage pour les routes revêtues	81
Figure 33 Contrôle de l'affouillement des grumes	83
Figure 34 Un drain à onglet court qui ne peut pas dissiper efficacement l'eau collectée	84
Figure 35 Dommages causés par l'inondation à la culée du pont après le débordement de la berge	85
Figure 36 Dommages causés à un ponceau en acier après la tempête avec perte totale du remblai. La photo de droite montre l'emplacement final du tuyau métallique	86
Figure 37 Affaissement du tablier du pont dû à l'affouillement de la pile de support	89
Figure 38 Affouillement localisé autour de la semelle de la pile du pont	89
Figure 39 Séparation des murs des ailes du mur de tête d'un ponceau relativement neuf	90
Figure 40 Dommages aux poteaux de glissière de sécurité et aux revêtements bitumineux causés par les incendies	95
Figure 41 Effet de la dilatation des glissières de sécurité métalliques : a) desserrés et b) serrés de manière à éviter les mouvements thermiques et à provoquer des déformations (mouvement quotidien visible sur la photo de gauche)	98

Résumé

La Banque africaine de développement affirme que l'Afrique est l'une des régions du monde les plus vulnérables aux effets du changement climatique. La majorité des études menées dans la région, tant sur la vulnérabilité que sur les scénarios, suggèrent que les dommages causés par la variabilité et le changement climatique, par rapport à la population et au produit intérieur brut, devraient être plus élevés en Afrique que dans toute autre région du monde.

Afin d'aider à faire face à cette menace importante pour le développement de l'Afrique, le Partenariat pour l'accès communautaire à l'Afrique (Africa Community Access Partnership, AfCAP) (un programme de recherche financé par UK Aid), a commandé un projet qui a débuté en avril 2016. Son objectif était de produire des orientations régionales et de développer un accès rural résistant au climat en Afrique grâce à la recherche et au partage des connaissances au sein et entre les pays participants. Les résultats devraient contribuer au développement d'un réseau routier résistant au climat qui s'étendrait à l'intérieur des communautés rurales et entre elles.

L'étude aborde les questions des méthodologies appropriées et économiques pour l'évaluation de la vulnérabilité et des risques, de la hiérarchisation des interventions d'adaptation et de l'optimisation de la résilience des actifs dans le contexte des routes rurales à faible trafic.

L'étude se concentre sur : (a) les procédures d'adaptation appropriées en matière d'ingénierie et de non-ingénierie ; (b) le renforcement durable de la capacité de trois pays partenaires de l'AfCAP à faire face aux effets probables du changement climatique sur les réseaux routiers ruraux ; (c) le renforcement durable de la capacité d'autres pays partenaires de l'AfCAP ; et (d) l'adoption et l'intégration des résultats de la recherche dans tous les pays partenaires de l'AfCAP.

Dans cette ligne directrice, les options d'adaptation technique liées aux divers facteurs de stress climatique sont présentées. L'importance cruciale d'un drainage efficace et d'un entretien approprié et en temps opportun est soulignée.

Les techniques d'adaptation permettant de faire face aux changements attendus en matière de température et de précipitations, de vent, d'élévation du niveau de l'eau et d'événements extrêmes plus fréquents sont identifiées et discutées. Elles concernent plus particulièrement les routes non revêtues, les routes revêtues, les matériaux de sol support, les travaux de terrassement et de drainage à l'intérieur et à l'extérieur de l'emprise routière ainsi que les implications possibles pour les activités de construction. Les impacts sur les pratiques d'entretien sont également mis en évidence et des conseils sont donnés.

Mots clés

Renforcement des capacités ; gestion du changement ; adaptation au climat ; changement climatique ; impact climatique ; résilience au climat ; menace climatique ; variabilité du climat ; démonstration ; entretien ; risque ; accessibilité rurale ; routes rurales ; vulnérabilité.

Recherche pour le partenariat d'accès communautaire (ReCAP)

Des transports sûrs et durables pour les communautés rurales

ReCAP est un programme de recherche, financé par UK Aid, qui vise à promouvoir des transports sûrs et durables pour les communautés rurales en Afrique et en Asie. ReCAP comprend le Partenariat pour l'accès communautaire en Afrique (AfCAP) et le Partenariat pour l'accès communautaire en Asie (AsCAP). Ces partenariats soutiennent le partage des connaissances entre les pays participants afin d'améliorer l'adoption de solutions peu coûteuses et éprouvées pour l'accès rural qui maximisent l'utilisation des ressources locales.

Le programme ReCAP est géré par Cardno Emerging Markets (UK) Ltd.

www.research4cap.org

Glossaire (basé sur le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, GIEC, 2018)

Accessibilité	La facilité pour des groupes de population d'accéder ou de participer à des activités de service en utilisant un réseau de transport.
Adaptation	Dans les systèmes humains, le processus d'ajustement au climat réel ou prévu et à ses effets, afin de modérer les dommages ou d'exploiter les opportunités bénéfiques (c'est-à-dire les actions qui réduisent le danger, l'exposition et la vulnérabilité). Dans les systèmes naturels, le processus d'ajustement au climat réel et à ses effets ; l'intervention humaine peut faciliter l'ajustement au climat prévu et à ses effets.
Besoins d'adaptation	Les circonstances dans lesquelles les risques anticipés ou les impacts du changement climatique nécessitent des mesures visant à assurer la sécurité des populations et la sûreté des biens et des ressources, y compris les écosystèmes et leurs services.
Capacité d'adaptation	La capacité des systèmes, des institutions, des humains et d'autres organismes à s'adapter aux dommages potentiels, à tirer parti des opportunités ou à réagir aux conséquences.
Catastrophe	Altération du fonctionnement normal d'une communauté ou d'une société en raison d'événements physiques dangereux interagissant avec des conditions sociales vulnérables, entraînant des effets humains, matériels, économiques ou environnementaux néfastes et étendus qui nécessitent des réponses d'urgence immédiates pour satisfaire les besoins humains critiques et qui peuvent nécessiter un soutien externe pour le rétablissement.
Changement climatique	Le changement climatique est un changement de l'état du climat qui peut être identifié (par exemple, en utilisant des tests statistiques) par des changements de la moyenne et/ou de la variabilité de ses propriétés et qui persiste pendant une période prolongée, généralement des décennies ou plus. Le changement climatique peut être dû à des processus internes naturels ou à des forces extérieures tels que les modulations des cycles solaires, les éruptions volcaniques et les changements anthropiques persistants dans la composition de l'atmosphère ou dans l'utilisation des sols.
Criticité routière	La criticité routière fait référence à l'importance d'une route d'accès rurale pour les communautés qu'elle dessert en termes de dépendance de la communauté à une route pour accéder aux marchés, aux biens et aux services.
Danger	La survenue potentielle d'un événement physique ou d'une tendance d'origine naturelle ou humaine pouvant entraîner des pertes de vie, des blessures ou d'autres effets sur la santé ainsi que des dommages et des pertes de biens, d'infrastructures, de moyens de subsistance, de fourniture de services, d'écosystèmes et de ressources environnementales.

Évaluation d'impact	Pratique consistant à identifier et à évaluer, en termes monétaires et/ou non monétaires, les effets du changement [climatique] sur les systèmes naturels et humains.
Évaluation des risques	L'estimation scientifique qualitative et/ou quantitative des risques.
Évaluation de la vulnérabilité	Processus qui tente d'identifier les causes profondes de la vulnérabilité d'un système (à la variabilité et au changement climatique).
Événement	Les définitions de rareté varient, mais un événement météorologique extrême serait normalement aussi rare ou plus rare que le 10e ou le 90e percentile d'une fonction de densité de probabilité estimée à partir des observations. Par définition, les caractéristiques de ce que l'on appelle les conditions météorologiques extrêmes peuvent varier d'un endroit à l'autre dans un sens absolu. Lorsqu'un phénomène météorologique extrême persiste pendant un certain temps, par exemple une saison, il peut être classé comme un événement climatique extrême, surtout s'il produit une moyenne ou un total qui est lui-même extrême (par exemple, une sécheresse ou de fortes précipitations pendant une saison).
Exposition	La présence de personnes, de moyens de subsistance, d'espèces ou d'écosystèmes, de fonctions, de services et de ressources environnementales, d'infrastructures ou de biens économiques, sociaux ou culturels dans des lieux et des environnements susceptibles d'être affectés par des dangers.
Facteurs de stress	Événements et tendances, souvent non liés au climat, qui ont un effet important sur le système exposé et qui peuvent accroître la vulnérabilité aux risques liés au climat.
Gestion des risques	Plans, actions ou politiques visant à réduire la probabilité et/ou les conséquences des risques ou à réagir aux conséquences.
Gestion du changement	Terme collectif désignant toutes les approches visant à préparer et à soutenir les individus, les équipes et les organisations dans la réalisation de changements organisationnels ou institutionnels afin de leur donner les moyens de relever et de résoudre les défis nouveaux ou récurrents qui les touchent, eux et leurs parties prenantes (par exemple, les effets de la variabilité et du changement climatiques sur leurs activités).
Impacts (Conséquences, résultats)	Les conséquences des risques réalisés sur les systèmes naturels et humains où les risques résultent des interactions entre les dangers, l'exposition et la vulnérabilité liés au climat (y compris les phénomènes météorologiques et climatiques extrêmes). Les impacts font généralement référence aux effets sur les vies, les moyens de subsistance, la santé et le bien-être, les écosystèmes et les espèces, les actifs économiques, sociaux et culturels, les services (y compris les services d'écosystème) et les infrastructures. Les impacts peuvent être appelés conséquences ou résultats, et peuvent être négatifs ou bénéfiques.

Inondation	Débordement des limites normales d'un cours d'eau ou d'une autre masse d'eau, ou accumulation d'eau sur des zones qui ne sont pas normalement submergées. Les inondations comprennent les crues des rivières (fluviales), les crues éclair, les inondations urbaines, les inondations pluviales, les inondations des égouts, les inondations côtières, les inondations des eaux souterraines et les inondations par débordement des lacs glaciaires.
Météo extrême	Un événement météorologique extrême est un événement rare dans un endroit particulier et à un moment particulier de l'année.
Mobilité	La capacité de déplacer des personnes et des biens de manière efficace et efficiente pour des activités socio-économiques entre un point d'origine et une destination en utilisant un réseau de transport.
Options d'adaptation	L'ensemble des stratégies et mesures disponibles et appropriées pour aborder/traiter l'adaptation. Elles comprennent un large éventail d'actions qui peuvent être classées comme structurelles, institutionnelles, écologiques ou comportementales, parmi beaucoup d'autres.
Probabilité	La probabilité qu'un résultat spécifique se produise, lorsque cela peut être estimé de manière probabiliste.
Reconstruire en mieux	Une approche de la reprise des activités post-catastrophes qui réduit la vulnérabilité aux catastrophes futures et renforce la résilience des communautés pour faire face aux vulnérabilités et chocs physiques, sociaux, environnementaux et économiques.
Renforcement des capacités	La capacité à renforcer les atouts et les attributs d'une communauté, d'une société ou d'une organisation, ainsi que les ressources dont elle dispose, en réponse au changement.
Résilience	Capacité des systèmes sociaux, économiques et environnementaux à faire face à un événement, une tendance ou une perturbation dangereuse, en réagissant ou en se réorganisant de manière à conserver leur fonction, leur identité et leur structure essentielles, tout en maintenant la capacité d'adaptation, d'apprentissage et de transformation.
Risque	Possibilité de conséquences négatives lorsqu'une chose de valeur est en jeu et que l'occurrence et le degré d'un résultat sont incertains. Dans le contexte de l'évaluation des impacts climatiques, le terme de risque est souvent utilisé pour désigner les conséquences négatives potentielles d'un aléa climatique, ou des réponses d'adaptation ou d'atténuation à un tel aléa, sur les vies, les moyens de subsistance, la santé et le bien-être, les écosystèmes et les espèces, les biens économiques, sociaux et culturels, les services (y compris les services d'écosystème) et les infrastructures. Le risque résulte de l'interaction entre la vulnérabilité (du système affecté), son exposition dans le temps (au danger), ainsi que le danger (lié au climat) et la probabilité de son apparition.

Sensibilité du système	Le degré auquel un système est affecté, de manière négative ou bénéfique, par la variabilité ou le changement climatique. L'effet peut être direct (par exemple, en réponse à un changement de la moyenne, de la gamme ou de la variabilité des températures) ou indirect (par exemple, les dommages causés par une augmentation de la fréquence des inondations côtières due à l'élévation du niveau de la mer).
Systèmes d'alerte précoce	Ensemble des capacités techniques, financières et institutionnelles nécessaires pour générer et diffuser des informations d'alerte opportunes et significatives afin de permettre aux personnes, aux communautés et aux organisations menacées par un danger de se préparer à agir rapidement et de manière appropriée pour réduire la possibilité de dommages ou de pertes. Selon le contexte, les systèmes d'alerte précoce peuvent s'appuyer sur des connaissances scientifiques et/ou indigènes.
Variabilité climatique	La variabilité climatique désigne les variations de l'état moyen et d'autres statistiques (telles que les écarts types, l'apparition d'extrêmes, etc.) du climat à toutes les échelles spatiales et temporelles au-delà de celles des événements météorologiques individuels. La variabilité peut être due à des processus internes naturels au sein du système climatique tels que le couplage océan-atmosphère (variabilité interne), ou à des variations du forçage externe naturel ou anthropique telles que les variations de la production solaire ou les changements de concentrations de gaz à effet de serre (variabilité externe).
Verouillage	Le concept de « verouillage » en matière de changement climatique : les décisions prises aujourd'hui concernant l'emplacement, la conception et le fonctionnement des actifs détermineront leur résistance à long terme aux effets du changement climatique.
Vulnérabilité	La propension ou la prédisposition à être affecté négativement. La vulnérabilité englobe une variété de concepts et d'éléments, notamment la sensibilité ou la susceptibilité au danger et le manque de capacité à faire face et à s'adapter.

Acronymes, unités et monnaies

\$	Dollar américain
°C	Degrés Celsius
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ADB	Banque asiatique de développement
AfCAP	Africa Community Access Partnership
BAD	Banque africaine de développement
AsCAP	Asia Community Access Partnership
ASS	Afrique subsaharienne
ASTM	Société américaine d'essais et de matériaux
BMS	Système de gestion des ponts
BPC	Centre de Politique Bipartisane
BS	Normes Britanniques
CBR	Ratio de portance de la Californie
CCNUCC	Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques
CEC	Capacité d'échange de cations
CPT	Essai de pénétration des cônes
CSIR	Council for Scientific and Industrial Research, South Africa
DFID	Department for International Development, UK
EIE	Évaluation des Incidences sur l'Environnement
ESP	Pourcentage de sodium échangeable
IP	Indice de plasticité
GFDRR	Global Facility for Disaster Reduction and Recovery
GIEC	Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat
GIS	Système d'information géographique
LVR	Route à faible volume de trafic
MESA	Million d'essieux standard équivalents cumulés
NCHRP	National Cooperative Highway Research Program
OCDE	Organisation de coopération et de développement économiques
PG	Classe de Performance des liants bitumineux

PIB	Produit intérieur brut
PMS	Systèmes de gestion des chaussées
RAMS	Système de gestion du patrimoine routier
ReCAP	Research for Community Access Partnership
SADC	Communauté de développement de l'Afrique australe
SAR	taux d'absorption du sodium
SATCC	Southern African Transport and Communication Commission
SGP	Système de Gestion des Pentes
SPT	Essai de pénétration standard
TEO	Teneur en Eau Optimale
TRH	Technical Recommendations for Highways
TRL	Transportation Research Laboratory
UK	United Kingdom (of Great Britain and Northern Ireland)
UKAid	United Kingdom Aid (Department for International Development, UK)

Synthèse

Le développement de l'Afrique dépend fortement d'un réseau routier adéquat et fiable qui puisse également résister aux effets du changement climatique. Pour aider à faire face à la menace significative du changement climatique sur le développement de l'Afrique, le Partenariat pour l'accès communautaire en Afrique (AfCAP), un programme de recherche financé par UK aid, a commandé un projet en avril 2016 pour produire des orientations régionales sur l'adaptation des routes d'accès rurales au changement climatique. Le projet vise à fournir aux institutions du secteur routier des procédures d'adaptation et des conseils pragmatiques et rentables en matière d'ingénierie et de non-ingénierie, grâce à la recherche et au partage des connaissances au sein et entre les pays africains participants.

L'étude porte sur les menaces climatiques et l'adaptation des infrastructures existantes et nouvelles. Elle aborde les questions des méthodologies appropriées et économiques pour l'évaluation de la vulnérabilité et des risques, de la hiérarchisation des interventions d'adaptation et de l'optimisation de la résilience des actifs dans le contexte des routes d'accès rurales à faible trafic. En outre, il fournit des preuves des liens entre les coûts, les avantages économiques et sociaux pour les communautés rurales découlant d'un accès rural plus résilient afin de soutenir l'adoption de politiques plus larges à travers l'Afrique.

L'étude se concentre sur les points suivants :

- a) Démonstration de procédures d'adaptation techniques et non techniques appropriées
- b) Renforcement durable de la capacité de trois pays partenaires de l'AfCAP¹ (à savoir l'Éthiopie, le Ghana et le Mozambique) à faire face aux effets probables du changement climatique sur les réseaux routiers ruraux - ces trois pays représentent la quasi-totalité des systèmes climatiques des sous-régions de l'Afrique saharienne
- c) Renforcement durable de la capacité d'autres pays partenaires de l'AfCAP
- d) L'adoption et l'intégration des résultats de la recherche dans les pays partenaires de l'AfCAP.

Le Manuel sur l'adaptation au climat² fournit une méthodologie pour réaliser une évaluation de l'adaptation au climat pour l'accès rural afin de soutenir la durabilité socio-économique. Il se concentre également sur les activités et les actions que les normes et procédures d'ingénierie conventionnelles ne couvrent pas nécessairement. Le Manuel est étayé par trois documents d'orientation distincts qui couvrent les points suivants :

- Gestion du changement
- Évaluation des risques et de la vulnérabilité climatiques
- Adaptation de l'ingénierie

Cette ligne directrice sur l'adaptation de l'ingénierie examine les effets attendus des différents attributs du changement climatique sur les routes d'accès à faible volume et met en évidence les solutions d'adaptation possibles. Le processus à suivre pour que le plus grand nombre possible de routes deviennent plus résistantes au climat et puissent conserver leur praticabilité après des

¹ Les pays partenaires de l'AfCAP sont actuellement la République démocratique du Congo, l'Éthiopie, le Ghana, le Kenya, le Liberia, le Malawi, le Mozambique, la Sierra Leone, le Soudan du Sud, la Tanzanie, l'Ouganda et la Zambie.

² Head, M., Verhaeghe, B., Paige-Green, P., Le Roux, A., Makhanya, S., Arnold, K. (2019). Climate Adaptation : Risk Gestion et optimisation de la résilience pour les accès routiers vulnérables en Afrique : Manuel sur l'adaptation au climat, GEN2014C. Londres : ReCAP pour le DFID.

événements climatiques périodiques et extrêmes ou en raison de l'évolution progressive des conditions climatiques est examiné plus en détail dans le *Manuel sur l'adaptation au climat*.

Ce guide s'adresse aux décideurs, aux ingénieurs concepteurs, aux prestataires de services de construction/entretien du secteur public et privé, et plus particulièrement aux autorités routières opérant au niveau national, provincial/étatique et des districts. Étant donné que cette directive traite de l'impact de l'environnement sur les réseaux routiers ruraux, d'autres entités actives dans les domaines de la climatologie, de l'environnement, de la sylviculture, de l'hydrologie, de la météorologie, de la planification et des établissements ruraux, entre autres, peuvent également être intéressées par cette directive.

Les principaux attributs climatiques et leurs effets potentiels sont tout d'abord présentés, puis des mesures d'adaptation sont proposées. Ces mesures d'adaptation suggérées sont examinées séparément pour chaque élément d'infrastructure. L'importance cruciale d'un drainage efficace est mise en évidence et l'importance cruciale d'un entretien approprié et en temps voulu, notamment pour empêcher l'eau d'affecter la structure de la chaussée, est soulignée.

La présente ligne directrice comprend un large éventail de mesures d'adaptation, dont certaines seront plus appropriées à certains projets et d'autres moins. Il appartient au praticien de décider lesquelles sont appropriées ou quelles combinaisons de celles-ci sont les plus appropriées pour chaque projet individuel, et de les concilier avec le financement disponible. De nombreux concepts de contre-mesures d'adaptation peuvent être conçus et construits de différentes manières et devront être mis en œuvre de manière unique.

Il convient de noter que la présente ligne directrice ne traite que des adaptations génériques, et que chaque situation doit être évaluée individuellement et les techniques d'adaptation les plus appropriées doivent être employées. Celles-ci sont normalement basées sur les principes conventionnels de bonne ingénierie et doivent être évaluées individuellement, de manière ouverte et avec une réflexion latérale importante. Des solutions innovantes pour des options spécifiques peuvent souvent être nécessaires, en particulier celles qui permettront d'améliorer les performances opérationnelles, la sécurité des chauffeurs et les infrastructures liées aux routes rurales à faible trafic.

1 Généralités et contexte

1.1 Contexte du projet

1.1.1 Buts et objectifs

L'objectif général du projet est de progresser à partir des recherches précédentes de l'AfCAP et d'**améliorer durablement la capacité des pays partenaires de l'AfCAP** à réduire les impacts climatiques actuels et futurs sur les infrastructures rurales vulnérables. L'étude couvre les menaces et l'adaptation pour les infrastructures existantes et nouvelles. Pour ce faire, il est prévu de mener des recherches et d'adopter et d'intégrer, tant au niveau politique que pratique, des procédures d'ingénierie et de non-ingénierie pragmatiques et rentables, basées sur la reconnaissance des menaces climatiques actuelles et futures spécifiques au niveau local.

L'**objectif fondamental de la recherche** est d'identifier, de caractériser et de démontrer les procédures d'adaptation appropriées, techniques et non techniques, qui peuvent être mises en œuvre pour renforcer la résilience à long terme de l'accès rural sur la base d'une séquence logique définissant :

- Menaces climatiques
- Impacts sur le climat
- Vulnérabilité à l'impact (risque)
- Adaptations non techniques (appelées "options de gestion des changements" dans la présente ligne directrice)
- Adaptations techniques
- Priorités

Le deuxième objectif, qui se concentre sur le **renforcement des capacités et l'échange de connaissances**, est de s'engager de manière significative avec les ministères, départements et agences/autorités des routes et des transports concernés dans un programme de diffusion des connaissances et de renforcement des capacités basé sur les résultats de la recherche.

Le troisième objectif est de veiller à ce que l'accent soit mis sur l'**adoption et l'intégration ultérieure** des résultats à différents niveaux, depuis l'information des politiques nationales jusqu'à l'orientation pratique de l'adaptation au niveau des routes rurales, en passant par la planification régionale et du district.

1.1.2 Portée de l'action

Le programme régional d'adaptation au climat vise à améliorer durablement la capacité des pays partenaires de l'AfCAP à réduire les impacts climatiques actuels et futurs sur les infrastructures routières rurales vulnérables. Cet objectif est atteint grâce à la recherche et à l'adoption et à l'intégration conséquente, tant au niveau politique que pratique, de procédures d'ingénierie et de non-ingénierie pragmatiques et rentables, fondées sur la reconnaissance des menaces climatiques actuelles et futures spécifiques au niveau local.

Conformément à l'analyse de rentabilisation de la recherche du DFID pour RECAP (DFID, 2014), les trois lignes directrices visent à intégrer le changement climatique et les défis qui y sont associés dans les phases de planification, de conception, de construction et d'entretien des routes rurales. L'impact que le changement climatique, la variabilité climatique et les événements extrêmes (tels que les inondations et les sécheresses) peuvent avoir sur l'accessibilité des zones rurales est susceptible d'influencer les choix de conception et les décisions de planification associées pour les routes rurales.

La ligne directrice qui suit s'appuie sur ce principe et soutient la production de preuves scientifiques pour les décideurs en matière de planification, de conception et de construction des routes rurales.

La ligne directrice présentée ici accompagne le *Manuel d'adaptation au climat* et guide l'utilisateur à travers les options d'ingénierie disponibles pour rendre les routes d'accès rurales plus résistantes au climat. Elle vise à soutenir et à informer la prise de décision et l'établissement de priorités lors de l'adaptation des infrastructures routières existantes et nouvelles aux impacts de la variabilité et du changement climatiques.

Cette ligne directrice est soutenue par des enquêtes menées dans les trois pays partenaires de l'AfCAP, à savoir le Ghana, l'Éthiopie et le Mozambique. Celles-ci ont été utilisées pour vérifier et tester les méthodologies proposées au niveau des projets, lorsque cela était possible, afin d'affiner l'approche et de garantir qu'elle sera de nature pratique et applicable.

1.1.3 Aperçu du manuel d'adaptation

Le *Manuel d'adaptation au climat* est le document de référence et fournit des informations pertinentes sur les procédures d'adaptation au climat pour l'accès aux routes rurales, ainsi que des instructions sur une méthodologie appropriée pour faire face aux menaces climatiques et à la vulnérabilité des actifs, afin d'accroître la résilience dans un avenir prévisible. Le manuel a été produit pour fournir des informations pertinentes sur les procédures d'adaptation pour les accès routiers ruraux **nouveaux** et **existants**, ainsi que des instructions sur une méthodologie appropriée pour faire face aux menaces climatiques et à la vulnérabilité des actifs et pour accroître la résilience dans un avenir prévisible. Il a été élaboré pour couvrir un large éventail de circonstances climatiques, géomorphologiques et hydrologiques, sur la base d'une application au Mozambique, au Ghana et à l'Éthiopie, mais également applicable à tout pays subsaharien et au-delà. Bien que le champ d'application du manuel, selon sa conception, soit principalement axé sur les routes à faible trafic, les principes s'appliqueront également aux routes à fort trafic, bien que les priorités et les paramètres de conception soient différents³.

Le Manuel n'illustre que les principes fondamentaux, les processus et les étapes nécessaires à la résilience climatique. Les détails concernant les mesures d'adaptation réelles et les méthodes d'évaluation de la vulnérabilité sont inclus dans les documents d'accompagnement des lignes directrices qui couvrent les points suivants : (1) l'évaluation des risques climatiques et de la vulnérabilité ; (2) la gestion des changements ; (3) les lignes directrices pour l'adaptation technique, et (4) un manuel d'évaluation visuelle (voir *Figure 1*).

³ Se référer à l'AIPCR (2012 & 2015) et au TRB (2008) pour les options d'adaptation pour les routes à fort trafic.



Figure 1. Applications couvertes par le manuel

1.1.4 Le contenu du manuel

La méthodologie comprend cinq étapes, conformément à la partie B du tableau ci-dessous, chaque étape couvrant plusieurs activités comme indiqué. Toutefois, elle sera appliquée avec une rigueur légèrement différente en fonction de l'ampleur, de l'application et des circonstances de son application. Les directives politiques et stratégiques peuvent être en place ou non. Des systèmes appropriés de soutien à la gestion des données peuvent être en place ou non et le niveau de disponibilité des ressources et des compétences pour mettre en œuvre les options d'adaptation variera considérablement.

En raison de ce large éventail de circonstances, le Manuel est divisé en deux parties ; la **partie A** couvre le *processus d'analyse et de gestion de la situation* et la **partie B** couvre *la méthodologie* appropriée. Le champ d'application de cette ligne directrice est colorié en vert.

Contenu et portée de la méthodologie d'adaptation

Partie A	Examen de la situation et gestion de l'adaptation
Couvertures :	Identification du problème (y compris les preuves) Identification des causes probables Moteurs du changement (à l'initiative des politiques) Gestion du changement Approche et mise en œuvre Gestion efficace des données
Partie B	Méthodologie
Etape 1	<i>Examen des risques climatiques (national/régional)</i>
B.1.1	Détermination des besoins
B.1.2	Identification et mobilisation de la participation des parties prenantes/partenaires
B.1.3	Définition de la politique, des objectifs et du champ d'application (niveau du réseau)
B.1.4	Analyse des effets climatiques observés et prévus
B.1.5	Collecte de données et analyse des risques
Etape 2	<i>Évaluation de l'impact et de la vulnérabilité (projet/niveau local)</i>
B.2.1	Examen des risques climatiques au niveau des projets
B.2.2	Évaluations des incidences sensibles au climat
B.2.3	Collecte de données et évaluation de la vulnérabilité
Etape 3	<i>Évaluation technique et économique des options</i>
B.3.1	Identification des stratégies et des mesures d'adaptation potentielles
B.3.2	Analyse d'impact de "faire quelque chose" et "ne rien faire"
B.3.3	Consultations des parties prenantes
B.3.4	Priorisation et sélection des mesures d'adaptation
Etape 4	<i>Conception et mise en œuvre des projets</i>
B.4.1	L'élaboration d'un plan de mise en œuvre (comprenant scénario "Budget insuffisant")
B.4.2	Paramètres de conception et optimisation
B.4.3	Supervision et documentation de la construction
Etape 5	<i>Suivi et évaluation</i>
B.5.1	Élaboration d'un plan de suivi et d'évaluation
B.5.2	Rapports et partage des expériences de mise en œuvre

1.2 Contexte

1.2.1 Vulnérabilité climatique

La Banque africaine de développement (BAD) affirme que l'Afrique est l'une des régions les plus vulnérables du monde aux impacts du changement climatique. La plupart des études suggèrent que les dommages causés par le changement climatique, par rapport à la population et au produit intérieur brut (PIB), pourraient être plus élevés en Afrique que dans n'importe quelle autre région du monde (BAD 2011). Ces études suggèrent également que les coûts d'adaptation en Afrique pourraient s'élever à 20 à 30 milliards de dollars par an au cours des 10 à 20 prochaines années. Il existe un besoin urgent de mobiliser des ressources pour faire face aux limites actuelles du continent pour faire face aux événements climatiques, ainsi que des ressources pour faire face au changement climatique futur. Au-delà, une série d'investissements d'adaptation plus ciblés sont nécessaires et il est crucial que les décideurs africains tiennent compte du changement climatique dans toutes les décisions stratégiques à long terme.

Au cours des quatre dernières décennies (1975 à 2015), les pays africains ont connu plus de 1400 catastrophes météorologiques enregistrées (météorologiques, hydrologiques et climatologiques). Ces catastrophes ont eu des répercussions importantes sur les économies des pays et sur les communautés rurales et leurs moyens de subsistance. La grande vulnérabilité sociale et la faible capacité d'adaptation de ces communautés ainsi que leur forte exposition aux risques naturels ont entraîné la mort de plus de 600 000 personnes (dont 95 % à cause des sécheresses), laissé 7,8 millions de personnes sans abri (dont 99 % à cause des inondations et des tempêtes) et touché environ 460 millions de personnes (CRED, 2016).

Dans de nombreux pays africains, les fonds limités ou inexistants pour l'adaptation et l'atténuation mettent ces pays au défi d'identifier les menaces posées par le changement climatique, de développer des approches d'adaptation aux changements prévus, d'intégrer les changements dans les plans de développement à moyen et long terme, et d'assurer le financement des adaptations proposées et nécessaires. Les études existantes ont tenté de quantifier l'impact du changement climatique sur les actifs d'infrastructure qui pourraient être affectés par le changement climatique au cours des prochaines décennies (Hughes et al, 2010 ; Chinowsky et al, 2011 ; Chinowsky et al, 2013).

1.2.2 Accès rural

L'Afrique subsaharienne (ASS) a l'une des plus faibles densités de routes rurales au monde, ce qui étouffe considérablement son potentiel de croissance et de développement agricole. En outre, moins de 40 % des Africains ruraux vivent à moins de deux kilomètres d'une route praticable par tous les temps, ce qui rend les interventions sociales, médicales et éducatives nécessaires, coûteuses et peu fiables. Une grande partie du réseau routier contribuant au développement agricole et social dans ces zones rurales peut être classée comme étant de faible volume.

Les réseaux routiers ruraux à faible volume dans ces pays vont de simples pistes et routes de terre non aménagées à des routes revêtues de qualité raisonnable, construites selon des normes "conventionnelles". Quelle que soit leur qualité, ces routes sont souvent rendues impraticables en raison de phénomènes météorologiques extrêmes périodiques, aggravés par des interventions d'entretien minimales ou seulement intermittentes. Ces routes sont associées à des structures de franchissement de cours d'eau, allant de saignées transversales à des ponceaux de différentes tailles et à des ponts plus grands. Les vitesses élevées de l'eau endommagent souvent ces structures, rendant les liaisons routières impraticables pendant de longues périodes. Les inondations ont des

conséquences similaires. Alors que les chaussées peuvent généralement être remises en état rapidement pour rétablir la praticabilité des routes après des événements extrêmes, les fermetures de routes causées par les inondations peuvent prendre de plusieurs heures à plusieurs semaines avant que les niveaux d'eau ne baissent et que l'accessibilité ne soit rétablie. Cependant, les dommages graves causés aux structures de franchissement des cours d'eau par des vitesses d'eau destructrices peuvent prendre plusieurs semaines, voire plusieurs mois, pour être rétablis, selon la capacité de réaction d'urgence et la capacité d'adaptation de l'autorité routière. L'augmentation prévue du nombre et de l'intensité des événements extrêmes dans de nombreux pays pourrait contribuer à ce que des problèmes encore plus graves que ceux que l'on connaît actuellement soient rencontrés à l'avenir.

La majeure partie du réseau de routes rurales à faible trafic en Afrique est utilisée pour l'accessibilité et non pour la mobilité, comme le montre la figure 2 :

- L'accessibilité fait référence à la facilité pour les groupes de population d'atteindre ou de participer à des activités de service en utilisant un réseau de transport, et
- La mobilité désigne la capacité à déplacer des personnes et des biens de manière efficace et efficiente pour des activités socio-économiques entre un point d'origine et une destination en utilisant un réseau de transport.

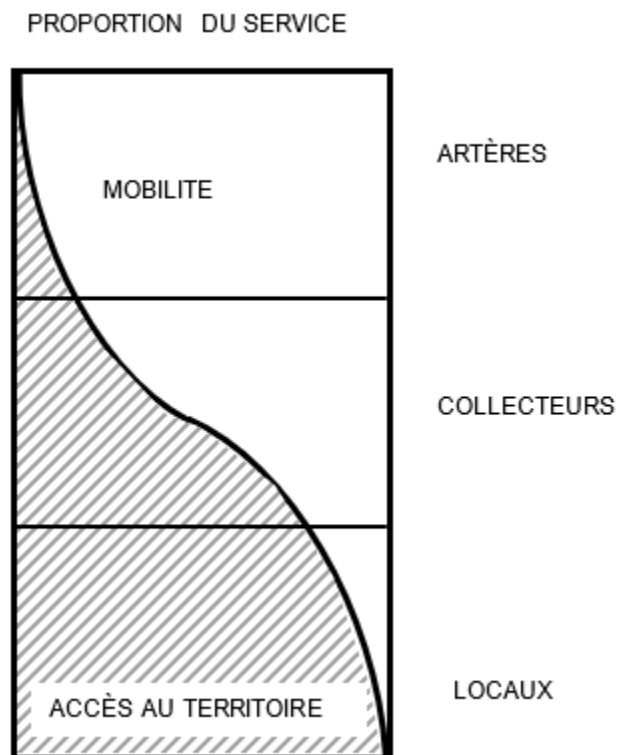


Figure 2 Utilisation de différents types de routes en termes d'accessibilité et de mobilité AASHO, 1964)

Il a été démontré en Afrique australe que pour les réseaux routiers à faible volume (< 1 million d'essieux standard équivalents cumulés (MESA) sur leur durée de vie), l'environnement (principalement le climat) joue un rôle beaucoup plus important que le trafic pour contribuer à la détérioration (figure 3 ; SATCC, 2003).

Toutefois, il convient de noter que, plutôt que les effets cumulatifs des essieux standard équivalents, un ou deux véhicules lourds et surchargés circulant sur une route à faible volume qui est inondée ou dont les couches supérieures sont très humides peuvent provoquer une détérioration et une défaillance, qui se manifeste par une rupture par cisaillement et non par l'orniérage traditionnel de la couche inférieure, fréquemment utilisé pour décrire la défaillance.

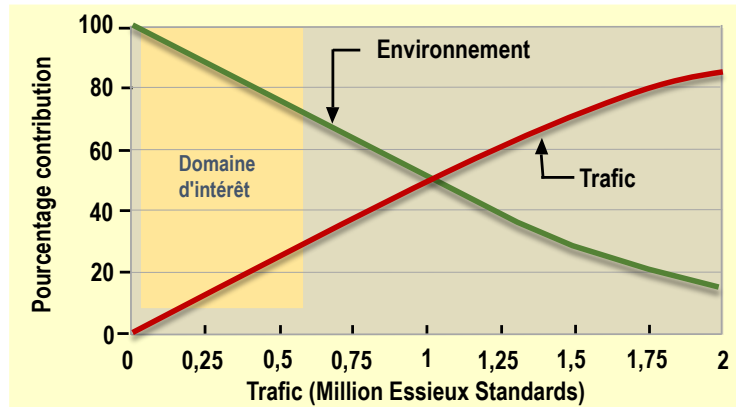


Figure 3 Relation entre la détérioration des routes et l'environnement et le trafic (SATCC, 2003)

Avec les changements attendus des conditions climatiques sur la plus grande partie de l'Afrique (le Roux et al, 2016) résultant du changement climatique mondial (fréquence accrue des événements extrêmes, ainsi que les changements attendus des précipitations et des températures), on peut donc s'attendre à ce que la détérioration continue et périodique des réseaux routiers ruraux à faible trafic existant en ASS se poursuive de manière plus fréquente et croissante probablement plus que pour les routes conventionnelles à plus fort trafic. Les cas d'impraticabilité pendant que les routes et les structures attendent d'être réparées pourraient augmenter, et les communautés et les économies locales devraient être affectées en conséquence. Une situation similaire existe en ce qui concerne les structures géotechniques telles que les coupes et les remblais qui peuvent rendre les routes impraticables pendant de longues périodes à la suite d'importantes défaillances.

Il est donc urgent de prendre des mesures pour rendre les routes rurales, y compris les structures de drainage, les ponts et les structures géotechniques, plus résistantes aux phénomènes météorologiques extrêmes et pour assurer, dans la mesure du possible, la praticabilité par tous les temps des liaisons routières essentielles. Dans ce contexte, la résilience est définie comme la capacité à anticiper, à se préparer, à réagir et à se remettre des impacts ou des conséquences d'un danger important ou de menaces multirisques avec un minimum de dommages pour le bien-être social, l'économie et l'environnement.

Il est peu probable que tous ces événements puissent être évités sans que cela n'entraîne des coûts importants. Toutefois, les nouveaux projets routiers, y compris les structures de drainage et les ponts, ainsi que les projets de réhabilitation et de modernisation, devraient idéalement être planifiés et conçus (dans des limites raisonnables) de manière à intégrer une plus grande résistance au climat afin de réduire au minimum le risque de fermeture de routes et de réhabilitation coûteuse des dommages.

La figure 4 montre les relations entre les différentes étapes de développement de l'infrastructure et les sources et allocations de financement typiques. À l'exception des routes nouvellement construites, le financement est le plus grand défi en matière d'adaptation à la résilience climatique. Les nouvelles

constructions doivent être conçues de manière à intégrer les meilleures mesures d'adaptation ou des combinaisons de celles-ci, qui devraient de toute façon faire partie d'une bonne conception technique et qui sont susceptibles d'entraîner une augmentation nominale des coûts de construction dans la plupart des cas. Les domaines identifiés en rouge ci-dessous attirent généralement un financement insuffisant et les adaptations devront être implantées en fonction du financement disponible sur une base prioritaire, probablement sur une base réactive et sur une période prolongée.

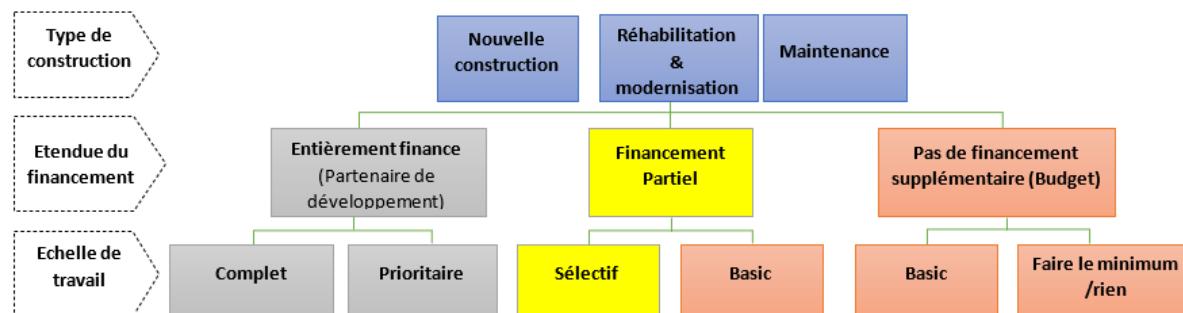


Figure 4 Approche stratégique basée sur le type d'activité et l'adéquation du financement disponible

Tous les nouveaux projets de développement routier nécessitent actuellement une évaluation des incidences sur l'environnement (EIE) afin d'évaluer l'impact de la route proposée sur l'environnement actuel (de référence) et prévu.

Ces évaluations vont d'un niveau relativement rudimentaire à des exercices très sophistiqués, longs et coûteux. Cependant, il devient de plus en plus important que l'inverse, c'est-à-dire l'effet de l'environnement actuel et attendu sur les routes proposées (et existantes), soit évalué de la même manière.

Bien que les deux processus aient des buts et des objectifs différents, lors des ateliers des parties prenantes sur l'EIE, des informations importantes concernant les effets de l'environnement sur les routes existantes dans la région pourraient être recueillies auprès des parties prenantes.

Plusieurs impacts climatiques sont exacerbés par d'autres facteurs. La surcharge des véhicules, par exemple, entraîne une détérioration rapide de la structure de la chaussée, mais lorsqu'elle est associée à une teneur en humidité plus élevée de la chaussée ou à des températures plus élevées de l'asphalte, l'influence délétère peut être augmentée de manière exponentielle.

De même, le mauvais entretien des canalisations affecte la teneur en humidité de la route. Avec une éventuelle augmentation des précipitations futures, cet effet est susceptible d'être amplifié.

Cette **ligne directrice** met en évidence les impacts des différents facteurs de stress climatique sur les réseaux routiers et suggère une série de mesures d'adaptation technique qui peuvent être mises en œuvre pour surmonter les problèmes.

Ces mesures peuvent être mises en œuvre lors des phases de conception de nouvelles routes ou être installées dans des infrastructures existantes en réponse aux problèmes potentiels découlant des changements climatiques potentiels et des budgets disponibles.

"Il est également reconnu que l'adaptation au changement climatique est un sujet difficile et complexe et que la compréhension et la quantification des risques et des opportunités peuvent être rendues difficiles par les incertitudes qui entourent le changement climatique" (AIPCR, 2015).

La plupart des recommandations formulées dans cette ligne directrice sont fondées sur l'adoption de connaissances et de principes d'ingénierie solides qui préconisent que "si le problème est connu, une solution appropriée sera disponible".

2 Effets du changement climatique

2.1 Généralités

Le changement climatique, selon le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC, 2007) et pertinent pour cette étude, désigne une modification de l'état du climat. Cette modification de l'état peut être identifiée (par exemple à l'aide de tests statistiques) par des changements de la moyenne et/ou de la variabilité de ses propriétés, et qui persiste pendant une longue période, généralement des décennies ou plus. Il s'agit de toute modification du climat au fil du temps, qu'elle soit due à la variabilité naturelle ou à l'activité humaine. Cet usage diffère de celui de la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques (CCNUCC), où le changement climatique désigne un changement de climat qui est attribué directement ou indirectement à l'activité humaine qui modifie la composition de l'atmosphère mondiale et qui s'ajoute à la variabilité naturelle du climat observée au cours de périodes comparables. Les effets du changement climatique mettent en péril de grandes parties de l'infrastructure routière mondiale et doivent donc être pris en compte tant dans les scénarios d'exploitation routière actuels que dans les décisions relatives aux futurs investissements dans l'infrastructure routière⁴.

Plusieurs changements climatiques sont prévus, mais ils ne sont pas uniformes pour tous les pays et leur degré et leur ampleur varieront d'un endroit géographique à l'autre. Les adaptations examinées dans la présente ligne directrice sont toutefois génériques et seront applicables aux pays touchés par des changements similaires des facteurs de stress climatiques.

Les principaux changements climatiques suivants sont susceptibles de se produire à des degrés divers dans la plupart des régions d'Afrique subsaharienne (Le Roux et al., 2016 ; Dosio, 2017 ; Dosio et al., 2019 ; Weber et al., 2018) :

- Augmentation des températures (moyenne, maximum et nombre de jours extrêmement chauds (> 35°C) par an)
- Diminution des précipitations et allongement des périodes de sécheresse
- Augmentation des phénomènes météorologiques extrêmes - tempêtes violentes, fortes précipitations, vagues de chaleur, etc.
- Élévation du niveau de la mer
- Migration vers le nord de la ceinture de cyclones tropicaux
- Augmentation de la vitesse du vent.

Ceux-ci pourraient s'accompagner d'effets secondaires connexes :

- Des saisons de culture plus longues/plus courtes et des changements possibles dans les types de cultures, ce qui pourrait avoir un impact sur les conditions de chargement du trafic entre les exploitations agricoles et le marché
- Augmentation/réduction de l'humidité générale du sol
- Fluctuations plus importantes du niveau des eaux souterraines
- Changements dans la densité, le type et le taux de croissance de la végétation, ce qui affecte les distances de visibilité dans les virages et la stabilité des pentes
- Inondations
- Modification de la fréquence des ondes de tempête extrêmes
- Changements dans l'équilibre écologique

⁴ Pour une revue du sujet, voir : Mattsson et Jenelius (2015).

- Les changements dans la saison de construction optimale (éventuellement le moment et la durée) et les conditions en raison des contraintes de précipitation et de température, affectant la disponibilité des ressources pour la construction et l'entretien des routes, tout en affectant également la fenêtre de la sécurité du travail et la productivité de la main-d'œuvre extérieure.

Outre ces changements climatiques et leurs effets secondaires, il convient de prendre en considération les répercussions, par exemple, d'inondations plus graves, de risques accrus d'incendie, de la montée du niveau des mers et de la baisse du niveau des nappes phréatiques sur les infrastructures routières. D'autres influences connexes, telles que les pénuries d'eau dans des environnements à température élevée en raison d'une évaporation plus importante, pourraient également avoir un impact indirect sur la fourniture d'infrastructures (par exemple, la disponibilité de l'eau pour le compactage des couches).

Il est prévu que les changements d'autres paramètres climatiques (par exemple, l'humidité relative, la pression barométrique, la présence de brouillard, le rayonnement ultraviolet, etc.) n'auraient qu'un impact minimal sur les aspects techniques de l'infrastructure routière à faible volume ou seraient intégrés dans les effets susmentionnés.

Il a également été postulé (McGuire, 2010) que l'incidence de l'activité sismique pourrait être accrue par le réchauffement climatique, avec une augmentation concomitante des séismes et des tsunamis destructeurs. Bien que ces séismes soient susceptibles de se produire plus fréquemment sur d'autres continents en raison du déchargement des masses terrestres dû à la fonte des glaces, les effets du tsunami qui en résulterait pourraient toucher les franges du continent africain. Les incidences réelles des tremblements de terre sur les infrastructures routières ne sont pas abordées dans la présente ligne directrice, si ce n'est pour noter que les cas de dommages aux ponts et de glissements de terrain sont susceptibles d'augmenter s'il y a davantage de tremblements de terre.

Les effets dominants de chacune des variables climatiques sur les routes rurales sont résumés ci-dessous, avant que les détails des mesures d'adaptation possibles ne soient fournis dans le reste de la ligne directrice. Les mesures d'adaptation ne sont pas spécifiques à chaque pays, car elles sont principalement liées aux différents événements et non pas spécifiquement aux conditions locales.

2.2 Changements de température

Une augmentation générale de la température avec le temps est attendue sur la majeure partie de l'ASS. Pour la plupart des structures de chaussée, cela aurait une influence minimale, mais des effets secondaires tels que l'assèchement des sous-niveaux et des sols environnants, ainsi qu'une augmentation des risques d'incendie sont probables. Les impacts sur le bitume seront probablement plus importants et seront principalement liés à un ramollissement supplémentaire du bitume pendant l'augmentation prévue des journées extrêmement chaudes. De telles augmentations de température auraient également des répercussions importantes sur les structures en béton et en acier, où la dilatation différentielle et les gradients de température élevés au sein des poutres et des éléments pourraient entraîner une déformation, voire une défaillance structurelle.

Il n'est pas prévu que les températures diminuent de manière significative sur la majeure partie de l'Afrique subsaharienne. Il est donc peu probable qu'il y ait un abaissement de l'élévation de la ligne de neige, une augmentation significative des occurrences de gel, ou une augmentation du gel de l'eau dans les chaussées et les terrassements. Dans l'ensemble, on s'attend à une diminution de l'incidence des jours de gel.

Parallèlement à l'augmentation générale des températures, le nombre de journées très chaudes (> 35°C) devrait augmenter de manière significative. L'impact sur les routes sera essentiellement le

même que l'augmentation générale de la température et cette question n'est pas traitée séparément dans le présent document.

2.3 Changements dans les précipitations

Il est prévu que les précipitations pourraient diminuer dans la plupart des régions d'Afrique subsaharienne. Cela aurait une influence favorable sur la plupart des routes, où les sols supports et les matériaux de construction auront tendance à fonctionner dans des conditions de pression d'eau interstitielle négative plus élevée (forte aspiration du sol) et donc à avoir une résistance nettement supérieure à la normale. Toutefois, on prévoit également que les précipitations qui se produisent pourraient prendre la forme de tempêtes moins fréquentes mais plus violentes. À condition que le drainage de la chaussée soit tel que l'eau soit rapidement évacuée de la structure de la chaussée, l'augmentation temporaire des précipitations associée à ces événements n'aurait que peu d'effet sur les performances de la route. Il sera toutefois essentiel d'améliorer la conception du drainage et les techniques d'entretien et de les mettre en œuvre régulièrement et probablement plus fréquemment. L'eau devra être éliminée rapidement et complètement des abords de la route.

Il est bien établi que l'excès d'eau est l'une des principales causes de problèmes dans les chaussées et les travaux de terrassement. Outre son effet néfaste sur de nombreux matériaux de revêtement (réduction de la résistance au cisaillement), si la chaussée devient saturée d'eau, des pressions positives importantes d'eau interstitielle se développent sous la charge du trafic, ce qui entraîne une défaillance prématurée des couches de revêtement. Il s'agit à prévu que dans certaines zones, où (i) les précipitations sont susceptibles d'augmenter et/ou les événements extrêmes sont plus probables, et (ii) la conception et les systèmes de drainage environnants de la chaussée et des terrassements ne permettent pas une évacuation efficace/rapide de cette eau, on peut s'attendre à des défaillances plus fréquentes de la chaussée et à une instabilité des terrassements. Il sera également essentiel de mieux contrôler la surcharge des véhicules sur ces routes immédiatement après ces pluies.

2.4 Des événements extrêmes plus fréquents

Il est prévu que même si les précipitations peuvent diminuer dans de nombreuses régions, les précipitations qui tombent seront probablement associées à des événements moins nombreux mais plus intenses. Cela augmenterait la sédimentation et l'envasement, et pourrait entraîner une augmentation des cas d'instabilité des pentes. Toutefois, si les risques d'inondation, de débit rapide des cours d'eau, d'érosion et d'affouillement du lit des cours d'eau et des structures sont importants et que ces événements sont séparés par des intervalles de temps importants permettant l'assèchement des routes (par exemple 4 à 6 semaines entre les événements), les effets sur la stabilité des pentes (caractéristiques antérieures) seront probablement minimales. Les routes et le drainage transversal devront cependant être améliorés pour répondre aux événements individuels avec des volumes d'eau plus importants.

Le principal facteur qui affecte la durée des inondations dans une région est la topographie. Les périodes d'inondation et de crue sont plus longues sur les terrains plats que sur les terrains plus escarpés. Dans les terrains escarpés, la durée est plus courte et la vitesse d'écoulement de l'eau plus élevée (avec érosion et affouillement), alors que dans les terrains plats, l'eau "reste" plus longtemps car elle s'écoule lentement ou s'infiltré dans le substrat. Les débits plus lents permettent également à l'eau provenant d'altitudes voisines plus élevées de s'accumuler plus rapidement avec des niveaux d'inondation plus élevés. Le potentiel d'affouillement et d'érosion est toutefois considérablement réduit après les premiers épisodes d'inondation.

Les événements extrêmes ne sont pas seulement liés aux précipitations prolongées et/ou abondantes décrites ci-dessus, mais comprennent également les vagues de chaleur, la sécheresse et l'activité cyclonique.

2.5 Élévation du niveau de la mer

L'augmentation des températures mondiales aura pour conséquence la réduction de la glace terrestre. La fonte de ces glaciers et des calottes glaciaires augmentera le volume d'eau dans les océans et entraînera une élévation du niveau de la mer. En outre, l'augmentation de la température de l'eau de mer entraînera une expansion de l'eau de mer, ce qui fera monter le niveau de la mer. Il convient de noter que les taux régionaux d'élévation du niveau de la mer varieront autour du littoral africain en fonction des mouvements verticaux locaux des terres, du compactage des sédiments, de l'assèchement des aquifères et de l'empreinte de l'équilibre statique (cf. Kopp et al., 2014 ; Nicholls et al., 2014)

L'impact de l'élévation du niveau de la mer ne se fera évidemment sentir que sur les côtes existantes, mais les conséquences risquent d'être dramatiques, avec des dommages nettement plus importants aux infrastructures de basse altitude et une érosion côtière étendue et un mouvement des sables de plage résultant principalement de l'augmentation des variations de marées, des vagues générées par le vent et des ondes de tempête. Ces dernières présentent un intérêt particulier car elles pourraient avoir des effets dévastateurs sur les infrastructures de transport dans les zones côtières.

L'élévation du niveau de la mer entraînera des inondations côtières plus extrêmes en raison de l'élévation des "niveaux de base", de la salinité accrue des eaux fluviales côtières avec les conséquences que cela implique pour les structures sensibles au sel et de la sédimentation accrue dans les zones de marée.

2.6 Migration de la ceinture de cyclones tropicaux

Il est prévu que la ceinture de cyclones tropicaux qui est actuellement centrée sur le centre du Mozambique, se déplace vers le nord en direction de la frontière tanzanienne (Malherbe et al., 2013). Cela devrait entraîner une augmentation des précipitations et des vents, avec les inondations qui en découlent, dans les zones actuellement non touchées ou peu touchées, dans certaines régions, tandis que cela diminuera dans les zones plus au sud.

2.7 Augmentation de la vitesse du vent

L'augmentation de la vitesse du vent entraîne un assèchement plus rapide de l'environnement routier et des sols (évaporation accrue exacerbée par les températures plus élevées), une perte plus importante et plus rapide de matériaux provenant de sites non protégés (routes non revêtues et terrassements exposés) et un risque accru d'incendies. D'autres problèmes moins importants (mais nécessitant un entretien accru) résulteront également de l'augmentation de la vitesse du vent, tels que le déplacement des sables côtiers et des dunes (Tsoar, 2005), les dommages causés au mobilier routier, les blocages de routes dus aux arbres déracinés et l'augmentation de la charge du vent sur les ponts.

Les effets de chacune de ces variations climatiques sur les éléments ou installations des infrastructures de transport sont résumés dans les Tableaux 1 à 7 ci-dessous. Il convient de noter que, bien que les dangers soient traités séparément dans les Tableaux 1 à 7, la possibilité de multirisques ne doit pas être négligée (cf. Gill et Malamud, 2017).

Tableau 1 Dangers liés à l'augmentation des précipitations

Facilité	Conséquence - Problèmes et dommages éventuels
Routes non revêtues	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Inondations (eaux de surface excessives) ▪ Ramollissement du matériau de revêtement ▪ Impraticabilité plus fréquente sur les matériaux de mauvaise qualité ▪ Augmentation de l'érosion de la surface des routes ▪ Perte de la forme de la route ▪ Bouchage (sédimentation) des drains
Routes revêtues	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Perte de résistance des matériaux des couches, en particulier dans les couches de base supérieures et inférieures ▪ Dommages aux revêtements minces ▪ Dommages aux bords de la chaussée ▪ Blocage des drains et des ponceaux ▪ Érosion des accotements non revêtues
Travaux de terrassement	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Instabilité accrue des pentes ▪ Saturation et fragilisation des sols de remblais ▪ Érosion des surfaces du sol et des drains ▪ L'érosion des berges des routes ▪ Croissance excessive (luxuriante) de la végétation ▪ L'envasement et le bouchage des canalisations
Sols support	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Expansion et fissuration des matériaux volumétriquement instables ▪ Effondrement et tassement des sols effondrés ▪ Ramollissement des matériaux de support des chaussées ▪ Davantage de mouvements et de dépôts de matériaux salins ▪ Déformation des structures rigides ▪ Erosion dans la réserve routière ▪ Probabilité accrue de effondrements dans les zones karstiques
Drainage (eau provenant de la réserve routière)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Accumulation d'eau à proximité de la route ▪ Érosion de la surface de la route, des accotements et des drains latéraux et d'onglet ▪ Ramollissement des matériaux sous la route ▪ Fragilisation des accotements non revêtues ▪ Davantage de défaillances de la trace des roues externes de véhicules en raison de l'augmentation de la teneur en humidité du sol support
Facilité	Conséquence - Problèmes et dommages éventuels
Drainage (eau provenant de la réserve routière extérieure)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Érosion des berges et des culées des ponceaux et des ponts ▪ Envasement / sédimentation des ponceaux et des ponts ▪ Affouillement des fondations d'un pont ▪ Débordement de ponts et dommages ou destruction ▪ Dommages causés aux structures des ponts par les débris dans les eaux de crue

Construction	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Humidité excessive dans les matériaux - retards de construction ▪ Réduction des périodes de travail et augmentation des délais ▪ Dommages causés par l'eau à des travaux partiellement achevés ▪ Nécessité d'augmenter le nombre de batardeaux ou de prendre des mesures de lutte contre les inondations lors du drainage et de la construction de ponts
Entretien	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Frais d'entretien supplémentaires ▪ Des débroussaillages plus fréquents ▪ Réparations supplémentaires nécessaires aux canalisations ▪ Nécessité de maintenir en bon état les surfaces routières non revêtues - entretien plus fréquent ▪ Augmentation et amélioration de l'entretien des accotements non revêtus ▪ Augmentation du ragréage des nids de poule et du colmatage des fissures sur les routes revêtues

La diminution des précipitations se traduira généralement par une amélioration des conditions de soutien des routes (les forces plus sèches mobilisant des succions de sol plus importantes) et une diminution des problèmes de drainage. Toutefois, la réduction des précipitations devrait être associée à des tempêtes moins fréquentes mais plus intenses, qui pourraient entraîner un ruissellement et un écoulement des cours d'eau plus forts et plus érosifs, avec une érosion et un engorgement accru. Il est également probable que les structures routières seront plus rapidement endommagées parce que l'eau ne sera pas évacuée de la surface de la route et des drains latéraux aussi rapidement et efficacement que nécessaire. Les conséquences probables sont résumées dans le Tableau 2.

Tableau 2 Dangers liés à la diminution des précipitations (mais à des événements plus extrêmes)

Facilité	Conséquence - Problèmes et dommages éventuels
Routes non revêtues	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Usure et perte accrues de graviers sur les surfaces plus sèches ▪ Augmentation des émissions de poussières sur de plus longues périodes ▪ Génération plus rapide de matériaux meubles et de rugosités (ondulations) ▪ Augmentation de la fréquence de rechargement en raison de la détérioration de la qualité du gravier causée par la perte de fines cohésives
Routes revêtues	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Dommages aux revêtements minces et à l'asphalte (vieillissement du liant) ▪ Détérioration plus rapide du liant (vieillissement du liant) ▪ Réduction de la teneur en humidité d'équilibre - des chaussées plus résistantes
Travaux de terrassement	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Assèchement et fissuration accrues des sols ▪ Entrée rapide de l'humidité dans les fissures de tension dans les pentes (rupture des pentes par retrait et fissures de tension) ▪ Augmentation de l'érosion due à des tempêtes plus intenses ▪ Dommages causés à la végétation par la multiplication des feux de forêt ▪ Il est plus difficile d'établir une protection contre l'érosion par la bio-ingénierie
Sols support	<ul style="list-style-type: none"> ▪ De plus grandes fluctuations d'humidité dans les sols argileux ▪ Augmentation du séchage des matériaux ▪ Rétrécissement et fissuration (mouvements volumétriques plus importants) ▪ Davantage de précipitations de sels en milieu salin
Drainage (eau provenant de la réserve routière)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Assèchement des canalisations - plus sensible à l'érosion en cas de pluie ▪ Risque accru de brûlure de la végétation en bordure de route et de perte de stabilisation des racines ▪ Moins de végétation pour retenir le sol
Drainage (eau provenant de la réserve routière extérieure)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Plus d'érosion ▪ Plus d'envasement et de sédimentation ▪ Le débordement des ponts et les fermetures de routes plus fréquentes ▪ Des inondations plus graves ▪ Dommages causés aux ponts et aux ponceaux par les débris dans les eaux de crue
Construction	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Une eau insuffisante et plus coûteuse pour la construction ▪ Perte plus rapide de l'eau de compactage par évaporation ▪ Méthodes de construction alternatives et équipements nécessaires
Entretien	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Plus d'entretien des routes et des accotements non revêtus ▪ Plus d'entretien pour réparer les dommages causés aux canalisations ▪ Augmentation des réparations de l'érosion de surface ▪ Un meilleur contrôle de la végétation pour minimiser les risques d'incendie

Une augmentation générale de la température est prévue pour la majeure partie de l'Afrique subsaharienne. Les conséquences potentielles de cette hausse sont résumées dans le Tableau 3.

Tableau 3 Dangers liés à l'augmentation des températures

Facilité	Conséquence - Problèmes et dommages éventuels
Routes non revêtues	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Un assèchement plus rapide de la route ▪ Augmentation de la fissuration des matériaux argileux ▪ Développement accru de la rugosité (ondulation) ▪ Génération plus rapide de poussière et de matières meubles
Routes revêtues	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Vieillissement plus rapide des liants bitumineux ▪ Ramollissement du bitume dans l'asphalte et déformation plus rapide à chaud ▪ Expansion et flambage des routes en béton
Travaux de terrassement	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Un séchage et une fissuration plus rapides ▪ Perte de végétation (ou changement d'espèces) sur les pentes latérales en raison d'un manque d'eau ▪ Davantage d'incendies de forêt entraînant la perte de la liaison des racines ▪ Augmentation de l'érosion due à la perte de végétation
Sols support	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Des effets minimes ▪ Un certain rétrécissement des sols argileux ▪ Augmentation du mouvement des sels dans les matériaux salins en raison d'une évaporation accrue
Drainage (eau provenant de la réserve routière)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Assèchement, fissuration et érosion plus rapides ▪ Perte de végétation (ou changement d'espèces) sur les pentes latérales ▪ Davantage d'incendies de forêt entraînant la perte de la liaison des racines
Drainage (eau provenant de la réserve routière extérieure)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Plus grande expansion/contraction des éléments du pont ▪ Gradients de température plus importants dans les éléments en béton épais ▪ Davantage d'érosion et d'envasement en raison de la sécheresse des sols
Construction	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Réduction de la fenêtre de sécurité au travail et de la productivité de la main-d'œuvre en extérieur ▪ Réactions plus rapides lors de la stabilisation du ciment ▪ Séchage plus rapide du béton ▪ Besoins accrus en eau pour le durcissement du béton et des couches stabilisées
Entretien	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Veiller à ce que la végétation soit coupée afin de réduire les feux de forêt ▪ Entretien régulier des éléments de mouvement du pont (roulements et joints de construction)

On s'attend à ce que les températures augmentent en général, mais il pourrait y avoir des zones localisées où les températures pourraient baisser légèrement. Il est toutefois très peu probable que ces baisses de température entraînent une augmentation du gel de l'eau sur les routes, qui en Afrique subsaharienne est actuellement essentiellement limité à des zones localisées à des altitudes extrêmement élevées. Un résumé des conséquences potentielles est fourni dans le Tableau 4.

Tableau 4 Dangers liés à la baisse des températures

Facilité	Conséquence - Problèmes et dommages éventuels
Routes non revêtues	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Aucun effet, sauf à des altitudes extrêmes - le gel de l'eau à la surface de la route entraînant une perte de résistance (expansion et lors du dégel)
Routes revêtues	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Réduction des fenêtres pour la construction de revêtements bitumineux ▪ Vieillesse moins rapide des liants bitumineux ▪ Fracture plus fragile du bitume lorsqu'il est très froid
Travaux de terrassement	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Gel possible des surfaces du sol à haute altitude
Sols support	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Effet minime
Drainage (eau provenant de la réserve routière)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Effet minime
Drainage (eau provenant de la réserve routière extérieure)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Effet minime ▪ Des gradients de température plus importants dans les larges éléments en béton
Construction	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Réduction des délais de construction pour certaines opérations (pavage, stabilisation)
Entretien	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Entretien accru des revêtements bitumineux (colmatage des fissures et réparation des nids de poule) ▪ Fermeture des routes après la décongélation des matériaux congelés

Le potentiel d'augmentation de la vitesse des vents semble relativement élevé. Cela pourrait affecter plusieurs propriétés des infrastructures, mais augmenterait surtout le risque d'incendies, avec des conséquences spécifiques. Une grande partie du problème du vent devrait être associée à l'augmentation du nombre de cyclones tropicaux dans les zones côtières, bien que l'on puisse s'attendre à une augmentation des conditions de vent à l'intérieur des terres ainsi qu'à un renforcement des courants de convection résultant de températures plus élevées. Un résumé des dangers potentiels est fourni dans le Tableau 5.

Tableau 5 Dangers liés à l'augmentation du vent (et aux feux de forêt qui en résultent)

Facilité	Conséquence - Problèmes et dommages éventuels
Routes non revêtues	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Un assèchement plus rapide ▪ Augmentation des cotes de détérioration due à la perte de poussières et de fines ▪ Accumulation accrue de sable sur les routes
Routes revêtues	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Accumulation accrue de sable sur les chaussées ▪ Dommages éventuels aux revêtements bitumineux causés par les feux de brousse
Travaux de terrassement	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Perte de végétation due au brûlage ▪ Des taux d'érosion plus élevés sur les pentes latérales
Sols support	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Pas d'effets majeurs ▪ Augmentation de l'érosion due à la perte de végétation après les incendies
Drainage (eau provenant de la réserve routière)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Risque accru de blocage des canalisations par des matériaux emportés par le vent, y compris les déchets ▪ Perte de végétation due au brûlage ▪ Plus d'érosion des drains
Drainage (eau provenant de la réserve routière extérieure)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Plus grande charge de vent sur les ponts ▪ Perte de végétation due au brûlage ▪ Plus d'érosion des drains ▪ Davantage de débris dans les eaux de crue en raison des dommages causés par le feu ▪ Dommages causés par le feu aux ponts (principalement en bois mais aussi en béton)
Construction	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Plus de poussière ▪ Évaporation plus rapide de l'eau de construction
Entretien	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Augmentation de l'entretien des routes non revêtues afin de minimiser les ondulations résultant de la perte de fines (poussières) ▪ Déblaiement régulier des débris de la rivière et de la végétation du bassin versant ▪ Davantage d'extraction de sable dans les zones arides et côtières ▪ Amélioration du contrôle de la végétation pour réduire les risques d'incendie ▪ Entretien accru du mobilier et de la signalisation routière, en particulier ceux qui ont un support en bois

En plus des dommages réels causés aux infrastructures routières, des problèmes non-techniques tels que la mauvaise visibilité des usagers de la route en raison de la fumée pourraient entraîner des conditions dangereuses et des dommages aux routes et au mobilier routier en raison de l'augmentation du nombre d'accidents. Ces questions sont abordées dans une section distincte.

Les effets de l'élévation du niveau de la mer et des ondes de tempête sont limités à des zones côtières très localisées et peuvent n'avoir qu'un faible impact sur le réseau routier, mais doivent être pris en compte dans les zones des routes côtières où la population peut être affectée (Tableau 6).

Tableau 6 Dangers liés à l'élévation du niveau de la mer et les vagues de tempête

Facilité	Conséquence - Problèmes et dommages éventuels
Routes non revêtues	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Inondations et dégâts causés par les tempêtes ▪ Augmentation de la teneur en humidité du sol support ▪ Augmentation de l'érosion et de l'envasement ▪ Perte de praticabilité
Routes revêtues	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Dommages causés aux revêtements routiers par les sels et les coups de bélier ▪ Dépôt de débris ▪ Augmentation de la teneur en humidité du sol support et réduction du support ▪ Perte de praticabilité ▪ Augmentation de la salinité de l'eau du sol
Travaux de terrassement	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Augmentation de l'humidité du sol avec l'élévation du niveau de la mer ▪ Fluctuation des niveaux d'humidité avec les vagues de tempête ▪ Réduction de la résistance des sols
Sols support	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Augmentation de la teneur en humidité
Drainage (eau provenant de la réserve routière)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Accumulation d'eau à proximité de la route ▪ Erosion ▪ Ramollissement des matériaux ▪ Accumulation de débris dans les drains
Drainage (eau provenant de la réserve routière extérieure)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Affouillement les fondations ▪ Dépôt de débris ▪ Augmentation des dommages causés par le sel aux structures en béton et en acier
Construction	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Des conditions plus humides - des fenêtres de travail réduites ▪ Plus d'eaux salines
Entretien	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Entretien accru dans les zones côtières et de basse altitude ▪ Réparation accrue des dommages causés par les fortes tempêtes (vagues)

L'évolution des saisons et des précipitations totales dépend fortement des régions d'Afrique. Les précipitations pourraient diminuer dans certaines régions, mais augmenter dans d'autres. Cela entraînerait des changements dans le niveau des eaux souterraines, avec des changements correspondants dans les propriétés du sol. Toutefois, sur la majeure partie de l'Afrique subsaharienne, les niveaux actuels des eaux souterraines sont profonds, sauf dans les zones côtières et à proximité des grands barrages et des structures de drainage, et les fluctuations du niveau des eaux souterraines auront un impact minimal sur les routes. L'augmentation du niveau des eaux souterraines dans les zones montagneuses, qui affecte la stabilité des pentes, sera probablement minime, en raison de l'importance du ruissellement après une sécheresse prolongée. Les dangers possibles liés aux variations du niveau des eaux souterraines sont résumés dans le Tableau 7.

Tableau 7 Dangers liés aux variations du niveau des eaux souterraines

Facilité	Conséquence - Problèmes et dommages éventuels
Routes non revêtues	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Des sols supports plus humides ou plus secs ▪ Changements dans l'étendue et l'humidité des marais
Routes revêtues	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Des sols support plus humides ou plus secs ▪ Des conditions plus salines affectant les structures des chaussées
Travaux de Sols support	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Instabilité des pentes (localisée) ▪ Possibilité de plus importants mouvements volumétriques saisonniers dans les sols
Drainage (eau provenant de la	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Les infiltrations et les fontaines d'eau localisées
Drainage (eau provenant de la	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Changement des coefficients de ruissellement dans les bassins versants
Construction	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Les zones où les conditions de travail sont difficiles (engorgées par l'eau) peuvent augmenter
Entretien	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Pas de changement notable ▪ Zones localisées à forte teneur en humidité ▪ Il faut davantage de structures de drainage du sous-sol

Un bon nombre des changements climatiques prévus (en particulier la température) sont relativement faibles en termes de variations quotidiennes régulières de ces propriétés actuellement observées, bien qu'ils puissent prévaloir sur des périodes beaucoup plus longues. Outre les changements des précipitations, qui sont susceptibles d'avoir un effet important sur la maîtrise de l'eau, les effets majeurs des autres facteurs de stress seront probablement minimes, mais doivent certainement être pris en compte dans la conception des chaussées et des terrassements. D'autres questions telles que les changements dans la disponibilité de l'eau, l'utilisation des terres et les espèces de végétation naturelle locale résultant du changement climatique peuvent avoir des répercussions égales ou plus importantes sur certains des problèmes identifiés ci-dessus. Il convient de les considérer dans le contexte de nombreuses activités de construction routière (par exemple, le reprofilage, le rescallage, le recouvrement, etc.) dont la durée de vie prévue se situe entre 5 et 10 ans. Les changements dans l'utilisation des terres ou les données démographiques résultant du changement climatique ne sont pas pris en compte directement dans cette ligne directrice.

Un outil d'analyse simple (basé sur une feuille de calcul) a été développé et est disponible sur CD ROM (NCHRP, 2014a). Il permet d'identifier un large éventail de facteurs de stress climatique, d'impacts divers et d'adaptations en vue de leur minimisation grâce à un processus décisionnel.

Il est intéressant de noter que les activités de maintenance apparaissent dans les Tableaux ci-dessus à plusieurs reprises. Une bonne maintenance fait partie d'une bonne ingénierie et peut contribuer grandement à réduire les vulnérabilités au changement climatique. Une section spécifique sur la maintenance est donc incluse dans cette ligne directrice (section 5.8).

Un autre outil a été développé pour de nombreux pays africains (encore incomplet à bien des égards) qui identifie, au niveau de la région/district, diverses caractéristiques de vulnérabilité. Le Dispositif mondial de prévention des catastrophes et de relèvement (GFDRR, 2016) a créé l'outil en ligne (**ThinkHazard!**), qui permet à des non-experts de prendre en compte les informations relatives aux risques naturels dans la conception de projets. Cet outil doit être évalué pour son utilité et son applicabilité au niveau national.

Une fois les vulnérabilités identifiées et les adaptations proposées pour chacune d'entre elles (voir le manuel sur le changement climatique et le manuel d'évaluation visuelle qui l'accompagnent), des plans d'adaptation doivent être élaborés et préparés pour être mis en œuvre. Ces plans doivent ensuite être suivis et évalués après leur mise en œuvre afin de s'assurer qu'ils sont adéquats et qu'ils constituent les solutions les plus appropriées et les plus rentables. Si le financement le permet, il serait utile de construire des sections "contrôle" adjacentes en utilisant des techniques conventionnelles à des fins de comparaison et de déterminer si les mesures d'adaptation sont effectivement rentables et nécessaires.

On ne saurait trop insister sur l'importance d'une bonne conception. Bien que de nombreuses adaptations possibles soient identifiées et décrites dans la présente ligne directrice, il ne faut pas oublier les critères de conception conventionnels des routes d'accès rurales. Cela est particulièrement important pour la conception géométrique, qui n'est pas traitée en détail dans la présente ligne directrice. Les questions telles que l'alignement vertical et horizontal sont, sauf pour les routes conçues à nouveau, normalement contrôlées par la voie existante ou les alignements de route avec des ajustements mineurs pour des raisons de sécurité. La géométrie horizontale suit généralement la voie existante, avec peut-être une certaine réduction de la courbure dans les virages serrés, et lorsque les problèmes d'expropriation des terres ne posent pas de problème dans la plupart des cas.

Toutefois, la mise en œuvre de certaines mesures d'adaptation (par exemple, les drains latéraux, les accotements pavés, etc.) peut nécessiter des modifications de la chaussée ou de la largeur de la route en fonction de préoccupations d'ordre technique uniquement et pas nécessairement de la capacité ou de la sécurité de la route.

Si elles sont disponibles, il serait avantageux d'obtenir les projections des changements climatiques au niveau régional, ou mieux encore au niveau du district, en se basant sur les projections à échelle réduite les plus récentes et les plus représentatives des services/agences locaux de météorologie/climatologie⁵. De cette manière, le personnel local des services d'ingénierie serait informé des changements climatiques potentiels et pourrait attirer l'attention sur ces questions qui pourraient devenir prédominantes au lieu d'envisager l'ensemble des possibilités, dont la plupart pourraient ne pas être probables dans leurs zones respectives.

⁵ Il convient de noter qu'il existe une incertitude considérable sur des variables clés comme les précipitations à l'échelle locale, et que ces cartes sont susceptibles de changer en fonction du choix du modèle climatique et de la méthode de réduction d'échelle. Pour les éléments routiers de courte durée (5 à 10 ans), une bonne quantification sur les conditions actuelles peut être suffisante. Pour les actifs à plus longue durée de vie, des normes et allocations nationales en matière de changement climatique peuvent être nécessaires (par exemple, ADB (2018) ; EA, (2016)). Voir également Wilby et al. (2009) pour un examen des différentes techniques de scénario correspondant à diverses options d'adaptation.

3 Éléments routiers susceptibles d'être affectés par la variabilité et le changement climatique

Les installations et opérations d'infrastructure de transport suivantes peuvent être considérées comme vulnérables au changement climatique, et les mesures d'adaptation pour chacune d'entre elles sont examinées tour à tour au chapitre 5 :

- Routes non revêtues - terre, terre artificielle et gravier
- Routes revêtues - bitume fin, asphalte et béton
- Travaux de terrassement - remblais et déblais
- Les sols supports - les sols particulièrement problématiques tels que les zones expansives, dispersives, mouvants, salines et karstiques
- Drainage (eau provenant de la réserve routière) surface de la route et des accotements, drains latéraux, drains à onglet, petits ponceaux pour le drainage transversal des eaux de surface, etc.
- Drainage (eau provenant de l'extérieur de la réserve routière) - grands ponceaux et ponts associés à l'eau provenant des bassins versants adjacents
- Processus et activités de construction
- Pratiques et fréquences de maintenance

En plus des problèmes identifiés ci-dessus, le changement climatique aura des répercussions importantes sur l'exploitation des infrastructures de transport (c'est-à-dire sur la circulation des personnes et des marchandises). Toutefois, ces questions ne sont pas prises en compte dans la présente ligne directrice.

Il convient de noter que "*l'adaptation au changement climatique est un processus qui doit être intégré dans les procédures normales de planification et de gestion des risques d'une autorité routière*" (AIPCR, 2015). Des orientations sur l'établissement d'une base pratique pour l'examen des priorités et des progrès en matière de renforcement des capacités d'adaptation au sein des organisations du secteur public (et privé) sont fournies dans (Wilby et Vaughan, 2011).

4 Aperçu de la méthodologie d'adaptation

Cette section présente un aperçu des stratégies et des méthodologies d'adaptation potentielles qui pourraient être déployées. Celles-ci devraient être adaptées aux besoins et priorités spécifiques des différentes autorités routières. Elles sont également très dépendantes des financements disponibles, comme décrit dans la section 1.2.1. La plupart des nouvelles routes devraient intégrer les mesures d'adaptation nécessaires pour assurer la résilience des structures. Les routes existantes comprendront soit celles qui offrent le meilleur rapport qualité-prix dans un régime proactif (réaménagement), soit celles qui peuvent être financées dans un mode réactif. Toutes ces décisions doivent être fondées sur la catégorie de route (niveau de service), les vulnérabilités spécifiques et le processus de hiérarchisation des priorités mené comme décrit dans **les lignes directrices pour la gestion des changements**.

4.1 Stratégies d'adaptation

L'adaptation peut être définie comme suit : *Les mesures prises par les acteurs des infrastructures pour éviter, supporter ou tirer profit des changements et des impacts climatiques actuels et prévus. L'adaptation diminue la vulnérabilité d'un système et augmente sa résilience aux impacts.*

Une stratégie d'adaptation doit être mise en place pour permettre à une autorité routière d'élaborer et de mettre en œuvre systématiquement ses réponses aux défis de la variabilité et du changement climatiques afin de soutenir la réalisation de ses objectifs. Elle offre aux décideurs une plate-forme leur permettant d'examiner les résultats de leurs départements individuels, notamment les normes, les spécifications et l'entretien pour le développement de la résilience du réseau routier. Il fournit un processus systématique pour identifier les activités qui seront affectées par un climat variable et changeant, déterminer les risques associés (et les opportunités), et identifier les options préférées pour les aborder et les gérer.

Des stratégies d'adaptation sont mises en place pour :

- Réduire la vulnérabilité des infrastructures de transport aux conditions climatiques changeantes
- Accroître la résilience des infrastructures
- Soutenir la planification de l'implantation de nouvelles infrastructures dans des zones où l'on prévoit un risque moindre de changements environnementaux potentiellement nuisibles
- Soutenir l'identification de matériaux et de méthodes de construction nouveaux et innovants, de normes de conception souples et d'approches différentes en matière de conception afin de garantir que les infrastructures puissent résister aux changements climatiques prévus
- Préparer les autorités routières à réagir rapidement aux événements liés au climat

En choisissant une stratégie d'adaptation, il faut être conscient du fait que le changement climatique n'est pas une science exacte. La modélisation du changement climatique fournit des projections de futurs possibles, et non des données fiables pour l'ingénierie des infrastructures routières. Les cadres décisionnels doivent donc tenir compte de cette incertitude, même s'il est fort probable que les infrastructures devront faire face à un éventail plus large de conditions climatiques qu'auparavant. Pour ces cadres et stratégies d'adaptation, les exemples d'approches suivants pourraient être envisagés (Hallegatte, 2009) :

- *Stratégie "sans regret"* - stratégies qui produiront des avantages même en l'absence de changement climatique (exemples d'options d'adaptation : planification restrictive de l'utilisation des terres ; mise en place de systèmes d'alerte précoce, de plans d'intervention d'urgence et d'évacuation, soutenus par des réseaux de surveillance météorologique bien entretenus ;

protection des nouvelles infrastructures contre le climat ; infrastructures résistantes aux tempêtes et aux inondations)

- *Stratégies réversibles* - stratégies qui sont réversibles et flexibles par rapport à des choix irréversibles dans le but de maintenir aussi bas que possible le coût de se tromper sur le changement climatique futur (exemples d'options d'adaptation : construction de scènes ; protection côtière facile à rénover ; "reconstruire en mieux" de manière responsable)
- *Stratégies de marge de sécurité* - stratégies qui réduisent la vulnérabilité à un coût nul ou faible (exemple : doublement des périodes de retour des tempêtes classiques pour toutes les nouvelles conceptions d'infrastructures de drainage ou la réhabilitation/réadaptation des infrastructures existantes)
- *Un mélange des stratégies ci-dessus*

Les stratégies d'adaptation visent à réduire l'**impact** de certains types d'effets climatiques en identifiant et en classant par ordre de priorité les options d'adaptation, qui pourraient inclure

- Protéger les actifs existants ou les déplacer hors des zones vulnérables pour en préserver la fonctionnalité
- Rénovation d'installations vulnérables
- Amélioration du captage et de l'évacuation des eaux pluviales
- Construire de nouvelles installations
- Faire peu ou rien et détourner les fonds/efforts vers des installations plus prioritaires.

Une autre stratégie vise à réduire ou à atténuer les **conséquences** des impacts sur les infrastructures pour les impacts qui se sont déjà produits, dans le but, par exemple, de

- Préserver la vie humaine
- Rétablissement de l'ancienne accessibilité
- Minimiser l'impact économique
- Remplacer les infrastructures endommagées le plus rapidement possible
- Modification des régimes de maintenance.

Comme indiqué dans le manuel d'évaluation visuelle ci-joint et dans l'introduction de cette ligne directrice, toutes les mesures d'adaptation mises en œuvre dépendent du financement disponible et, dans la plupart des pays subsahariens dont les budgets sont limités, la plupart des mesures d'adaptation sur les infrastructures existantes sont susceptibles d'être réactives, en utilisant un financement d'urgence après que les événements se soient produits.

4.2 Méthodologie

Chacun des facteurs climatiques a des implications directes sur l'état des infrastructures ainsi que sur leur exploitation et leur maintenance. Les besoins de l'infrastructure à cet égard sont déterminés lors d'une évaluation des différents composants de l'infrastructure, comme décrit dans le manuel et le manuel d'évaluation. Une fois que l'importance des implications est évaluée, les gestionnaires des routes peuvent choisir parmi une série de stratégies d'adaptation décrites ci-dessous pour répondre à ces impacts. Il convient de noter que, bien que ce manuel comprenne de nombreuses options d'adaptation, il peut y en avoir beaucoup d'autres qui pourraient être mises en œuvre. Celles-ci doivent être sélectionnées sur la base des connaissances, de l'expérience et de l'évaluation par les ingénieurs de l'option la plus "adaptée aux besoins" ainsi que des nouvelles technologies développées en permanence, par exemple des produits géo-synthétiques innovants, de nouvelles techniques de stabilisation des pentes, etc.

La question cruciale concernant la sélection et la mise en œuvre des mesures d'adaptation est d'identifier et de comprendre la situation actuelle et les implications futures. Cela implique souvent une compréhension combinée des régimes géomorphologiques, géologiques, géotechniques et hydrologiques dans la zone entourant immédiatement l'installation d'infrastructure ainsi que dans les grands bassins hydrographiques qui affectent cette zone.

4.2.1 Évaluation de l'adaptation

Identifier toutes les options d'adaptation possibles

La compréhension des impacts et des vulnérabilités actuels et futurs du changement climatique permet d'identifier un large éventail d'options d'adaptation. Celles-ci doivent être déterminées après une évaluation complète des infrastructures existantes ou prévues susceptibles d'être touchées, notamment par une consultation des parties prenantes afin de saisir le maximum d'options.

Il est important de reconnaître que, dans certains cas, la ou les meilleures options d'adaptation peuvent dépasser le cadre d'un projet existant ou les compétences de l'autorité routière. Par exemple, le réalignement des routes à l'écart des plaines inondables peut être l'option la plus appropriée dans certaines situations, mais peut être difficile à traiter au stade du projet. D'autres peuvent inclure la protection de l'infrastructure routière au détriment de l'accessibilité en cas d'inondation (c'est-à-dire placer l'infrastructure au niveau du sol plutôt que sur des remblais ; ces derniers risquant davantage d'être endommagés en cas d'inondation). De même, le reboisement des bassins versants peut être l'option la plus appropriée dans certaines situations, bien que cela puisse augmenter les débris d'inondation qui peuvent bloquer ou endommager les structures de drainage après des événements extrêmes. Cette question dépasse également les compétences de l'ingénieur et fait partie d'un environnement plus large propice à l'adaptation qui comprend l'aménagement du territoire et la gestion intégrée des bassins versants. Elle doit être abordée dans le cadre d'un processus de planification en amont et peut être signalée pour de telles discussions à un niveau plus élevé, généralement avec d'autres parties concernées ou des départements gouvernementaux.

Il convient également de noter que la stabilité des pentes dans les zones montagneuses est un problème majeur, coûteux et difficile à gérer. La principale préoccupation doit être de veiller à ce que l'infrastructure routière n'affecte pas la stabilité naturelle régionale susceptible de provoquer de grands glissements de terrain "naturels" ou une instabilité mettant en danger les habitants ou les infrastructures de retenue d'eau sous les pentes élevées.

Mener des consultations

L'identification des options d'adaptation impliquera nécessairement la contribution de plusieurs parties prenantes. La tenue de tables rondes avec les parties concernées fournit des informations utiles pour le processus d'identification et d'évaluation de l'éventail des options d'adaptation. Les connaissances et l'expérience des communautés locales concernant les événements climatiques historiques fournissent également des informations utiles pour la conception des mesures d'adaptation. Les informations sur les niveaux et les intensités des inondations passées peuvent être déterminées à partir de ces discussions avec les habitants de la région à ce moment-là.

Mener une analyse économique

L'objectif de l'analyse économique des options d'adaptation est de fournir aux décideurs des informations sur les coûts et les bénéfices attendus de chaque option techniquement réalisable et de classer ces options en fonction du bénéfice net total (mesuré en valeur actuelle) qu'elles procurent.

Celles-ci dépendent essentiellement de la durée de vie supposée du projet et du taux d'actualisation économique (cf. Stakhiv, 2011).

La particularité du changement climatique réside dans l'incertitude liée à ses différents impacts. Compte tenu de l'incertitude importante liée aux impacts prévus du changement climatique, la réalisation d'une analyse coûts-avantages des options d'adaptation nécessite de prêter attention au traitement du risque et de l'incertitude. En raison de cette incertitude, il est souvent utile d'effectuer des analyses de sensibilité en faisant varier des paramètres d'entrée spécifiques sur la plage possible qu'ils peuvent prendre.

Le traitement du processus d'incertitude est décrit dans les lignes directrices de la BAD, y compris l'approche méthodologique de l'analyse coûts-avantages des options d'adaptation, Analyse coûts-avantages de l'adaptation : « Accounting for risk and uncertainty et Decision Rule » (ADB, 2011).

Prioriser et sélectionner la ou les options d'adaptation

L'évaluation de l'adaptation et l'étude des besoins (vulnérabilité) doivent aboutir à une liste hiérarchisée des lieux nécessitant des mesures d'adaptation. Les options d'adaptation à mettre en œuvre sont alors choisies parmi plusieurs possibilités identifiées dans ce guide, sur la base de l'expérience du créateur ou après avoir demandé l'avis d'un spécialiste. Leur hiérarchisation peut être fondée sur une évaluation de leur faisabilité technique, de leurs avantages et de leurs coûts, de leur acceptabilité sociale et des possibilités de synergies qu'elles peuvent offrir avec les priorités nationales. Si l'utilisation et les résultats d'une analyse coûts-avantages se voient souvent accorder plus de poids dans le processus de hiérarchisation des priorités, il est important de reconnaître que d'autres facteurs et critères peuvent également influencer la prise de décision.

L'expertise requise est multidisciplinaire et, à ce titre, constitue l'un des aspects les plus difficiles de la planification de l'adaptation. Les options doivent être scientifiques, socialement bénéfiques et économiquement viables.

Des tables rondes réunissant différentes parties prenantes peuvent fonctionner correctement et peuvent inclure, par exemple, des ingénieurs de projet, des spécialistes de l'environnement, des experts en protection sociale, des organisations non gouvernementales, des entités de mise en œuvre et des représentants nationaux du changement climatique.

4.2.2 Modalités de mise en œuvre

Établir les modalités de mise en œuvre

Une organisation chef de file doit être choisie pour superviser la mise en œuvre des mesures d'adaptation sélectionnées. Bien que cette organisation puisse être la principale agence d'exécution responsable du projet du secteur routier (comme un ministère des transports ou un département des routes rurales), d'autres ministères, organisations et instituts peuvent être nécessaires pour certains apports et accords, étant donné la nature transversale des activités d'adaptation. Cela souligne une fois de plus la nécessité de renforcer l'environnement favorable à l'adaptation au niveau des districts et au niveau national.

Comme les inondations sont souvent un facteur clé qui affecte les routes (et compte tenu de leur importance dans les opérations de secours), un comité national de préparation aux catastrophes peut également avoir un rôle à jouer⁶.

Lorsque les partenaires du projet sont sélectionnés, la portée du projet est susceptible d'être limitée par les lignes de responsabilité de chaque partenaire. Par exemple, alors que l'approche idéale en matière d'adaptation peut inclure des mesures d'ingénierie et environnementales, ces dernières sont susceptibles de ne pas relever des rôles et fonctions d'un ministère des routes/transports. Cela ajoute des raisons supplémentaires pour aborder l'adaptation dès les premières étapes de l'élaboration des politiques et des stratégies.

Identifier les besoins en matière de soutien technique et de renforcement des capacités

Les capacités et la sensibilisation nécessaires pour gérer la variabilité/le changement climatique et l'adaptation sont actuellement limitées dans la plupart des pays. Des dispositions pour la formation et le renforcement des capacités seront nécessaires pour les agences d'exécution, les instituts partenaires, les communautés locales, les unités de gestion de projets, les ingénieurs et les entrepreneurs. Ce plan devrait s'appuyer sur une évaluation institutionnelle des capacités et des lacunes existantes.

4.2.3 Suivi et évaluation

La mise en place de cadres de suivi et d'évaluation garantit la responsabilisation (et l'exploitation des enseignements) pour éclairer les futurs efforts d'adaptation, et elle est essentielle. Cela est également nécessaire pour déterminer le rapport coût-efficacité des mesures d'adaptation mises en œuvre.

Concevoir un plan de suivi et d'évaluation

On dispose actuellement de peu d'expérience dans le monde pour comprendre l'efficacité des différentes options visant à réduire la vulnérabilité au changement climatique, ce qui rend le suivi et l'évaluation d'autant plus importants pour développer de meilleures connaissances⁷. Pour ce faire, plusieurs défis doivent être relevés, notamment la nature à long terme du changement climatique réel, la nécessité d'acquérir des données de base et des paramètres appropriés pour mesurer la vulnérabilité et isoler la vulnérabilité au changement climatique des autres sources de pression. Il est plus avantageux de pouvoir comparer une option d'adaptation avec l'option conventionnelle ou même l'option "ne rien faire" sur des sections aussi identiques que possible pour obtenir une détermination valable du succès de l'option d'adaptation. Dans le même temps, les coûts de construction et d'entretien de l'adaptation (ainsi que les coûts sociétaux lorsque cela est possible) et de la solution de remplacement doivent être soigneusement surveillés afin d'évaluer si l'installation des mesures d'adaptation présente des avantages économiques à long terme (cycle de vie).

Le développement d'indicateurs de niveau de résultat et de production pour évaluer les impacts des investissements d'adaptation est en cours. La BAD (2011) identifie trois niveaux de suivi des résultats : les impacts, les résultats et les produits.

Le Tableau 8 donne quelques exemples d'indicateurs à chaque niveau. Compte tenu des difficultés liées à la mesure de l'impact, qui peut se produire au-delà de la durée de vie du projet, les indicateurs du niveau des résultats sont peut-être les plus solides.

⁶ Wilby et Keenan (2012) examinent diverses options habilitantes pour la gestion des risques d'inondation.

⁷ Pour une discussion approfondie de ces questions, voir Adger et al. (2005) et Moser & Boykoff (2013).

Tableau 8 Indicateurs types de suivi des résultats (après : BAD, 2011)

Type d'indicateur	Indicateur
Impacts (Effet à long terme)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Robustesse accrue de la conception des infrastructures et développement des investissements à long terme ▪ Renforcement de la résilience des systèmes naturels et gérés vulnérables, tels que la gestion des inondations
Résultats (indicateurs de processus)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Pourcentage de réduction des fermetures de routes pour cause de défaillance structurelle, de glissement de terrain ou d'inondation ▪ Pourcentage de réduction des inondations lorsque la capacité de drainage a été augmentée ▪ Amélioration de la prise de décision et de la planification sectorielle sur la base de considérations liées au changement climatique ▪ Amélioration de l'accès aux zones rurales
Résultats	<ul style="list-style-type: none"> ▪ La planification et les documents du secteur des transports comprennent des stratégies d'adaptation ▪ Les documents de conception et de spécification intègrent des mesures de résilience ▪ Les programmes de maintenance couvrent régulièrement des mesures préventives ▪ Longueur de route construite pour résister aux effets du changement climatique ▪ Zone de protection environnementale mise en œuvre (par exemple, mangrove pour la protection des côtes)

Réactions aux processus d'élaboration des politiques et de gestion des connaissances

Une stratégie d'adaptation adéquate est susceptible de comporter diverses activités, notamment des mesures d'ingénierie, comme l'incorporation de modifications de la conception, et des mesures non techniques, comme des mesures de résilience des écosystèmes et des systèmes d'alerte précoce pour les catastrophes. Les enseignements tirés des mesures d'adaptation prises au niveau des projets devraient informer les décideurs politiques sur les approches appropriées au niveau sectoriel et/ou national. Des détails à cet égard sont inclus dans les lignes directrices sur la gestion du changement qui accompagnent le présent document.

4.3 Hiérarchisation des besoins d'adaptation

Quelles que soient les mesures d'adaptation au climat mises en œuvre, elles vont inévitablement augmenter le coût de la construction de la plupart des nouvelles routes ou entraîner des coûts, souvent importants, pour la mise en place de ces mesures dans les infrastructures existantes. Une étude de la Banque mondiale (Banque mondiale, 2009) a montré que le coût de l'adaptation au changement climatique, compte tenu du niveau de base de la fourniture d'infrastructures, ne représente pas plus de 1 à 2 % du coût total de la fourniture des infrastructures. Toutefois, cette résilience au climat peut réduire le coût total du cycle de vie en prévenant les dommages et les interruptions de l'infrastructure et en améliorant les conditions sociales. En général, le coût de l'adaptation est faible par rapport à d'autres facteurs qui pourraient influencer les coûts futurs de l'infrastructure. En raison du manque de connaissances sur les événements climatiques futurs, il n'est

pas facile actuellement d'effectuer des analyses du coût total du cycle de vie avec précision. Cela devrait cependant faire partie des analyses de suivi et d'évaluation.

La mise en place de mesures d'adaptation nécessitera dans un premier temps une hiérarchisation des besoins. Le processus de priorisation nécessitera une contribution importante des autorités routières et des collectivités. Leurs besoins et priorités différents peuvent prévaloir et nécessiteront généralement des décisions de nature stratégique. Les éléments suivants devront être pris en compte lors de la hiérarchisation des décisions d'investissement⁸ :

- Pertes potentielles de vies humaines
- Disponibilité d'itinéraires alternatifs
- Coût et conséquences de la fermeture
- Les questions d'environnement et de durabilité (c'est-à-dire la pollution, l'esthétique, etc.)
- Coût des réparations
- Fonds disponibles
- Exigences en matière d'accessibilité.

En général, les considérations de sécurité (pertes de vies humaines) primeront sur les autres. Toutefois, à l'exception des grands glissements de terrain provoqués par l'excavation des routes (et qui pourraient affecter les communautés situées en dessous des routes), les conséquences des pannes de route sur la sécurité sont généralement minimales. Il faut également garder à l'esprit qu'il est généralement plus important de s'assurer que les réseaux routiers primaires et secondaires sont maintenus en bon état avant de se concentrer sur le réseau routier d'accès tertiaire ou à faible volume.

Il est important que toutes les routes soient soigneusement et correctement classées en fonction de leurs Niveaux de Service (Levels of Serviceability, LoS) requis ou attendus dans le cadre du processus de hiérarchisation des priorités. Ce niveau de service sera fonction de nombreux facteurs, mais surtout de la question de savoir si la route est purement une route d'accès ou si elle est également utilisée pour la mobilité (figure 2). Il est possible d'identifier différents niveaux de viabilité, par exemple, selon que la route sert principalement d'accès ou qu'elle a également une importante fonction de mobilité, ainsi que les besoins attendus des communautés concernées (adaptation de TRH 20 (DOT, 1990)). Une telle classification peut être directement liée à la hiérarchisation des priorités requise, comme le montre le Tableau 9 pour l'accessibilité et le Tableau 10 pour la mobilité.

⁸ Il convient de noter que les avantages des interventions d'adaptation peuvent être inégaux en fonction des priorités (par exemple, Clay et King, 2019).

Tableau 9 Lignes directrices sur les niveaux de service pour l'accessibilité

Niveau de service (LoS)	Normes requises pour l'accessibilité		
	Vitesse de conduite confortable (km/h)	Impraticabilité	Durée de l'impraticabilité
6	SANS OBJET 15	> 20 jours/An	> 5 Jours
5	20	< 20 jours/An	Pas plus que 5 jours
4	35	< 5 jours/An	Pas plus que 2 jours
3	50	Jamais	Aucun
2	60	Jamais	Aucun
1		Jamais	Aucun

Les routes d'accessibilité classées en LoS 1 sont généralement celles qui ont un trafic plus important, qui mènent à des services importants et qui n'ont généralement pas d'autre itinéraire. Les routes classées comme LoS 6, en revanche, desservent de très petites communautés relativement autosuffisantes, qui peuvent faire face à une perte d'accès pendant de longues périodes.

Tableau 10 Lignes directrices sur les niveaux de service pour la mobilité

Niveau de service (LoS)	Normes requises pour l'accessibilité		
	Rugosité maximale (unités IRI en m/km)	L'impraticabilité	Durée de l'impraticabilité
5	12	Pas plus de 4 jours/an	Pas plus d'un jour
4	9	Jamais	Aucune
3	8	Jamais	Aucune
2	7	Jamais	Aucune
1	6	Jamais	Aucune

Les décisions relatives à la classification du niveau de service doivent être basées sur une analyse multicritère et doivent inclure des questions telles que des considérations sociales, de trafic, de connectivité et économiques. Ces analyses doivent être effectuées à un niveau stratégique. Elles seront basées sur l'inventaire des routes développé dans le cadre du système de gestion du patrimoine routier (RAMS) pour tout pays ainsi que sur l'état existant, afin d'identifier toute amélioration préliminaire.

Les évaluateurs effectuant des évaluations visuelles conventionnelles de l'état des routes pour la gestion et l'entretien des routes devront être conscients des changements climatiques possibles, qui peuvent varier d'un pays à l'autre et même d'un district à l'autre, et effectuer des évaluations visuelles spécifiques des vulnérabilités potentielles des routes et des structures en fonction des facteurs de stress spécifiques identifiés pour leur pays ou même pour des régions du pays. Dans la plupart des cas, cependant, il convient de faire appel à des évaluateurs spécialement formés pour les évaluations de la vulnérabilité, car différentes compétences sont requises - généralement une meilleure

connaissance de la géomorphologie, de la pédologie et de l'hydrologie. Le détail de ces évaluations est décrit dans la section 5.1. Les éléments suivants doivent toutefois être pris en compte dans cette évaluation :

- Le degré d'exposition de l'infrastructure routière à différents risques climatiques ;
- La sensibilité des différents éléments de l'infrastructure à ces changements climatiques, et ;
- Les adaptations éventuelles nécessaires pour atténuer les dommages potentiels (y compris la capacité d'adaptation).

Les mesures qui peuvent être prises pour réduire la vulnérabilité aux changements climatiques comprennent l'évitement, l'absorption et/ou la mise à profit de la variabilité et des impacts climatiques. Éviter les zones à haut risque n'est probablement pas possible pour la plupart des routes existantes, mais pourrait être envisagé pour les nouvelles infrastructures. Dans la plupart des cas, la mise en œuvre de mesures d'adaptation aux actifs vulnérables existants est la seule option possible.

Il est postulé que, dans de nombreux cas, les anciennes routes construites sur le réseau routier d'un pays seraient moins affectées par les changements progressifs des conditions de précipitations et de température. En effet, les zones vulnérables de ces routes auraient plus que probablement été améliorées, remises en état ou réparées ponctuellement compte tenu des données historiques sur la variabilité climatique et à la suite d'événements extrêmes périodiques antérieurs. Toutefois, l'augmentation des événements extrêmes (et de leur gravité) qui devrait être généralisée à court terme doit être prise en compte sur les routes (et les réseaux) existants. La conception de nouvelles routes et de nouveaux ponts doit tenir compte des changements à long terme des conditions climatiques et hydrologiques locales. Toutefois, cela doit être fait avec une certaine circonspection car il n'est ni pratique ni économique d'appliquer des solutions globales à des réseaux routiers entiers. Un exemple typique de cela serait lors de la conception d'une nouvelle route comportant de nombreuses tranchées et remblais - il serait imprudent, par exemple, d'augmenter le facteur de sécurité de 1,5 à 1,7 sur toutes les tranchées et remblais comme mesure générale de précaution/adaptation - chaque structure doit être considérée individuellement, de préférence par un spécialiste en géotechnique en termes de complexité, d'ampleur et de conséquences de la défaillance.

Le Tableau 11 ci-dessous présente les durées de vie utiles types prévues pour certains actifs d'infrastructure routière et leurs composants, en partant de l'hypothèse que les actifs ont été conçus, construits et régulièrement entretenus pour répondre aux exigences de l'environnement fonctionnel dans lequel ils opèrent (COTO, 2013). Cependant, si les projections de changement climatique n'étaient pas prises en compte dans la conception et que les périodes de retour des grandes tempêtes passaient, par exemple, de 50 à 25 ans, on pourrait s'attendre à une réduction de la durée de vie utile de l'actif. Dans l'ensemble, les implications économiques de ces impacts sur les routes à faible trafic seraient négligeables, sauf pour les structures majeures telles que les remblais et les ponts.

Tableau 11 Espérance de vie nominale de plusieurs types d'infrastructures

Actif	Type de composant	Nom	Duré
Route	Revêtements routiers	Enduit superficiel de sable	3
Route	Revêtements routiers	Enrobés d'émulsion de bitume a faible granulométrie et forte teneur en liant (Lisier bitumineux Grossières)	5
Route	Revêtements routiers	Monocouche (toutes les tailles)	9
Route	Revêtements routiers	Monocouche au bitume Modifié)	12
Route	Revêtements routiers	Bicouche (toutes tailles)	10
Route	Revêtements routiers	Bicouche (Mod. Binder)	12
Route	Revêtements routiers	Enrobé	14
Route	Revêtements routiers	Enrobé au bitume modifié	16
Route	Chaussées routières	Granulaire	20
Route	Chaussées routières	Traités aux liants hydrauliques	20
Route	Chaussées routières	Bitumineux	20
Route	Chaussées routières	Chaussées de pavés en blocs	20
Route	Chaussées routières	Béton	30
Route	Formations, y compris le	Faible niveau de qualité	30
Route	Formations, y compris le	Standard moyen	40
Route	Formations, y compris le	Standard élevé	50
Pont	Pont - Général		80
Pont	Pont - Arche		80
Pont	Pont - haubané		80
Tunnel	Civil	Couper et recouvrir / Rocher tapissé	100
Drainage	Bordures et entrées		30
Drainage	Drainés revêtus	Béton	30
Drainage	Pont - Cellulaire		80
Accessoires	Mur de soutènement		30
Accessoires	Conserver les structures	Gabions	20
Accessoires	Conserver les structures	Ancrages au sol	40
Accessoires	Conserver les structures	Clous de sol	40
Accessoires	Conserver les structures	Renforcement des sols	40
Accessoires	Trottoir - Pavé	Trottoirs - Bitumineux	20
Accessoires	Trottoir - Pavé	Trottoirs - pavé en Blocs	25
Accessoires	Trottoir - Pavé	Trottoirs - Béton	30

(Source : COTO, 2013)

Plusieurs pays subsahariens dotés d'un littoral administrent de petites îles au large de leurs côtes. En outre, une grande partie de l'activité économique et de l'habitat de ces pays est centrée sur les zones côtières, qui sont très vulnérables aux variations du niveau de la mer. Une attention particulière devra être accordée à ces zones.

Aucune indication de coûts n'est incluse dans cette ligne directrice car ceux-ci seront très spécifiques à chaque projet et à chaque pays. Chaque projet proposé devra être évalué en termes de coûts d'adaptation par rapport au coût de l'inaction, en tenant compte de tous les coûts techniques, sociaux et environnementaux et des coûts globaux actualisés du cycle de vie afin de permettre des comparaisons équitables. Par exemple, certaines régions sablonneuses du Mozambique ne disposent pas de granulats disponibles, alors que d'autres régions disposent d'une grande quantité de matériaux pouvant être broyés. Les mesures d'adaptation à un problème similaire dans ces deux régions devraient être différentes afin de tenir compte de cette situation et auraient des implications financières sensiblement différentes.

Les répercussions économiques globales de la mise en place d'une infrastructure résistante au climat devraient toutefois être massives. À titre d'exemple, la Banque mondiale (2010) a estimé que le changement climatique pourrait avoir un impact de 3,1 milliards de dollars sur les routes en Éthiopie (jusqu'en 2100) si l'on tient compte des effets de l'augmentation des températures, des précipitations et des inondations. Ils indiquent également que ces coûts pourraient être réduits de 54 % si des politiques d'adaptation sont adoptées par le gouvernement dans le cadre de changements de politique. Cependant, même avec ces adaptations, le coût potentiel du changement climatique pour les routes éthiopiennes pourrait atteindre 1,4 milliard de dollars (Banque mondiale, 2010).

De nombreuses options d'adaptation sont disponibles et peuvent répondre à divers degrés de risque. Parmi celles-ci, on peut citer :

- Éviter le risque (souvent impraticable) ;
- Supprimer ou réduire le risque à un niveau qui minimise les conséquences et qui peut être traité en utilisant les ressources existantes - cela ferait appel à des solutions technologiques appropriées ;
- Mettre en œuvre des mesures d'adaptation appropriées.

Il est impératif que des consultations soient organisées avec les communautés et les autres parties prenantes pour s'assurer que les mesures d'adaptation mises en œuvre et la route affectée sont acceptables pour les parties prenantes.

4.4 Options d'adaptation dans le secteur routier

Les types de mesures qui peuvent être prises pour réduire la vulnérabilité comprennent le fait d'éviter, de supporter et/ou de tirer profit de la variabilité et des impacts du climat, comme indiqué ci-dessus. Éviter les zones dont on prévoit qu'elles présentent un risque plus élevé d'impacts climatiques potentiellement importants est un facteur important dans les décisions de planification. Si de tels endroits ne peuvent être évités, des mesures doivent être prises pour s'assurer que l'infrastructure routière peut résister aux changements prévus. Par exemple, la possibilité d'une augmentation des inondations peut être une raison d'augmenter la hauteur des ponts au-delà de ce que les données historiques pourraient suggérer. Il convient toutefois de noter que la plupart des problèmes rencontrés sont liés aux infrastructures existantes qui ne peuvent pas être déplacées aussi facilement.

Deuxièmement, le résultat de l'action adaptative soit diminue la vulnérabilité d'un système à des conditions modifiées, soit augmente sa résilience aux impacts négatifs. Par exemple, l'augmentation

des températures pourrait entraîner une défaillance plus précoce que prévu des chaussées du réseau routier. L'utilisation de différents matériaux ou de différentes approches qui reconnaissent cette vulnérabilité peut permettre aux chaussées de mieux résister aux températures plus élevées prévues.

En ce qui concerne la résilience, des améliorations opérationnelles pourraient être apportées pour renforcer les voies de déviation autour des zones inondables. Un autre exemple de résilience est celui des plans d'intervention d'urgence bien conçus, qui peuvent accroître la résilience en fournissant rapidement des informations et des alternatives de déplacement lorsque les routes sont fermées et en facilitant la restauration rapide des structures endommagées. En augmentant la résilience du système, même si une installation peut être perturbée, l'ensemble du réseau routier continue de fonctionner.

Les options d'adaptation peuvent généralement être divisées en deux catégories, à savoir les adaptations techniques et les autres⁹, la présente ligne directrice n'abordant que les adaptations techniques, comme suit :

- **Conditions du Sol support** - la stabilité de tout type d'infrastructure dépend des matériaux sur lesquels elle est construite (sol support). Un facteur important concerne le degré de saturation du sol, les fluctuations de la teneur en humidité et le comportement attendu du sol dans des conditions de saturation. Le type, la résistance ou la protection des conditions et des matériaux du Sol support peuvent devoir être modifiés pour contrôler et empêcher que la saturation ou la déshydratation du sol n'endommage l'infrastructure sous-jacente. Une fois qu'une route est construite sur des matériaux inadaptés, il est extrêmement coûteux et long de "réparer" le sol de support. Il est cependant possible (mais coûteux) d'améliorer le drainage autour de la route et de contrôler le mouvement de l'eau dans la structure de soutien de la chaussée.
- **Spécifications des matériaux** - des matériaux de qualité appropriée doivent être utilisés tant pour les routes non revêtues que pour les routes revêtues, et les matériaux inadaptés peuvent devoir être remplacés ou améliorés pour préserver la durée de vie prévue de la route ou de la structure. Cela serait typique des routes en terre non revêtues ou revêtues.
- **Profil en travers (coupe) et dimensions standard** - Les normes peuvent devoir être révisées, par exemple, pour augmenter la chute transversale des revêtements dans les zones où l'on peut s'attendre à devoir retirer davantage d'eau de la route ou pour permettre l'amélioration des drains latéraux et des drains à onglet. De même, les normes (ou lignes directrices) relatives à l'élévation des routes ou à la hauteur libre des ponts peuvent devoir être révisées à la hausse lorsque des précipitations accrues ou des événements extrêmes sont probables.
- **Drainage et érosion** - des normes améliorées concernant les systèmes de drainage, les canaux ouverts, les tuyaux, les ponceaux et les options de revêtement (par exemple pour les sections de route à forte pente) sont nécessaires pour tenir compte des changements dans le ruissellement ou le débit d'eau prévu à l'avenir et des dommages potentiels causés par l'érosion.
- **Ouvrages d'art de protection** - peuvent être utilisés pour faire face aux rivières en crue, à l'élévation du niveau de la mer et aux ondes de tempête. Il peut s'agir de galeries, de digues, de murs de mer, de tabliers rocheux et de systèmes de brise-lames.
- **Construction et entretien** - Il est essentiel que tous les aspects de la construction et de l'entretien liés aux routes, aux drains, aux structures, aux ouvrages de protection et au contrôle de la végétation soient traités avec diligence et en temps voulu. La plupart des problèmes seront évités

⁹ Voir également Biagini et autres (2014). L'adaptation a été classée dans les dix catégories d'ingénierie et de non-ingénierie suivantes : (i) Renforcement des capacités ; (ii) Gestion et planification ; (iii) Pratique ou comportement ; (iv) Politique ; (v) Information ; (vi) Infrastructure physique ; (vii) Systèmes d'alerte ou d'observation ; (viii) Infrastructure verte ; (ix) Financement ; (x) Technologie.

grâce à un bon entretien. Les adaptations visant à protéger le bien-être et la productivité de la main-d'œuvre doivent également être prises en compte.

4.5 Ne rien faire ou faire des options minimales

Dans de nombreux cas, il n'y a tout simplement pas assez de budget pour traiter toutes les zones touchées, les routes et les structures, ou les conséquences du changement climatique sont trop graves pour justifier une adaptation physique complète. Dans ces circonstances, aucune adaptation n'est mise en œuvre, mais un programme planifié de dialogue avec les communautés touchées, des informations bien diffusées et des programmes d'urgence sont nécessaires pour minimiser les effets négatifs de cette décision. Le scénario "ne rien faire" doit être programmé en fonction de la priorité accordée à la route et doit être limité aux routes des catégories 5 et 6 du Tableau 9, et même dans ce cas, il ne doit être envisagé que s'il n'y a pas ou peu de financement disponible.

Bien que l'on puisse appeler ce scénario "ne rien faire", le fait qu'un programme de dialogue avec les parties prenantes doit être planifié indique qu'au moins quelque chose est fait. En outre, "ne rien faire" est une décision consciente dont les conséquences sont comprises, acceptées et soumises à examen.

5 Options d'adaptation

5.1 Dangers, exposition et vulnérabilité

Lors de la conception de nouvelles infrastructures, les impacts climatiques doivent être déterminés dans le cadre de l'évaluation des incidences sur l'environnement ou de l'évaluation environnementale stratégique et peuvent donc être pris en compte dans la conception, qui peut intégrer les mesures d'adaptation nécessaires à un coût minimal.

Pour les routes existantes, cependant, lors de l'évaluation visuelle de routine des routes en vue de leur intégration dans les systèmes de gestion des chaussées (PMS), il sera essentiel d'inclure une évaluation séparée (ou parallèle) de la vulnérabilité de la route et des structures associées (ponts, ponceaux, remblais, matériaux, pentes, etc.) à la variabilité et aux changements climatiques. Les vulnérabilités potentielles et leur atténuation devront être identifiées, généralement sur une base ponctuelle. Des lignes directrices à cet égard devront être incluses dans les manuels d'évaluation visuelle du système de gestion des actifs pour aider les évaluateurs à prendre ces décisions, bien que dans de nombreux cas, des évaluateurs ayant des profils ou formations différents puissent être nécessaires. Ces manuels devraient être élaborés conjointement et être compatibles avec le projet régional de gestion des actifs actuellement mené dans le cadre de l'AfCAP. Il convient d'éviter les doubles emplois. Toutefois, l'évaluation de la vulnérabilité nécessite l'intégration des changements climatiques prévus et de l'état et de la conception actuels du réseau d'infrastructures. Une évaluation visuelle de routine doit caractériser les conditions choisies de la route et des structures observées à ce moment, tandis que pour les évaluations de la vulnérabilité, différentes questions sont évaluées et des projections quant aux effets futurs possibles doivent être faites.

Contrairement au processus de hiérarchisation des priorités, l'évaluation de la vulnérabilité serait une opération plus tactique. La sensibilité au climat de tous les composants de l'infrastructure routière doit être identifiée en fonction de deux paramètres principaux lors des évaluations de routine de l'état des routes. Il s'agit du potentiel de :

- *Dommmages (c'est-à-dire les dommages physiques qui nuisent à la valeur, à l'utilité ou au fonctionnement normal d'un bien) - ces dommages peuvent normalement être réparés*

rapidement par des équipes de travaux locales et sont généralement classés comme des défauts de degré 3 (voir le manuel d'évaluation visuelle et l'annexe A)

- *L'effondrement (c'est-à-dire la défaillance structurelle déclenchée lorsque le matériau est soumis à une contrainte dépassant sa limite de résistance)* - il est généralement coûteux à réparer et implique d'importants travaux de construction et de réparation, souvent effectués par des équipes spécialisées nécessitant une procédure d'appel d'offres, et peut entraîner la fermeture de routes pendant de longues périodes. Lors de l'évaluation, ces conditions seraient classées comme un défaut de degré 4 ou 5

Pour réduire au minimum le coût de l'acquisition de données sur la vulnérabilité climatique des actifs, les évaluations de la vulnérabilité doivent être effectuées simultanément avec les évaluations de routine de l'état des routes, lorsque cela est possible, et tous les éléments de données nécessaires doivent être saisis. Toutefois, l'absence de gestion efficace des actifs dans de nombreux pays d'Afrique subsaharienne aura une incidence sur la disponibilité de données historiques sur l'état des actifs qui permettraient d'informer et de soutenir les études sur la vulnérabilité climatique et l'identification et la hiérarchisation des options d'adaptation. Pour ce faire, des données devront être collectées directement pour chaque route du réseau.

Dans le rapport sur les menaces climatiques (Le Roux et al, 2016), le risque est défini comme une fonction des dangers, de l'exposition des routes d'accès rurales et de la vulnérabilité en termes d'accès des communautés rurales. Les définitions suivantes s'appliquent en particulier :

- **Dangers** : L'occurrence potentielle d'un événement physique ou d'une tendance d'origine naturelle ou humaine qui peut causer des pertes de vie, des blessures ou d'autres effets sur la santé, ainsi que des dommages et des pertes aux biens, aux infrastructures, aux moyens de subsistance, à la fourniture de services, aux écosystèmes et aux ressources environnementales. Dans le cadre de cette étude, les dangers sont des événements liés au climat qui peuvent causer des dommages et/ou l'interruption du service des infrastructures routières rurales à faible débit ainsi que des pertes potentielles de vies humaines (par exemple, des inondations) ;
- **Exposition** : présence de personnes, de moyens de subsistance, d'espèces ou d'écosystèmes, de fonctions, de services et de ressources environnementales, d'infrastructures ou de biens économiques, sociaux ou culturels dans des lieux et des environnements susceptibles d'être affectés par des aléas. Dans le cadre de cette étude, le terme "exposition" désigne l'emplacement des installations routières à faible trafic, les structures associées et l'environnement routier ainsi que les communautés rurales dans des endroits qui pourraient être affectés de manière négative (dans les limites de l'empreinte du danger) ;
- **Vulnérabilité** : Vulnérabilité : la propension ou la prédisposition à être affecté négativement. La vulnérabilité englobe une variété de concepts et d'éléments, notamment la sensibilité ou la prédisposition aux dommages et le manque de capacité à faire face et à s'adapter. Dans le cadre de cette étude, il s'agit de la propension à être affecté négativement, compte tenu de la dépendance des communautés rurales à l'égard de ces routes d'accès à faible trafic.

La capacité d'adaptation est la capacité de l'infrastructure à s'adapter aux changements climatiques avec un minimum de perturbations ou de coûts supplémentaires. Cette capacité peut être mesurée en évaluant la réponse aux questions suivantes :

- Quelle est la capacité de l'infrastructure, telle qu'elle est actuellement, à résister aux impacts climatiques prévus ?
- Quels sont les obstacles réglementaires, physiques, de gestion ou d'utilisation concurrentielle qui pourraient entraver la capacité de l'infrastructure à faire face aux impacts climatiques ?

- Dans quelle mesure l'état actuel de l'infrastructure (sous-conception, vétusté ou mauvais entretien) limite-t-il sa capacité à faire face aux impacts climatiques ?
- Dans quelle mesure les changements climatiques sont-ils susceptibles de dépasser la capacité d'adaptation de l'infrastructure plus rapidement que celle-ci ne peut être adaptée ?
- Quelles mesures sont actuellement nécessaires pour faire face à la variabilité du climat susceptible d'avoir un impact sur l'infrastructure ?

L'évaluation de la vulnérabilité des infrastructures, même face à la variabilité climatique actuelle, est difficile en raison de l'éventail de facteurs, outre le climat, qui contribuent à la vulnérabilité. L'évaluation de la vulnérabilité du réseau routier au changement climatique est encore plus difficile en raison de la nature dynamique des effets climatiques et de la vulnérabilité qui en résulte.

Ainsi, la nécessité d'une formation spécialisée des évaluateurs pour identifier les vulnérabilités potentielles de l'infrastructure routière - il n'est probablement pas rentable d'inclure des évaluateurs spéciaux spécifiquement pour identifier et enregistrer les vulnérabilités potentielles, bien que cela puisse être bénéfique pour les évaluations initiales. L'évaluation de routine devra donc inclure l'identification sur le terrain des vulnérabilités potentielles ainsi qu'une estimation du risque associé, ces deux éléments nécessitant une formation et des compétences spéciales pour garantir des résultats utiles. La plupart des évaluateurs de l'état des chaussées ont généralement une formation en génie civil, tandis que pour les évaluations de la vulnérabilité, une formation en matériaux, géomorphologie, hydrologie ou géotechnique est préférable.

Grâce à un programme structuré, l'identification des vulnérabilités peut être relativement facile à apprendre et peut être basée sur un formulaire d'évaluation, identifiant les zones spécifiques à évaluer et incluant un attribut et une gravité potentielle en termes de conséquences. Un exemple d'un tel formulaire figure à l'annexe A. Les vulnérabilités actuelles et futures doivent être identifiées, si l'on soupçonne des différences.

Ce formulaire d'évaluation doit être utilisé conjointement avec le Manuel d'évaluation visuelle (Paige-Green et al., 2019), qui décrit chacun des facteurs à évaluer avec des illustrations des différents degrés et degrés de gravité. De cette façon, des évaluations uniformes devraient pouvoir être obtenues de différents évaluateurs. Ceci est essentiel si les évaluations doivent être utilisées pour établir un ordre de priorité des besoins d'adaptation.

Pour établir les priorités, le danger et les conséquences doivent être convertis en une forme de risque. Le moyen le plus prometteur et le plus pratique de le faire avec succès en ASS est probablement d'utiliser une estimation de la probabilité/conséquence du risque (FHWA, 2012) ou une évaluation de l'impact/criticité (WSDOT, 2011).

En général, les vulnérabilités peuvent être classées en deux catégories : celles qui sont "liées au terrain" et celles qui sont "liées à la topographie". Les vulnérabilités liées au sol sont liées à des paramètres qui décrivent les formes de terrain, l'hydrologie et les propriétés des matériaux et qui peuvent être quantifiées, tandis que les vulnérabilités topographiques sont davantage liées à la concentration et à l'écoulement de surface de l'eau en fonction de la longueur des pentes, des angles, des caractéristiques de surface, etc. Il est important de noter qu'en ce qui concerne l'instabilité des pentes, ce n'est pas une tempête ponctuelle qui crée habituellement l'instabilité, mais plutôt les conditions antérieures et les précipitations récentes passées, comme indiqué au point 5.3.3.

Les analyses des coûts du cycle de vie doivent inclure un facteur de résilience climatique de l'installation, bien que des hypothèses devront être faites principalement concernant les avantages - il

existe peu de précédents pour aider à estimer ces avantages. Toute route ou structure résiliente au climat est susceptible de coûter plus cher que les routes ou structures conventionnelles s

5.2 Conséquences et adaptation

Les infrastructures routières doivent toujours être conçues en tenant compte des conditions environnementales locales (climat, topographie, trafic, etc.). Les données climatiques historiques sont généralement utilisées pour déterminer les températures et l'évolution des précipitations. Ces données existantes sont probablement inadéquates à court ou moyen terme, compte tenu de l'accélération des tendances du changement climatique observée, bien que certaines tendances préliminaires puissent être utilement basées sur les enregistrements météorologiques des 5 ou 10 dernières années. Toutefois, à des fins de conception générale, il est probablement préférable d'utiliser les cartes de projection du changement climatique à haute résolution qui sont de plus en plus facilement disponibles¹⁰.

Les routes modernes à grand volume sont conçues pour durer de 30 ans (structures de chaussée, à l'exclusion du revêtement) à 100 ans (structures principales) ou plus (c'est-à-dire chaussées à longue durée de vie). De même, les routes en terre artificielle à faible volume devraient durer entre 5 et 6 ans, la couche de roulement des routes en gravier entre 6 et 10 ans, tandis que leurs structures de drainage et leurs ponts devraient durer entre 50 et 100 ans (cf. Tableau 11). Les routes revêtues à faible volume sont normalement conçues pour une durée de 10 à 20 ans. Il faudrait donc tenir compte des changements climatiques dans la conception de toutes les nouvelles routes et de tous les grands projets de réfection, afin d'égaliser ou d'améliorer les espérances de vie types mentionnées ci-dessus.

Les conséquences du changement climatique sont vastes et variées et doivent être évaluées au cas par cas. L'adaptation doit cependant être réalisée de préférence de manière proactive, mais il y aura toujours des cas de conditions extrêmes qui n'ont pas été prévues. En général, l'adaptation proactive consiste essentiellement à identifier les problèmes potentiels et à appliquer ensuite les bonnes pratiques d'ingénierie, y compris la conception, la construction et la maintenance. Les principes d'ingénierie normaux appliqués correctement, par exemple, prévoient des diamètres de tuyaux corrects pour les ponceaux en fonction des débits d'eau actuels prévus, ainsi que des périodes de retour spécifiques. Toutefois, il faudra généralement procéder à des ajustements des périodes de retour (en tenant compte des changements prévus des débits d'eau) en fonction des projections climatiques, ou lorsque celles-ci ne sont pas disponibles, des périodes de retour plus longues peuvent être utilisées. Il est suggéré qu'en attendant, les périodes de retour conventionnelles dans les guides de conception actuels soient au moins doublées (c'est-à-dire qu'une période de retour recommandée

La période de 25 ans figurant dans les manuels actuels devrait être remplacée par une période de 50 ans pour les grands ponceaux et les petits ponts et de 100 ans pour les grands ponts).¹¹

Divers paramètres ou "facteurs de stress" liés au changement climatique, tels que la température moyenne, les plages de température, le nombre de jours chauds par an, les précipitations moyennes

¹⁰ Il convient de les utiliser avec prudence et de comprendre leurs limites. Il existe une incertitude considérable sur des variables clés comme les précipitations à l'échelle locale, et ces cartes sont susceptibles de changer en fonction du choix du modèle climatique et de la méthode de réduction d'échelle.

¹¹ Au Danemark, les préoccupations relatives à l'augmentation des niveaux de précipitation entraînant des inondations et les craintes que les systèmes de drainage existants ne soient plus en mesure d'y faire face, ont conduit à une décision politique de construire tous les nouveaux systèmes de drainage 30 % plus grands que la norme afin de garantir une capacité suffisante pour faire face aux futures intensités de pluie (AIPCR, 2012)

et saisonnières, la baisse de l'humidité, l'augmentation de la vitesse des vents et les phénomènes météorologiques extrêmes, etc. pourraient tous contribuer à la nécessité de solutions techniques plus résistantes. Les changements dans l'intensité et la durée des précipitations sont probablement plus susceptibles d'avoir des influences majeures sur l'infrastructure routière que les changements réels des précipitations.

Les effets du climat sur les routes sont principalement étudiés à l'aide d'une forme de cartographie de l'humidité, comme la valeur N de Weinert ou l'indice d'humidité de Thornthwaite, ce dernier étant devenu plus populaire récemment. Ces deux indices sont principalement basés sur des données historiques de température, de précipitations et d'évaporation (ou évapotranspiration) et sur des cartes actualisées ou des données spécifiques à des sites individuels, indiquant leur évolution dans le temps, qui devront être élaborées pour la région de l'Afrique subsaharienne. Les paramètres d'entrée pour le calcul de ces indices sont normalement contrôlés régulièrement par les stations météorologiques locales et/ou les communautés agricoles. Les risques potentiels liés aux différents facteurs de stress climatique prévus pour les diverses installations routières à faible trafic et les structures associées, ainsi que leurs conséquences probables, sont examinés en détail ci-dessous et résumés plus en détail dans les Tableaux 16 à 22.

5.3 Les routes

Cette section traite des adaptations requises pour les routes en fonction des différents attributs de la route.

Il est intéressant de noter qu'au Ghana, il a été conclu que les solutions d'ingénierie nécessaires pour rendre une route résistante au climat peuvent dans une très large mesure être trouvées dans les manuels de conception existants, "des solutions aux problèmes liés à l'hydraulique, tels que l'affouillement et la sédimentation, aux problèmes de sols et de Sol support ainsi qu'à la stabilité des pentes et aux solutions de drainage de surface" (COWI, 2010). Le problème identifié est un manque d'entretien approprié et opportun. S'il est admis que les conceptions actuelles sont probablement suffisantes si elles sont mises en œuvre correctement et si elles sont dotées d'installations de drainage adéquates en cas d'événements extrêmes pour les infrastructures essentielles, il existe plusieurs adaptations ou décisions de conception spécifiques qui peuvent accroître la résilience des routes au changement climatique. Elles sont détaillées dans la suite de cette section.

5.3.1 Routes non revêtues

Les routes non revêtues sont des routes de terre ou de gravier. Les routes en terre peuvent être construites en utilisant le matériau in situ qui a été déplacé et façonné (routes en terre artificielle) ou le matériau in situ qui a "évolué" en une "route" par les véhicules qui se déplacent le long de celle-ci (routes en terre non artificielle - généralement construites au niveau du sol naturel). Les bonnes routes en gravier, par contre, sont construites avec du gravier sélectionné et bien compacté, résistant à l'érosion et à l'affaiblissement par l'eau et sont, par nature, généralement classées comme des routes tous temps. Il convient de noter que toutes les routes non revêtues, y compris les routes en gravier, peuvent être affectées par l'érosion sur des pentes raides en terrain montagneux ou vallonné ou par de longues périodes d'immersion sous l'eau.

Les principaux impacts climatiques sur les routes non revêtues sont liés à la présence d'un excès d'eau sur la surface de la route et dans la structure de la chaussée, ce qui est l'un des scénarios prévus pour de nombreuses parties de l'Afrique subsaharienne (**augmentation des précipitations ou événements extrêmes**). L'impact est également fortement lié à la durée et à l'intensité des précipitations.

L'augmentation des températures entraînera un assèchement et un rétrécissement (et une fissuration) plus rapides et plus prolongés des structures routières où des matériaux excessivement plastiques sont utilisés.

Toutefois, pour assurer une résilience climatique adéquate, les routes non revêtues doivent non seulement être conçues et construites de manière adéquate avec une bonne forme, mais doivent être régulièrement entretenues pour garantir que la forme est conservée et que la surface de la route évacue l'eau rapidement et efficacement, sans érosion excessive.

La résilience aux événements climatiques extrêmes des différents types de routes non revêtues est très différente et chacun d'entre eux est traité séparément ci-dessous.

5.3.1.1. Routes de terre non aménagées

Description

Dans le cas de routes en terre non aménagées, la qualité du matériel sur lequel les véhicules circulent (surface de roulement ou couche d'usure) est purement fonction du matériau in situ, qui est rarement conforme aux spécifications relatives aux graviers de bonne couche d'usure. Ce matériau n'a normalement été soumis qu'à un compactage par le trafic (généralement minime) et n'a pas de forme construite ou de drainage (Figure 5). Les routes en terre non aménagées sont donc très sensibles à toute une série de problèmes :

- Elles ont une faible résistance mécanique en raison de leur compactage minimal - les densités sont faibles, ce qui les rend plus perméables, plus faibles et plus sujettes à la déformation (cisaillement et orniérage) sous la circulation lorsqu'elles sont mouillées
- Elles se trouvent généralement au niveau ou au-dessous du niveau naturel du sol et les précipitations ne seront pas retirées de la surface de la route ou de l'environnement environnant, sauf si elles se trouvent sur une pente
- La circulation use d'abord les liants organiques (racines et herbe) et commence ensuite à développer une piste sous le niveau naturel du sol qui devient une voie d'écoulement pour les précipitations
- Les faibles forces et densités augmentent le potentiel de perte de matériaux par érosion hydrique et éolienne.



Figure 5 Route en terre typique non aménagée montrant les dommages causés par la rétention d'eau

Considérations relatives à la conception

Il n'y a rien à faire contre les routes de terre non aménagées en termes de conception de l'adaptation aux **changements de précipitations, de température ou d'événements extrêmes**. Même un entretien accru des niveleuses ne fera qu'abaisser la surface de la route davantage sous le niveau naturel du sol, ce qui ne fera qu'aggraver les problèmes.

Pour une route plus résistante, les routes en terre non aménagées doivent donc être améliorées en les façonnant et en les élevant au moins au niveau des routes en terre aménagées, mais de préférence à celui des routes en gravier correctement conçues, y compris en prévoyant un drainage latéral et transversal adéquat ainsi que des passages de rivière. Ce n'est que si le matériau naturel in situ satisfait aux exigences de spécification pour une couche de roulement en gravier qu'il doit être amélioré pour devenir une route en terre artificielle, auquel cas une mise en forme et un bon compactage sont nécessaires.

La principale influence du changement climatique sur les routes en terre non aménagées sera **l'augmentation des précipitations et la fluctuation du niveau des eaux souterraines, les changements de température et l'augmentation du vent** n'ayant qu'un impact minime, à moins qu'ils ne soient affectés par des inondations locales.

5.3.1.2 Routes en terre aménagées

Description

Les routes en terre artificielle sont toujours construites à partir de matériaux in situ, mais ces matériaux sont généralement déplacés lors de la formation des drains latéraux sur la surface de la route pour élever la route au-dessus du niveau naturel du sol et lui donner une meilleure forme en section transversale. Il en résulte un meilleur drainage de la surface de la route et une meilleure performance (figure 6). Toutefois, le degré de compactage appliqué aux surfaces de routes artificielles est normalement minime, voire inexistant, et aucun test de contrôle qualité n'est généralement effectué. En outre, les matériaux composant la couche de roulement sont rarement conformes aux spécifications nécessaires pour obtenir des graviers de bonne qualité. Leur performance n'est donc que légèrement supérieure à celle des routes en terre non aménagées lorsqu'elles sont soumises à un trafic important ou à des conditions météorologiques défavorables.



Figure 6 Route typique construite en terre montrant la structure façonnée et les drains latéraux

Considérations relatives à la conception

Comme c'est le cas pour les routes en terre non aménagées, à moins que le matériau in situ ne soit effectivement conforme aux spécifications prescrites pour la couche de roulement en gravier, on ne peut pas faire grand-chose pour les routes en terre aménagées en termes de conception de l'adaptation aux changements de précipitations, de température ou aux événements extrêmes. La surface de la route doit être surélevée bien au-dessus du niveau naturel du sol, et un drainage latéral et transversal adéquat ainsi que des passages de rivières doivent être prévus. Si le matériau est conforme aux spécifications nécessaires, il faut alors procéder à une construction correctement contrôlée, en veillant soigneusement à ce que le matériau surdimensionné excessif soit enlevé et que le degré de compactage spécifié soit atteint. En outre, la forme de la route (c'est-à-dire la chute transversale et le sommet) doit être soigneusement contrôlée. Dans l'ensemble, si les propriétés des matériaux in situ ne sont pas conformes aux spécifications relatives aux couches de roulement en gravier, la route doit être améliorée pour devenir une route en terre battue importée afin de garantir la résilience climatique.

La principale influence du changement climatique sur les routes en terre aménagées se manifestera à travers **l'augmentation des précipitations**, avec **les changements de température**, **l'augmentation de la vitesse du vent** et **la fluctuation du niveau des eaux souterraines** n'ayant qu'un impact minime, sauf en cas d'inondation localisée.

5.3.1.3. Routes en terre battue

Description

Les Routes en terre battue sont des routes bien construites sans revêtement bitumineux, en béton, en blocs ou autre revêtement de protection (figure 7). La composante technique des routes en gravier diffère toutefois considérablement d'une autorité routière à l'autre. Une route en terre battue doit être constituée d'une structure de forme appropriée, surélevée par rapport au niveau naturel du sol dans une mesure permettant des structures de drainage transversal appropriées. En outre, il convient de construire des drains latéraux et des drains à onglet (aiguillages) appropriés et de placer sur la structure de la chaussée une couche de roulement en gravier répondant à certains critères, avec ou sans "couche de base" sous-jacente, selon la qualité des couches de support. La couche de roulement doit être placée, compactée à une densité appropriée pour optimiser les avantages du gravier de bonne qualité et façonnée avec un taux de chute transversale de 4 à 5 % pour assurer un bon drainage de sa surface. Sans aucun de ces apports, le matériau sélectionné, aussi bon soit-il, sera rapidement perdu sous l'effet de la circulation et du climat, comme on le voit dans de nombreux pays d'Afrique subsaharienne.

Les accotements sont considérés comme faisant partie de la chaussée en gravier et doivent eux aussi être conçus et construits de manière à ce que la route évacue rapidement et efficacement toute l'eau de pluie, sans ramollissement, érosion ou affouillement important.

En fonction du trafic et du climat, et si un entretien périodique approprié et opportun est effectué, la couche de roulement devrait normalement durer entre 6 et 10 ans environ, après quoi elle sera usée (usure due au trafic et aux intempéries) et devra être remplacée. Une mauvaise construction (principalement un compactage insuffisant et une mauvaise sélection des matériaux) aura pour conséquence que le matériau ne durera même pas le minimum de 6 ans prévu. Si la route n'est pas regravellée en temps voulu avec un bon matériau, elle devient effectivement une route en terre aménagée et ne sera pas résistante au climat.

Outre les problèmes évidents liés aux **précipitations extrêmes** et à l'érosion des routes non revêtues, l'impact d'une **diminution des précipitations** sur les routes non revêtues sera notable. Les routes non revêtues se détériorent plus rapidement pendant la saison sèche, lorsque l'humidité de la couche d'usure s'assèche et que la cohésion effective due à l'aspiration du sol est perdue. Il en résulte des émissions de poussière plus importantes, la perte de la cohésion (dans la poussière), une plus grande propension à former des matériaux lâches et des ondulations et une perte de matériau plus rapide.



Figure 7 Route en terre battue typique montrant la structure façonnée et la couche de roulement en gravier

Considérations relatives à la conception

Une route de gravier correctement conçue et construite avec des matériaux de couche de roulement appropriés devrait pouvoir résister aux effets climatiques les plus sévères, sauf pour les routes à forte pente où elles pourraient être affectées par l'érosion (voir section 5.3.3.3).

L'excès d'eau (augmentation des précipitations ou événements extrêmes) est en réalité le seul attribut climatique susceptible d'avoir un effet significatif sur les performances des routes en gravier. Cette eau pourrait provenir de précipitations locales ou de pluies survenues quelque part au loin, qui s'écoulent dans les rivières voisines et provoquent des inondations, comme c'est le cas dans les vallées du Limpopo et du Zambèze au Mozambique. Dans ces régions, la solution optimale consiste à placer la route en dehors des limites normales d'inondation, mais cela est généralement irréalisable. L'alternative est de surélever la route au-dessus des niveaux d'inondation prévus, en incorporant de préférence un enrochement ou une couche de coupure capillaire sous la couche de roulement et les couches supérieures sélectionnées.

Pour obtenir la meilleure durabilité et la meilleure performance (et donc la meilleure résilience climatique), le matériau doit respecter autant que possible les spécifications liées à la performance. Un matériau déficient en termes de plasticité, de granulométrie ou de résistance n'aura pas une performance satisfaisante, sans un entretien accru, et ne sera pas résilient au climat.

Les spécifications types des matériaux de bonne couche de roulement en gravier sont résumées à la figure 8 pour les résultats des essais de matériaux utilisant des méthodes d'essai basées sur l'ASTM/AASHTO (lignes noires) et pour les résultats basés sur les méthodes d'essai BS (lignes rouges interrompues).

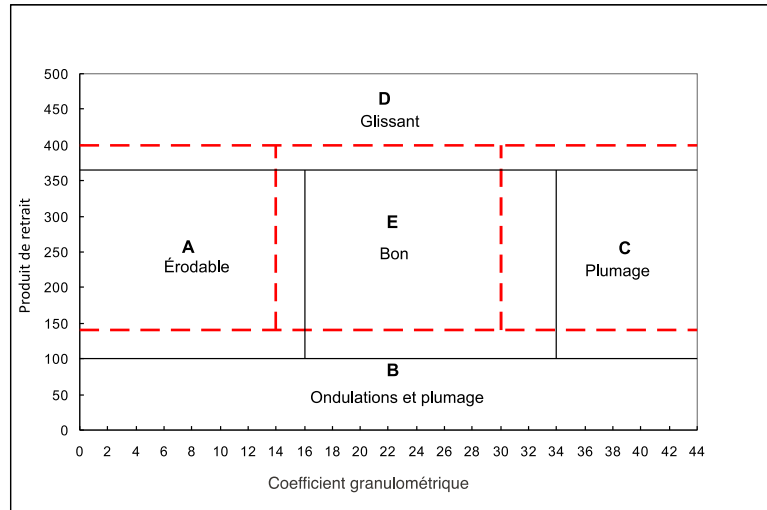


Figure 8 Spécification pour les graviers de la couche de roulement en utilisant les méthodes d'essai basées sur l'ASTM/AASHTO (lignes noires) et les méthodes d'essai BS (lignes rouges brisées)

Dans les zones où les *précipitations* devraient être *plus importantes* ou celles où l'on peut s'attendre à des *événements extrêmes plus fréquents*, il sera important de s'assurer que les produits de retrait minimums indiqués à la figure 8 sont maintenus et que les coefficients de classement restent entre les limites inférieure et supérieure respectives indiquées, c'est-à-dire 16 et 34 pour les essais ASTM et 14 et 30 pour les méthodes d'essai BS. Les matériaux dont les propriétés se situent en dehors de ces limites seront particulièrement sujets à l'érosion et aux dommages en cas de fortes précipitations.

Il sera tout aussi important que les routes soient construites correctement. Les exigences en matière de construction sont principalement que le matériau surdimensionné excessif soit retiré (ce qui interfère avec le compactage et rend les routes plus sujettes à l'érosion) et que le matériau de la couche de roulement (et des accotements) soit compacté à un minimum de 98% d'effort de compactage lourd, ou de préférence à une densité de refus. Une bonne forme de la section transversale de la route (chutes transversales de 3-4%) permettant un écoulement efficace de l'eau est également essentielle et doit être réalisée pendant la construction.

Un entretien régulier et de qualité des niveleuses doit être appliqué à la route. Cela doit permettre d'éviter la formation de dépressions (ornières ou nids de poule) dans la couche de roulement, de donner aux accotements une forme appropriée pour que l'eau s'écoule de la couche de roulement dans les drains latéraux et de ne pas laisser d'andains parallèles au bord de la route après le nivellement, ce qui empêcherait l'évacuation de l'eau de la surface de la couche de roulement.

L'entretien périodique doit également être adapté pour améliorer la résilience du réseau routier. Lors du rechargement ou de l'arrachage et du reprofilage, les propriétés des matériaux doivent être modifiées si nécessaire (généralement par l'élimination des pierres et/ou le mélange de matériaux supplémentaires) et la qualité de la construction peut être améliorée là où elle s'avère déficiente.

La génération de poussière sur les routes non revêtues est presque inévitable à partir de la plupart des matériaux qui ont une teneur importante en limon (fraction comprise entre 5 et 75 m environ). Dans les régions où *la saison sèche/sécheresse* s'allonge, il peut être nécessaire d'appliquer des palliatifs anti-poussières sur certains tronçons de route, comme ceux qui passent devant des écoles ou des cliniques, ou lorsque la géométrie et la distance de visibilité sont mauvaises, afin de réduire au

minimum la poussière supplémentaire provenant des routes sèches. Des produits chimiques tels que les lignosulfonates et les chlorures de magnésium/calcium sont généralement rentables dans ces cas. La perte de poussière réduit également la plasticité des matériaux, ce qui entraîne une formation plus rapide des ondulations, qui doivent être entretenues plus régulièrement. En général, les ondulations se forment plus rapidement que d'autres défauts et le traînage régulier avec des pneus traînants est un moyen rentable d'entretenir ces routes.

Dans certaines régions, même les routes de gravier correctement conçues et construites sont sujettes à des dommages permanents dus aux inondations, ce qui peut nécessiter un entretien coûteux et fréquent. Dans ces zones, il convient d'envisager des longueurs localisées de routes revêtues ou même en béton. Lorsque l'eau s'écoule sur la route, il convient de mettre en place des mesures visant à minimiser les turbulences, comme décrit pour les remblais (section 5.3.3.2).

5.3.2 Routes revêtues

Les routes revêtues à faible volume consistent généralement en une série de couches de matériau dont les propriétés s'améliorent vers le haut de la chaussée. Au-dessus de la couche de base se trouve une couche de roulement qui peut être constituée de divers matériaux, généralement un revêtement bitumineux mince (traitements de surface). Toutefois, on peut utiliser de l'asphalte mince, du béton, des blocs emboîtés, des pavés ou divers autres revêtements résistant aux intempéries.

Les routes revêtues peuvent être subdivisées en deux catégories : celles qui sont revêtues d'un revêtement bitumineux (asphalte ou traitements de surface) et celles qui sont revêtues d'un revêtement non bitumineux (béton, pavés autobloquants, galets, dalles, etc.). Leurs performances respectives en conditions humides et chaudes peuvent différer et elles seront donc traitées séparément en ce qui concerne leurs mesures d'adaptation.

Comme dans le cas des routes non revêtues, il peut y avoir des zones où les routes revêtues classiques avec des revêtements bitumineux minces ne sont pas efficaces et, là encore, il convient d'envisager de les maintenir dans un état non revêtu (concept de conception optimisée sur le plan environnemental) avec la capacité prévue d'appliquer un entretien plus fréquent lorsque cela est nécessaire, par exemple après de graves inondations.

5.3.2.1. Routes à revêtement bitumineux mince

Description

Le bitume est la partie la plus importante des revêtements bitumineux souples et minces (traitements de surface) en termes d'imperméabilisation de la structure de la chaussée, et la détérioration de celle-ci entraînera la dégradation et la défaillance éventuelle du revêtement. Les liants bitumineux se détériorent par la perte de substances volatiles et l'oxydation, qui sont renforcées par **les températures élevées et l'augmentation du rayonnement ultraviolet**. Cette détérioration du bitume entraîne le durcissement et le séchage du bitume et, en fin de compte, la fissuration du joint et l'infiltration d'eau dans la chaussée si les fissures ne sont pas entretenues à temps. Les joints et le rajeunissement du liant peuvent contribuer à prolonger la durée de vie du liant.

Inversement, l'un des problèmes posés par les pressions d'eau élevées sous une surface routière intacte ou non fissurée est que, sous la pression hydraulique imposée, le revêtement imperméable peut entraîner des pressions de soulèvement élevées sous celui-ci, ce qui provoque le soulèvement et la désintégration du revêtement (figure 9).



Figure 9 Perte de surface causée par de fortes pressions de soulèvement lors d'une inondation¹²

Des conditions d'eau extrêmes et une saturation prolongée inonderont les couches structurales sous le revêtement, ce qui entraînera l'affaiblissement de ces matériaux et la défaillance structurelle de la route.

Les revêtements bitumineux minces typiques des routes doivent généralement être rajeunis ou rescellés tous les 7 à 10 ou 12 ans, selon la nature du revêtement bitumineux. Les adaptations nécessaires au type de bitume et à la conception de l'étanchéité en fonction du changement climatique peuvent donc être introduites progressivement au fil du temps lors de ces interventions d'entretien périodiques.

Considérations relatives à la conception

Les principales adaptations de conception en termes de revêtements bitumineux consisteront à utiliser des bitumes qui sont continuellement modifiés au fil du temps par les producteurs pour offrir une meilleure résistance à la détérioration climatique. L'utilisation de joints multiples assure également une meilleure protection du bitume en profondeur et sera donc légèrement plus résistante à la fissuration et à la détérioration dans le temps.

L'augmentation de la teneur en humidité de sol support due à **des précipitations accrues ou à des événements extrêmes** entraînera des déformations plus importantes de la chaussée sous forte charge, qui à leur tour provoqueront une fissuration par fatigue plus rapide des liants vieillissants qui se sont raidis. L'application périodique et contrôlée de rajeunisseurs de liants ou de brumisateurs d'émulsion diluée peut maintenir le bitume dans un état plus ductile et éviter dans une large mesure de telles fissures. D'autre part, la réduction de la teneur en humidité du sol support en raison de **précipitations plus faibles, de températures plus élevées ou d'un abaissement général des eaux souterraines** entraînera une diminution des déformations et du potentiel de fissuration par fatigue. Toutefois, si le sol support se dessèche avec un retrait important, des fissures de la structure de la chaussée sus-jacente pourraient se produire. Un bon drainage de l'environnement routier est essentiel pour minimiser ces fluctuations d'humidité (voir section 5.5).

¹² Photographie : Ministère des transports et des routes principales, Queensland, Australie

Dans les zones où **les précipitations sont susceptibles d'augmenter**, il sera important d'éviter les conceptions de chaussée qui produisent un effet de "baignoire", c'est-à-dire où la structure de la chaussée est plus perméable que les couches environnantes, ce qui entraîne une accumulation d'eau dans les couches structurelles de la chaussée et le développement de fortes pressions d'eau interstitielle sous la charge du trafic. Le meilleur moyen d'y parvenir est de veiller à ce que les couches (en particulier la base et l'assise) se prolongent jusqu'au bord de la structure et ne se terminent pas sous le bord de la zone revêtue.

Il est bien connu que les matériaux à l'intérieur et sous la structure de la chaussée atteignent une teneur en eau d'équilibre dans les zones centrales de la chaussée, en dehors de la " zone de mouvement saisonnier de l'humidité". Les taux d'humidité réels à l'équilibre se situent généralement entre environ 55 et 85 % de la teneur en eau optimale (TEO) dans les couches structurelles et à peu près à la TEO dans le Sol support. Les modèles de prévision de ces valeurs utilisent les propriétés des matériaux de sol support et le climat, en termes d'indice d'humidité de Thornthwaite (Im). Si le changement climatique devait entraîner **une diminution significative des précipitations et une augmentation de l'évapotranspiration**, ces chiffres pourraient changer légèrement, mais il est très peu probable que les matériaux dans la zone d'humidité d'équilibre se dessèchent au point de provoquer un retrait qui entraînerait des fissures.

Toutefois, dans la zone de mouvement saisonnier de l'humidité (entre 1 et 1,5 m du bord du revêtement), la variation peut être nettement plus importante, entraînant un retrait et une fissuration. Une façon d'éviter cela est d'éloigner la zone de variation saisonnière de l'humidité de la chaussée, en scellant les accotements avec un revêtement imperméable et en minimisant le trafic de ces accotements. L'étanchéification des accotements avec un autre type de joint (par exemple, un double joint sur la chaussée et un joint simple sur l'accotement) est souvent utilisée pour délimiter la chaussée et pour des raisons de sécurité. Un mauvais scellement des accotements peut toutefois entraîner des fissures et un effritement du joint d'accotement (figure 10), qui à leur tour peuvent provoquer une plus grande variation saisonnière de l'humidité dans la chaussée, ce qui peut entraîner un retrait et une fissuration.

L'aplatissement des pentes de talus (à 1:4 V:H de préférence avec des matériaux argileux) peut également contribuer à réduire les mouvements d'humidité.



Figure 10 Détérioration de l'accotement du joint à un seul éclat par rapport au joint à deux éclats sur la chaussée

Dans les zones où le drainage de l'environnement de la chaussée est difficile et où la formation a une hauteur insuffisante, des inondations périodiques risquent d'entraîner une augmentation de la teneur en humidité des couches structurelles supérieure à la MOC (jusqu'à environ 125 % à l'état saturé) et une diminution significative des propriétés structurelles de ces couches. Dans certains cas, il peut être nécessaire de fermer la route ou d'imposer des mesures de restriction de charge après des périodes de pluie intense/extrême ou des inondations. De telles restrictions sont toutefois généralement difficiles à contrôler et à faire respecter et doivent être évitées autant que possible.

Au fur et à mesure que les technologies des chaussées se développent et sont mises en œuvre, certains des développements les plus innovants tels que les "chaussées à rétention d'eau" qui ont une sous-couche constituée de matériaux de rétention d'eau qui absorbent l'humidité et l'évaporent ensuite par capillarité lorsque la chaussée se réchauffe ou les "chaussées à écran thermique" qui réfléchissent le rayonnement infrarouge proche par l'application de matériaux de revêtement spéciaux sur leurs surfaces peuvent en fait bénéficier des changements climatiques.

En résumé, en dehors de la bonne ingénierie normale, les mesures d'adaptation pour les revêtements bitumineux sont probablement les plus susceptibles de se prendre d'elles-mêmes, car les liants évoluent avec le temps pour s'adapter aux conditions changeantes.

L'entretien régulier des revêtements restera toutefois essentiel.

5.3.2.2. Revêtements bitumineux

Description

Bien que ce ne soit pas très courant, certaines routes à faible trafic peuvent être revêtues d'asphaltes fins mélangés à chaud ou à froid. L'asphalte est un matériau visco-élastoplastique dépendant de la température et, en tant que tel, il est fortement affecté par les températures élevées et basses. Il est aussi généralement plus coûteux que les joints traditionnels par pulvérisation. Des réductions significatives de la température rendront l'asphalte plus rigide et plus susceptible de se fissurer sous

de lourdes charges, tandis que des augmentations significatives de la température donneront un asphalte plus mou, plus susceptible à la formation des ornières et de se déformer sous l'effet du trafic (figure 11). Étant donné que l'asphalte n'est pas utilisé fréquemment sur les routes à faible trafic et que le nombre de véhicules lourds est généralement faible, il est peu probable que cela constitue un problème majeur dans la plupart des zones rurales.

En outre, comme la durée de vie d'une nouvelle couche de revêtement en asphalte est généralement de 10 à 15 ans, après quoi elle est recouverte ou recouverte d'un autre type de joint, des ajustements de sa conception peuvent être effectués à intervalles réguliers pendant sa durée de vie. Il est peu probable que la conception en fonction de différentes conditions de température à l'avenir influence le coût du re-surfage, car il n'y a que de faibles différences entre les coûts des différents types de bitume, nécessaires pour adapter la conception à des températures différentes.

Il convient de noter qu'il existe actuellement de fortes variations saisonnières et quotidiennes de la température à l'intérieur des routes, et les changements attendus à long terme seront probablement minimes en ce qui concerne ces variations. Les températures à des profondeurs de 20 et 200 mm dans la route ainsi que la température de l'air ambiant ont été surveillées par le CSIR dans divers types de routes en Afrique du Sud sur une période de près de deux ans. La figure 12 montre la fluctuation quotidienne et saisonnière des températures de l'air et de la route in-situ de la route N14-5 près d'Upington. En général, la plage des températures de l'air se situait entre -6 et environ 50°C, tandis que la température de la route supérieure variait entre 4 et 60°C et, à une profondeur de 200 mm, entre 9 et 48°C. La question de savoir si un changement de température de 3 ou 5°C au fil du temps aurait un impact notable sur une telle route se pose alors.



Figure 11 Orniéage et déformation de l'asphalte résultant des températures élevées et de la charge du trafic

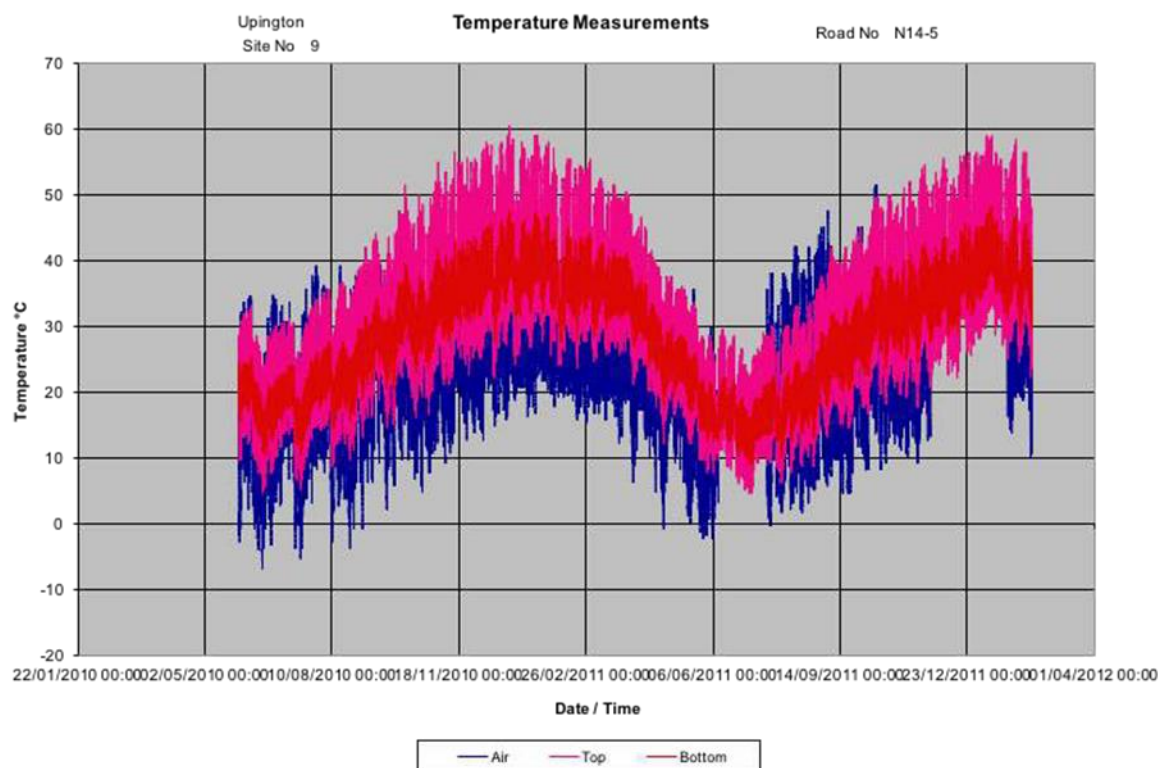


Figure 12 Fluctuation quotidienne et saisonnière des températures de l'air et de la route (bleu = air, rose = 20 mm sous la surface de la route et rouge = 200 mm sous la surface de la route)

Généralement, pour les conceptions en asphalte, les critères de conception comprennent la moyenne et l'écart type de la température maximale moyenne annuelle de l'air sur 7 jours et de la température minimale annuelle de l'air sur 1 jour. Ils sont convertis en températures annuelles moyennes maximales sur 7 jours et minimales sur 1 jour en utilisant des données standard. Ce qui est le plus susceptible de changer à l'avenir est le nombre de jours extrêmement chauds par an (c'est-à-dire les jours où la température est supérieure à 35 °C), qui devrait doubler dans de nombreuses régions d'Afrique subsaharienne au cours des 50 à 80 prochaines années (le Roux, 2016).

Comme il y a une tendance internationale à classer les liants bitumineux selon la spécification de classement des performances (PG), qui est essentiellement basée sur la température, les problèmes concernant les variations de température seront réduits. La classification PG utilise une plage de température minimale et maximale pour chaque liant, par exemple, un bitume PG 76-28 aurait une performance comprise entre moins 28°C et plus 76°C. Les basses températures seront rarement rencontrées en ASS (c'est-à-dire que le minimum le plus bas est d'environ -10°C et les températures supérieures d'environ 80°C) : elles sont généralement plus élevées que celles normalement rencontrées sur la plupart des routes à faible circulation en ASS.

Considérations relatives à la conception

L'asphalte est normalement conçu pour donner les meilleurs résultats dans une plage de température donnée, ce qui inclut les minima et maxima attendus.

Dans les régions où l'on **prévoit des températures plus élevées ou des périodes plus longues de températures extrêmes** (> 35°C), il convient d'utiliser des liants bitumineux ayant un point de

ramollissement légèrement plus élevé ou des liants modifiés. Cela peut se faire de manière continue et il est probable que les propriétés des liants évolueront avec leur modification par les fournisseurs à mesure **que les températures augmenteront** avec le temps. Comme chaque route est rescellée ou recouverte lors d'interventions d'entretien périodique ou d'amélioration structurelle planifiées, cette modification peut être incluse et il n'est pas vraiment nécessaire d'intervenir de manière proactive. **Lorsque les températures devraient diminuer**, il peut être plus souhaitable d'utiliser des bitumes à points de ramollissement légèrement inférieurs pour favoriser leur durabilité et minimiser les fissures excessives dues à une rigidité plus élevée.

L'augmentation des précipitations exigera que les dommages aux revêtements bitumineux soient réparés à temps pour éviter que l'eau ne pénètre dans la chaussée. Cela peut également entraîner des déformations plus importantes de la chaussée, nécessitant des couches d'asphalte légèrement moins rigides pour minimiser les éventuelles fissures de fatigue.

Certains principes de conception de l'asphalte, par exemple la température maximale moyenne de l'air sur 7 jours, devront être adaptés au fil du temps.

5.3.2.3. Revêtements en béton

Description

Les routes avec une couche supérieure en béton sont probablement les plus résistantes de toutes les routes "revêtues" aux effets des intempéries (les revêtements traditionnels en béton sont généralement conçus pour durer 30 ans), mais leur utilisation est plutôt limitée dans la fourniture de routes à faible volume dans des zones à problèmes restreints, comme les pentes très raides, les zones courbes en montée et dans les zones bâties sans évacuation appropriée des eaux (usées).

Le béton est un matériau d'ingénierie à haute résistance conçu spécifiquement pour la situation dans laquelle il sera utilisé et qui résiste à l'érosion et à la déformation. Différents types de routes en béton peuvent être mis en œuvre, y compris le béton joint et le béton armé en continu, ainsi que le béton compacté au rouleau. Toutefois, les problèmes liés à une dilatation thermique excessive lorsque les mouvements aux deux extrémités du bloc sont contraints peuvent entraîner un flambage et un soulèvement, en particulier dans le cas du béton armé en continu à couche mince (figure 13). Ce phénomène pourrait être exacerbé si le nombre de jours consécutifs très chauds augmente.



Figure 13 Soulèvement d'une route en béton armé continu à couche mince résultant de la dilatation thermique

Bien que les chaussées en béton soient généralement plus résistantes aux effets climatiques que les chaussées bitumineuses, le risque d'érosion des couches sous-jacentes et des supports de bordure reste élevé en cas **d'événements extrêmes** et pourrait donc entraîner un "sapement" et un effondrement de la chaussée en béton. L'eau ne risque généralement de pénétrer et d'affecter les routes en béton qu'à partir des accotements, des fissures de dilatation non colmatées et des nids de poule et fissures non réparés. Un bon entretien des bords des routes en béton est donc essentiel.

Considérations relatives à la conception

Pour éviter le flambage des routes en béton dans des conditions prolongées **de température élevée**¹³, il faudra veiller à ce que des joints de dilatation appropriés soient inclus dans le béton, même dans les couches renforcées en continu. Ces joints devront être suffisamment larges pour s'adapter à une éventuelle augmentation de la dilatation et devront être entièrement scellés avec une pâte d'étanchéité caoutchoutée pour éviter l'entrée d'eau. Les mastics de jointoiment devront être régulièrement vérifiés et remplacés s'ils présentent des signes de décollement ou d'assèchement.

Il est de la plus haute importance que les accotements des routes en béton soient maintenus en bon état par un entretien régulier, à la hauteur du revêtement en béton ou légèrement en dessous, et qu'ils soient capables d'évacuer efficacement l'eau de la dalle en béton vers les drains latéraux. Toute accumulation d'eau sur l'accotement adjacent à la dalle s'infiltrera dans les couches sous-jacentes, ce qui pourrait entraîner un affaiblissement et une rupture des bords de la dalle.

5.3.2.4 Autres revêtements non bitumineux

Description

De nombreux types de revêtements constitués d'éléments discrets (par exemple des blocs emboîtés, des pavés, des pierres emballées à la main, etc.) peuvent être utilisés pour les routes à faible circulation, en particulier lorsque les techniques de construction à haute intensité de main-d'œuvre sont appropriées. Presque tous ces revêtements comprennent des ouvertures entre les différents blocs qui permettent à l'eau de pénétrer à travers le "revêtement" dans les couches de support sous-jacentes. La circulation sur les routes dans cet état entraînera inévitablement la déformation des blocs et la défaillance de la route (figure 14). Le principal avantage de ce type de construction est toutefois que les blocs peuvent être retirés manuellement, que les couches de support peuvent être renforcées (par exemple par l'ajout de matériaux ou d'agrégats plus résistants ou même par une stabilisation chimique localisée, le cas échéant) et que les blocs peuvent être remplacés.

¹³ L'albédo peut être augmenté en utilisant des agrégats blancs pour réduire le gain de chaleur solaire. Les matériaux de pavage à albédo élevé sont des matériaux de couleur claire qui réfléchissent la lumière du soleil loin de la surface. Moins la lumière du soleil est absorbée par la chaussée, moins celle-ci rayonne de chaleur.



Figure 14 Dommages subis par une route en pierre emballée à la main après une inondation

Considérations relatives à la conception

Il est recommandé de ne pas utiliser de revêtements constitués d'éléments discrets dans les zones susceptibles d'être inondées ou débordées par les rivières en raison **de l'augmentation des précipitations ou de la fréquence des événements extrêmes**. Ils peuvent être utilisés dans les zones d'approche mais les revêtements en béton sont généralement la meilleure alternative dans les zones réelles susceptibles d'être inondées. Le Rollcrete est une forme de béton utile pour ces zones. Lorsque des revêtements à éléments discrets sont utilisés pour des raisons spécifiques, il est préférable qu'ils soient posés sur un sol support solide et bien compactée (CBR > 30 %) et sur une fondation résistante au climat (probablement stabilisée chimiquement). Le coulis entre les différents éléments peut être réalisé en utilisant une pâte de ciment sur toute la profondeur de l'élément, mais cette pratique pourrait réduire la souplesse de portance du système de chaussée (c'est-à-dire que la couche pourrait se comporter comme une chaussée faiblement rigide si elle n'est pas dotée d'un support solide).

5.3.3 Travaux de terrassement

Les principaux types de terrassement considérés dans la présente ligne directrice sont les déblais et les remblais (remblais) - les formations conventionnelles nécessaires pour élever la route au-dessus du niveau naturel du sol sont traitées aux sections 5.3.1, 5.3.2 et 5.5. Les déblais sont considérés comme toute excavation à travers le sol ou la roche in situ de telle sorte qu'il reste une pente non soutenue après l'achèvement de l'excavation. Cela peut se produire sur un seul côté de la route (coupe latérale) ou sur les deux côtés (coupe en boîte). Les glissements de terrain sont considérés comme des événements naturels affectant de grandes pentes, mais ils peuvent être déclenchés par des excavations de construction si leur conception n'est pas soignée (par exemple, le sapement de pentes plus élevées, le surremplissage de pentes, etc.)

Les remblais sont conçus et construits à partir de matériaux importés placés de manière à élever le niveau de la route au-dessus du sol naturel et des niveaux d'eau prévus. Ils peuvent être construits sur le flanc d'une colline, dans une vallée, sur un terrain plat pour élever le niveau de la route à des fins de drainage ou comme approche ou butée de pont. Elles peuvent également être associées à des environnements fluviaux ou côtiers, estuariens ou marins. Il est important que les remblais construits

sur un terrain en pente soient soigneusement conçus pour que l'eau ne pénètre pas dans la structure du remblai. Une coupure et des drains internes appropriés doivent être incorporés dans la conception.

Outre les fermetures de routes rurales en raison de dommages causés par les inondations, la cause la plus fréquente de fermeture de routes rurales est probablement la rupture de pente/glisement de terrain, soit en incluant une partie de la route, soit en plaçant du matériel sur la route par le haut (figure 15), ce qui bloque et endommage la route. Les fermetures dues à l'instabilité des pentes peuvent être coûteuses et longues à réparer.



Figure 15 Fermeture d'une route pour cause de rupture de pente. Notez la déviation à gauche créée pour contourner la rupture

Des enquêtes récentes au Népal¹⁴ ont montré que la mauvaise construction des routes, associée à de fortes précipitations, a entraîné une augmentation marquée du nombre de glissements de terrain dans diverses régions. Les habitants (Himalaya Times, 2016) ont indiqué que "l'utilisation aléatoire d'équipements lourds pour la construction de routes a entraîné des problèmes ; ailleurs, les forêts nationales et communautaires sont détruites pour des projets de construction de routes". Il faut garder à l'esprit que les excavations incontrôlées au pied des hautes pentes naturelles et l'absence de drainage superficiel et souterrain approprié entraîneront inévitablement une instabilité des pentes, comme nous le verrons dans les sections suivantes (section 5.3.3.1 et sections 5.7 et 5.8).

La présente ligne directrice n'a pas pour but de décrire en détail les exigences des enquêtes et des analyses de stabilité, mais de fournir quelques indicateurs qui aideront les évaluateurs et les nouveaux concepteurs à déterminer quand une intervention géotechnique spécialisée est nécessaire pour les pentes. Il existe également de nombreux textes complets qui traitent des techniques d'investigation et des contre-mesures possibles en cas d'instabilité des pentes (Turner et Schuster, 1996 ; AIPCR, 1997).

Il est conseillé d'inclure, dans le cadre du système de gestion du patrimoine de toutes les autorités routières, au moins un système de gestion des pentes (SGP) de base allié à une cartographie de la susceptibilité à l'instabilité qui identifie le potentiel de défaillance et les conséquences de la défaillance de toutes les pentes relevant de leur juridiction. Les pentes à haut risque du réseau routier rural peuvent alors faire l'objet d'une attention prioritaire, ou au moins d'une surveillance régulière. Cette

¹⁴ <http://blogs.agu.org/landslideblog/2016/07/29/2016-monsoon-1/>

surveillance est normalement effectuée au niveau stratégique pour le réseau routier, tandis que les activités de surveillance proprement dites seraient menées au niveau tactique ou opérationnel.

Il est important de reconnaître qu'aucune conception économique n'est une garantie contre l'échec et que la probabilité d'échec est rarement nulle - le risque est seulement réduit à des normes d'ingénierie acceptables. Il est donc important d'estimer la probabilité de défaillance et les conséquences potentielles en termes de pertes de vies humaines, d'interruptions de l'accessibilité et de coûts économiques globaux.

5.3.3.1. Déblais

Description

Une des principales causes de défaillance des déblais (instabilité) est **l'augmentation du niveau d'eau** dans les pentes des déblais, entraînant une diminution de la résistance des matériaux en raison d'une pression excessive de l'eau interstitielle. La plupart des pentes naturelles sont en équilibre avec l'environnement/climat dominant (c'est-à-dire qu'elles ont un facteur de sécurité proche de l'unité dans les pires conditions d'humidité existantes (et historiques récentes) (et sismiques, le cas échéant) et toute perturbation, en particulier au pied de la pente, pendant la construction de la route entraînera une réduction de ce facteur de sécurité et un risque de défaillance lorsque les conditions d'humidité dans la pente se détérioreront.

L'expérience a montré que les précipitations antérieures sont probablement aussi importantes que les nouvelles précipitations pour déclencher l'instabilité de la pente. **Des précipitations importantes après des périodes sèches** entraînent rarement une instabilité à grande échelle, tandis que des précipitations modérées après des périodes humides prolongées sont beaucoup plus susceptibles de provoquer une instabilité majeure (Fourie, 1996).

Différentes techniques sont nécessaires pour l'évaluation de la stabilité des nouveaux aménagements routiers et de ceux qui existent déjà, et elles sont examinées séparément.

Les nouvelles routes

Lors de l'étude et de la conception de nouvelles routes, une évaluation des problèmes potentiels d'instabilité des pentes est (ou devrait être) effectuée. Cela implique un examen de la topographie, de la géologie, des propriétés des sols et des roches, de l'altération climatique, du drainage des eaux de surface et des eaux souterraines, ainsi qu'une inspection des pentes existantes et de l'historique des instabilités dans la région, et il est préférable de confier cette tâche à un spécialiste en géotechnique ou en ingénierie géologique. Les coupes susceptibles d'avoir des conséquences importantes en cas d'échec doivent être conçues par des experts géotechniques en intégrant les mesures de stabilisation nécessaires. Cela impliquerait une évaluation du potentiel de défaillance (soit à l'équilibre limite, soit probabiliste) nécessitant des données telles que le mode de défaillance probable, les propriétés de résistance au cisaillement et de densité des sols et des roches concernés et les conditions probables d'infiltration et de nappe phréatique. Des études de site soigneusement conçues et menées sont nécessaires pour obtenir les informations requises sur la conception.

Pour les routes rurales à faible volume, les déblais doivent être limités en profondeur autant que possible afin de minimiser les coûts d'excavation, même souvent au détriment de normes géométriques réduites. Il est toutefois souvent plus rentable de traiter l'instabilité pendant la construction plutôt que de dépenser de grosses sommes d'argent pour l'enquête préliminaire et la prévention de l'instabilité. Cela a bien sûr des implications en termes d'accords contractuels et de retards et réclamations potentiels.

Il faut être particulièrement vigilant lorsque des structures importantes (par exemple, des barrages, des chemins de fer ou des pipelines) ou des habitations sont situées sous une coupe et que toute défaillance qui en résulterait pourrait entraîner le déplacement de grandes masses de terre ou de roche vers ces aménagements.

Pour aider à déterminer quand il convient de consulter un spécialiste en géotechnique ou en pente, on peut utiliser le Tableau de décision présenté à la figure 16. L'effet de la coupe au pied d'une pente plus élevée (étape 2 de la figure 16) et l'impact sur le versant adjacent (strates rocheuses plongeantes) sont illustrés à la figure 17.b, en comparaison avec le plus petit volume de matériau susceptible d'être affecté dans des coupes moins profondes, comme le montre la figure 17.a.

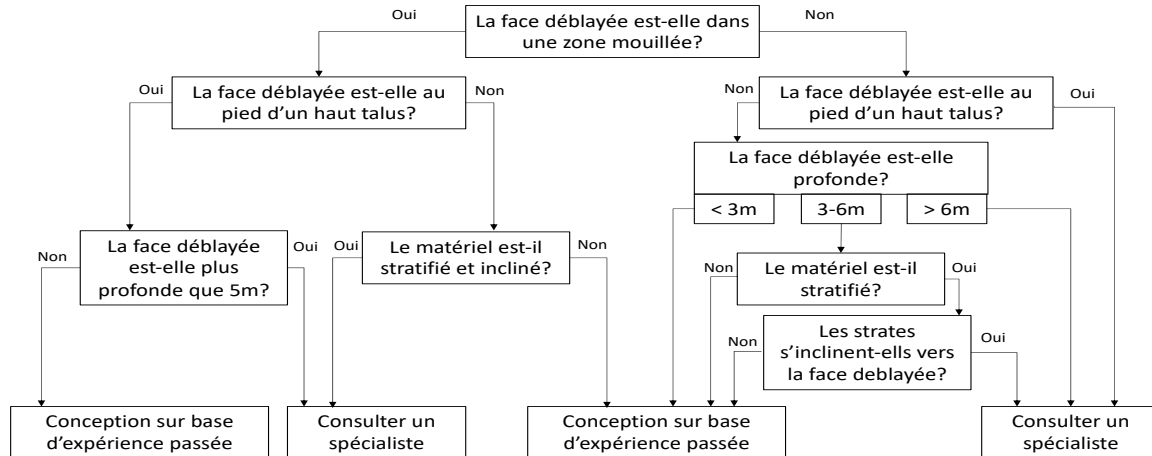


Figure 16 Diagramme de décision pour la conception des déblais routiers

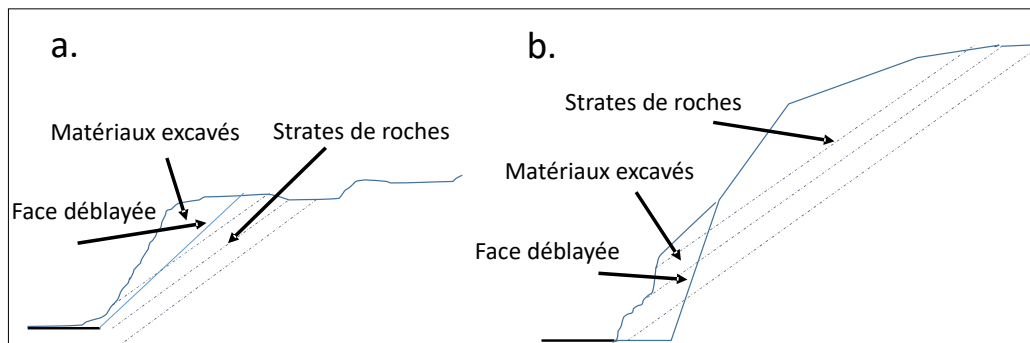


Figure 17 Effet de la topographie sur le volume de matériau défectueux

Routes existantes

Une évaluation de la stabilité des pentes existantes est nécessaire pour identifier celles qui présentent un potentiel de défaillance important. Les procédures d'évaluation standard telles que les arbres déformés, la déformation des clôtures, le bombement des pointes des pentes, l'infiltration d'eau, la présence de fissures de tension, etc. devraient fournir une indication précoce des problèmes potentiels qui nécessitent une évaluation plus approfondie.

L'un des problèmes majeurs posés par les pentes est l'élimination soudaine de la végétation dense, y compris des arbres, au-dessus et derrière la pente. De nombreux cas d'effondrement de pentes sont dus à l'augmentation de la nappe phréatique dans la pente après l'enlèvement des arbres, qui ont

littéralement pu "évaporer" de grandes quantités d'eau du sol avant leur enlèvement. En outre, à mesure que les racines de la végétation meurent et se décomposent, leur effet de liaison/renforcement sur le sol se perd, ce qui réduit effectivement la résistance au cisaillement du sol.

L'augmentation du risque de feux de friches affectera également les pentes. Outre l'effet de l'impact accru des gouttes de pluie sur le sol exposé après le brûlage, qui entraînera un ameublissement et une élimination plus faciles du sol (érosion) par l'eau, l'effet de liaison sur le sol des racines des plantes qui sont détruites par le feu sera perdu, ce qui augmentera encore le potentiel d'érosion.

Considérations relatives à la conception

Les mesures d'adaptation pour les coupes et les remblais sont très similaires. Les principales différences sont que les remblais sont construits de manière contrôlée à partir de matériaux aux propriétés connues/contrôlées et de drainage, tandis que les déblais conservent la nature de la géologie/sol existant avec des propriétés, des structures géologiques et des régimes hydriques variables.

La principale influence sur la stabilité des déblais et des remblais est l'effet de l'eau. Dans les zones où **l'on s'attend à une augmentation des précipitations**, on peut également s'attendre à une augmentation de l'instabilité. Toutefois, dans de nombreuses régions, les précipitations devraient diminuer, mais l'incidence des **événements extrêmes** devrait augmenter. Si l'assèchement général des pentes se produit, les événements extrêmes auront un impact moindre sur la stabilité en raison du concept de précipitations antérieures. Toutefois, si deux ou plusieurs événements extrêmes se produisent rapidement l'un après l'autre, il est très probable que les pentes légèrement stables ne se stabiliseront pas, mais il n'est pas possible de concevoir toutes les pentes en fonction de cette éventualité.

Il existe généralement des meilleures pratiques locales et internationales qui doivent être appliquées lors de la conception, de la construction et de l'assainissement des coupes et des remblais et qui peuvent contribuer à minimiser l'apparition d'instabilité des pentes (par exemple, Keller et Sherar, 2003). Ces coupes et remblais sont mieux étudiés et conçus par des spécialistes géotechniques expérimentés dans la région, avec ses conditions microclimatiques et matérielles uniques.

De nombreuses techniques de stabilisation des pentes sont disponibles pour augmenter la stabilité des pentes, mais elles sont pour la plupart coûteuses et nécessitent des conceptions sophistiquées par des spécialistes géotechniques expérimentés, certainement pour les pentes plus élevées. Pour les routes à faible volume, il est plus habituel de minimiser les excavations et d'utiliser des techniques de protection des pentes moins coûteuses, telles que des drains de coupure soigneusement situés et de petites structures de retenue (paniers en gabions, structures de retenue, etc.) pour améliorer la stabilité. Dans les rares cas où des excavations plus importantes ou des excavations qui suppriment le pied de pentes élevées sont nécessaires pour les routes à faible volume, une étude géotechnique complète doit être réalisée par un spécialiste en géotechnique pour garantir la conception la plus rentable et la plus stable. Des méthodes détaillées à cet effet sont examinées dans des manuels tels que Turner et Schuster (1996).

Généralement, les coupes sont conçues en utilisant un facteur de sécurité (FoS), qui indique que les pentes seront stables dans la plupart des conditions mais pourraient éventuellement se rompre lors d'événements extrêmes. Un FoS de 1,5 est généralement utilisé pour la plupart des coupes et des remblais, qui passent généralement par plusieurs décennies sans défaillance. Il ne serait pas viable

d'appliquer une augmentation générale du FoS de 1,7 pour tenir compte du changement climatique. Le coût de cette mesure serait exorbitant et, en fin de compte, seul un petit pourcentage de l'ensemble des pentes bénéficierait de l'augmentation des coûts.

Les zones susceptibles d'être sujettes à l'instabilité auraient normalement une classe de route inférieure en termes de normes géométriques, ce qui serait à la fois moins cher à construire et moins coûteux à réparer et à entretenir en cas de rupture de pente - ceci devrait aller de pair avec la priorité de la route mais de préférence avec des normes horizontales et verticales moins strictes pour minimiser les travaux de terrassement et les vitesses de conception plus faibles. Toutefois, les nouveaux tracés dans les zones montagneuses risquent de s'avérer particulièrement problématiques et nécessiteront généralement l'intervention de spécialistes en géotechnique.

Il est possible d'installer des systèmes d'alerte précoce relativement simples pour l'instabilité potentielle des pentes et des remblais - les piézomètres, extensomètres, inclinomètres, etc. sont tous relativement simples, mais peuvent être sujets au vandalisme et au vol, à moins qu'une participation adéquate de la communauté ne soit incluse dans leur installation, leur surveillance et leur entretien. Toutefois, si un système de gestion des pentes (SGP) est mis en œuvre, généralement dans le cadre du système global de gestion des actifs, les pentes potentiellement instables peuvent être prioritaires pour les mesures correctives et la stabilisation dans le cadre du plan de résilience climatique. La mise en œuvre de cartes d'incidents de rupture de pente doit être envisagée, qu'elle soit intégrée dans un SGS ou développée indépendamment de celui-ci. Par conséquent, un système de gestion de la sécurité comprendra des inspections régulières des pentes et donc une réduction de la probabilité de défaillances catastrophiques.

En ce qui concerne les effets directs du changement climatique, dans des scénarios **de précipitations plus importantes**, il est essentiel, pour contrôler l'excès d'eau, de disposer d'intercepteurs de surface et de drains de coupure bien conçus et bien calibrés derrière la crête des pentes. Il est également essentiel de contrôler l'eau qui s'infiltre hors des pentes au niveau de leurs "orteils" et les drains de surface situés entre le pied de la pente et la structure de la route contribueront à contrôler l'infiltration sous la pente dans les structures de la chaussée. **Les changements de température** peuvent affecter l'intégrité des pentes rocheuses - des changements volumétriques plus importants peuvent se produire sous des températures plus élevées et plus variables et ainsi les fractures/discontinuités pourraient s'ouvrir plus rapidement et plus largement. Dans la plupart des cas, une aridité accrue se traduira par une amélioration des conditions de stabilité.

L'écoulement incontrôlé de l'eau vers le bas des pentes peut entraîner une érosion importante et il est important de recueillir la plus grande partie de l'eau au sommet de la pente et de la détourner de la pente réellement exposée. Le meilleur moyen d'y parvenir est d'utiliser un "collecteur d'eau" situé juste derrière (à moins d'un mètre) le point de rupture de la pente. Il est important que ce drain soit bien calibré et qu'il évacue efficacement l'eau sur les côtés de la pente pour la drainer au pied. Selon le type de matériau (absorbant et très perméable notamment), il peut être nécessaire de bétonner les drains d'eau de pluie. Ces revêtements doivent cependant être régulièrement vérifiés pour détecter toute fissure ou détérioration. Il convient de noter que ces drains "d'eau de captage" diffèrent du drain d'interception ou de coupure situé à une certaine distance derrière le talus prévu pour éviter l'infiltration d'eau dans le matériau du talus. Toutes les mesures de drainage doivent être mises en œuvre conjointement avec des techniques de bio-ingénierie appropriées pour stabiliser les pentes et réduire la sensibilité à l'érosion. Certaines techniques de bio-ingénierie sont résumées dans le Tableau 12 (Shrestha et al, 2012).

Le rôle de l'eau dans la stabilité des pentes a récemment été clairement démontré dans des régions de Californie, qui ont connu l'une des pires sécheresses de mémoire d'homme en 2016. Des diminutions significatives des glissements de terrain et de l'instabilité des pentes ont été signalées au cours de cette dernière période de sécheresse, même après l'apparition de tempêtes (Bennett et al., 2016).

Tableau 12 Utilisations et options de la bio-ingénierie (Shresta et al, 2012)

Phénomène	Problème et condition de l'érosion	Techniques de bio-ingénierie adaptées
Glissement de terrain	Glissement de terrain profond (>3 m de profondeur)	Adoucissement à un gradient approprié Canaux de dérivation, revêtement des canaux, collecteurs, voies navigables
	L'effondrement	Tangage des pierres et plantation d'arbres, d'arbustes et de gazon
	Glissement planaire	Clôtures en bambou avec des poteaux vifs, plantation et ensemencement d'herbe
	Rupture par cisaillement	Mise en terrasse et plantation de bambous, d'arbres, d'arbustes, de graminées
	Zone de coupe et de remblai en cas de glissement de terrain profond et peu profond (<3 m de profondeur)	Clôture à piquets vifs, arbustes sauvages, barrages de retenue vifs. Bandes de contour plantées d'herbe, d'arbustes et de piquets
	Pente nue et raide ou surface nouvellement exposée	Fascines, couches de brosses et palissades Placage de bambou avec ou sans structure Barrages de retenue les plantés avec des espèces à pourriture profonde (par exemple, bambou, arbres)
Zone de fissuration	Zone de fissuration	Clôture en bambou au-dessus de la zone recouverte d'une feuille de polyéthylène
		Drain de capture avec végétation Fascines, couches de broussailles et palissades
Escarpe de tête lors d'un glissement de terrain ou d'une rupture de talus	Escarpe de tête lors d'un glissement de terrain ou d'une rupture de talus	Talus creusé à une inclinaison appropriée et arrondi (lorsqu'il est haut et raide) et planté de plantes à racines profondes (par exemple, bambou, arbres)
		Clôtures en bambou, plantation d'herbe, ensemencement et paillage Fascines, couches de brosses et palissades Filet de jute ou paillasse couvrant le sol, les graines et le mélange de compost ; gazon en plaques Tangage des pierres ; plantation d'arbres, d'arbustes et de gazon Plantation de glissements de terrain et ensemencement de l'herbe
Coulée de débris	Zone de production de sédiments	Comme pour les glissements de terrain
	Zone de transport de sédiments	Série de barrages en gabions, mur de soutènement et mur latéral plantés avec des espèces à racines profondes (par exemple, bambou, arbres) Clôtures en bambou ; plantation d'herbe, ensemencement et paillage
	Zone de dépôt de sédiments	Canal de dérivation, revêtement du canal, mur de soutènement et mur latéral planté d'arbres, d'arbustes et d'herbes Plantation d'espèces à racines profondes (par exemple, bambou, arbres)
Érosion des sols	Érosion des feuilles et des rives	la plantation de bambous, d'arbres, d'arbustes et d'herbes avec ou sans terrassement Clôture à piquets vifs, arbustes sauvages, et barrages de retenue vifs Bandes de contour plantées d'herbe, d'arbustes, d'arbres et de piquets Fascines, couches de buissons et palissades avec des espèces d'arbustes sauvages et épineux
	Erosion des ravins	Canaux de dérivation, revêtement des canaux, collecteurs, voies d'eau, mur de soutènement en cascade et mur latéral, plantés d'arbres, d'arbustes et d'herbes Clôture en bambou avec des piquets de vie Plantation de bambous, d'arbres, avec ou sans barrage de retenue Série de murs de soutènement et plantation Tangage des pierres végétales dans des petits ravins et des lits de ruisseaux
	Érosion sur les terres infertiles, terres dégradées en pente raide, zones sèches et brûlées	Plantation d'espèces à racines profondes (par exemple, bambou, arbres) Clôtures en bambou et piquets vifs et barrages de retenue vifs Tangage des pierres végétales dans des petits draps et des lits de ruisseaux Tangage des pierres et plantation d'arbres, d'arbustes et de gazon
	Les zones de cultures itinérantes dégradées, les zones nouvellement creusées ou exposées sur les terrasses, les forêts dégradées et les pâturages	Clôtures en bambou avec des poteaux vivants, plantation et ensemencement d'herbe Plantation de bambou, d'arbres, d'arbustes et d'herbe avec ou sans terrassement et structure Clôtures à piquets vifs et barrages de retenue vifs Tangage des pierres végétales dans des petits ravins et lits de ruisseaux Bandes de contour plantées d'arbustes de gazon, d'arbres et de piquets Planter des fascines, des couches de buissons et des palissades
	Terrain dégradé par l'eau (source, zone endommagée par la source d'eau, zone de commande des canaux)	Plantation de bambou, d'arbres, d'arbustes et d'herbe avec ou sans terrassement et structure Tangage des pierres ; plantation d'arbres, d'arbustes et de gazon Plantation d'espèces à racines profondes (par exemple, bambou, arbres) Clôtures à piquets vifs et barrages de retenue vifs Tangage des pierres végétales et des murs de maçonnerie en pierre détachée ou des barrages de retenue
	Zone de déblai et de remblai ou zone nouvellement exposée sur le talus*	Filet de jute ou paillasse couvrant le sol, les graines et le mélange de compost Clôtures à piquets vifs et murs de maçonnerie en pierre Plantation, ensemencement et plantation d'herbe Surveillance vive avec terrassement et l'ensemencement

*Les surfaces de talus exposées doivent être soigneusement entretenues. Une pente coupée et nouvellement exposée doit généralement être couverte, en fonction du type de matériau du sol et d'autres facteurs.

5.3.3.2. Remblais

Description

Les principaux types de remblais liés aux routes d'accès rurales sont ceux qui sont construits pour élever la route au-dessus du niveau de formation normal, en particulier dans les zones inondables et aux abords des ponts ou des structures de franchissement des cours d'eau.

Les remblais se détériorent ou se rompent d'une ou de plusieurs des trois façons suivantes. Ils peuvent soit se déformer en raison d'un tassement différentiel (consolidation) des matériaux sous-jacents (in situ) ; ils peuvent céder en cisaillement (à l'intérieur du remblai ou à travers des sous-niveaux faibles), entraînant l'effondrement d'une partie du remblai ; ou, et peut-être plus communément dans le contexte des routes d'accès rurales, par l'érosion et le sapement du remblai et de la structure de la route lors d'inondations ou par des eaux de ruissellement incontrôlées.

L'affaissement du talus sous les routes rurales (généralement le résultat de la consolidation de matériaux de sol support mous et humides sous le talus, induite par la masse des matériaux du talus) est rarement un problème important, ne conduisant qu'à une déformation de la surface de la route, qui peut être réparée relativement facilement et à peu de frais. Comme pour les déblais, les défaillances de stabilité résultent généralement d'une diminution de la résistance due à des pressions d'eau interstitielle excessives, et les précautions normales de conception doivent être suivies dans ces cas.

Les remblais placés sur des matériaux colluviaux (hillwash), même sur des pentes de collines relativement douces, nécessitent un soin particulier dans leur conception. L'eau s'écoule souvent à travers les matériaux colluviaux reposant sur le substratum rocheux sous la structure du remblai en raison des gradients de perméabilité. Pour composer les matières, le colluvion est souvent mal consolidé et présente des taux de vide élevés et une faible résistance au cisaillement. Un remblai sur des matériaux colluviaux a donc un fort potentiel de glissement vers le bas de la pente de la colline. Le contrôle des eaux de surface et des eaux proches de la surface est essentiel dans ces cas.

Cependant, des problèmes majeurs se posent lorsque les remblais sont débordés lors d'une inondation. Un écoulement turbulent localisé du côté descendant de la pente peut entraîner une forte érosion et finalement l'effondrement du talus et de la route (figure 18 et figure 19).



Figure 18 Sous-coupe et effondrement de la chaussée dus à l'érosion du talus



Figure 19 Perte complète du remblai et de la route en raison des conditions d'écoulement turbulentes lors du débordement et de la faiblesse de la couche de fondation

La perte totale des remblais, comme dans l'exemple de la figure 19, aura des conséquences importantes d'un point de vue financier (coûts de remise en état) et économique (réduction de la mobilité et de l'accès), tout en pouvant aussi affecter la sécurité des usagers de la route si les systèmes d'alerte précoce ne sont pas mis en œuvre à temps.

Considérations relatives à la conception

Lors de l'évaluation des remblais pour les mesures d'adaptation, il est important d'identifier les chemins d'eau potentiels et les angles d'approche (l'eau s'approchant perpendiculairement est plus facile à contrôler que l'eau s'approchant à un angle plus aigu), si l'eau s'écoulera sur le remblai et l'impact de l'eau sur les matériaux du remblai. Dans les zones où l'érosion du talus est probable, l'installation d'une protection par enrochement est nécessaire ou des pentes latérales végétalisées plus plates peuvent, dans de nombreux cas, prévenir les dommages. Cependant, si les matériaux locaux sont susceptibles d'être facilement érodés, l'enrochement doit être jointoyé et des mesures (figure 120) doivent être prises pour s'assurer que l'eau ne puisse pas pénétrer dans le talus par le haut et (surtout) derrière la protection contre l'érosion. Il est également nécessaire d'inclure des "trous

d'évacuation" qui permettent à l'eau qui s'infiltré par inadvertance derrière les mesures de protection contre l'érosion de s'échapper sans permettre à l'eau de pénétrer dans ces trous.



Figure 20 Protection des remblais de pierre coulés de matériaux érodables

La meilleure façon d'éviter d'endommager la chaussée sur les remblais est de construire une "coupure capillaire" ou une couche de drainage libre sous les couches structurelles de la chaussée au-dessus du niveau d'inondation maximum prévu, de sorte que l'eau s'écoule à travers cette couche et n'affecte pas les couches sus-jacentes - cela évite également l'aspiration capillaire de l'eau dans les couches structurelles. Cette couche doit être constituée d'une couche perméable (de 100 à 150 mm d'épaisseur) de sable grossier, de gravier ou de roche à au moins 150 mm au-dessus du niveau d'eau maximum prévu et à au moins 600 mm sous les couches structurelles de la chaussée.

Il a été souligné qu'une technique de protection qui a réussi sur un site n'est pas nécessairement la solution optimale sur d'autres sites (NCHRP 496, 2016). Les questions techniques suivantes doivent être abordées pour chaque situation : facteurs hydrologiques, hydrauliques, géologiques et géotechniques. Toutefois, des questions telles que les aspects juridiques et financiers et le risque acceptable jouent souvent un rôle majeur dans les décisions de conception.

Comme les remblais associés aux structures de drainage sont soumis aux mêmes conditions que les structures de drainage réelles, les mêmes données hydrologiques doivent être utilisées pour donner une estimation de la hauteur d'eau maximale prévue, de toute hauteur de débordement potentielle si un débordement est probable et des vitesses d'écoulement de l'eau. Cela implique une sélection minutieuse des périodes de retour en tenant compte des futurs événements extrêmes.

Les considérations géologiques associées comprennent les conditions de la sous-surface, la topographie, les voies d'écoulement de l'eau et les dimensions du canal, la sensibilité à l'érosion et au dépôt des environs de la rivière et les caractéristiques du bassin. Les principales caractéristiques géotechniques comprennent l'érodabilité et le potentiel d'affouillement des matériaux de remblai, leurs propriétés (résistance et perméabilité) et leur structure (ponceaux et ponts), ainsi que des considérations liées au revêtement.

Pour éviter d'endommager les remblais, il faut faire le meilleur choix parmi les nombreuses options de conception. Parmi celles-ci, on peut citer :

- L'identification et la quantification de la crue nominale prévue
- Conception pour le débordement, notamment en termes d'érosion du côté aval de la digue
- Lutte contre les infiltrations à travers le remblai
- Lutte contre les infiltrations sous le remblai
- Éviter les effets d'érosion de l'action des vagues lorsque cela est probable (par exemple, en plaçant des enrochements)
- Considérant les effets de l'assouplissement des sols par saturation
- Lutte contre le glissement latéral du talus
- La mise à disposition de ponceaux adéquats et bien espacés (cf. section 5.5)
- La conception de chaussées résistantes à l'humidité sur le talus
- Garantir la stabilité des berges en cas de rabattement rapide
- Aplatir les pentes latérales pour réduire les vitesses d'écoulement
- L'élimination des points bas de la chaussée afin d'éviter les turbulences
- L'élimination des arbres et des termitières des pentes de remblais qui causeront des turbulences localisées
- Le degré élevé de compactage des berges et l'élimination des cavités causées par les termites
- Application de matériaux plus cohésifs sur les pentes des remblais et bio-ingénierie de ces derniers.

Il ressort clairement de la liste des options ci-dessus que l'apport d'un hydrologue expérimenté pour déterminer les apports hydrologiques est essentiel. Les hydrologues utilisent généralement les périodes de retour et des modifications devront être apportées à celles-ci pour les futurs scénarios climatiques. Des détails à cet égard sont fournis dans les lignes directrices pour la gestion des changements. L'estimation des zones qui seront touchées par les inondations provenant des bassins versants régionaux est particulièrement importante dans les analyses hydrologiques des bassins versants et des zones inondables potentielles. Dans de nombreuses régions, les bassins versants des grands fleuves s'étendent dans les pays voisins, où des structures de rétention d'eau (barrages et lacs) peuvent être présentes. Ceux-ci affectent le débit des rivières pendant les périodes d'inondation, en particulier lorsque le débit sortant des barrages peut être contrôlé par les autorités responsables de l'eau. Lorsque les barrages se remplissent, des débits accrus sont souvent générés afin de minimiser les débordements et de soulager les contraintes sur les structures des barrages. Les volumes d'eau ainsi libérés et leurs impacts potentiels sur les inondations sont difficiles à modéliser dans l'analyse des bassins versants, mais il est essentiel de tenir compte de leurs impacts.

Les matériaux utilisés pour la construction des digues doivent être choisis de manière à minimiser les problèmes potentiels. Les sols érodables et dispersifs doivent être évités ou encapsulés dans le remblai par des matériaux de meilleure qualité. Les argiles expansives doivent également être évitées dans la mesure du possible ou ne doivent être utilisées que si elles peuvent être isolées des grands changements d'humidité par encapsulation. Malheureusement, de nombreux sols expansifs sont généralement associés aux types de roches sous-jacentes (par exemple, les roches ignées de base) et couvrent souvent de grandes surfaces, ce qui rend l'importation de matériaux de remplacement coûteuse. Le compactage de ces matériaux à des densités élevées est également difficile, ce qui justifie d'autant plus de les éviter autant que possible.

La stabilité des structures de remblai est généralement fonction des angles des pentes latérales, bien que de faibles résistances au cisaillement dans le matériau sous-jacent entraînent une rupture.

L'aplatissement des pentes latérales améliore généralement la stabilité, mais il nécessite des quantités de matériau beaucoup plus importantes et se traduit par une empreinte plus importante du remblai, qui doit également inclure les drains latéraux. Cela n'est donc souvent pas possible sur les terrains escarpés ou dans les zones agricoles où les droits fonciers peuvent être compromis.

Nouveaux remblais :

Pour la construction d'un nouveau remblai dans une zone potentiellement problématique, le choix de l'emplacement optimal de la route est essentiel. Il est nécessaire de bien comprendre les caractéristiques et les contraintes du site, telles que la géologie et les sols, les caractéristiques géotechniques, les caractéristiques hydrauliques des cours d'eau, les conditions en amont et en aval, les activités de construction et les installations de gestion des eaux pluviales. Cela devrait inclure l'évaluation des facteurs de vulnérabilité à la rupture des pentes de remblai, tels que la distance par rapport au bord de la pente pour une série de volumes de rupture, afin d'estimer la zone d'influence de la rupture des pentes de remblai. En identifiant et en quantifiant ces questions, une conception appropriée peut être adoptée. Ces conceptions pourraient inclure le déplacement du talus, la stabilisation du cours d'eau ou la conception des modes de défaillance possibles.

Remblais existants :

Dans le cas d'un ancien site problématique, il est essentiel de comprendre les principaux problèmes qui entraînent des dommages récurrents. Parmi les problèmes possibles, on peut citer l'augmentation de **la gravité des inondations** et les effets de l'instabilité du cours d'eau provoqués par les changements des conditions en amont ou en aval (y compris les activités humaines).

Dans de nombreux cas, il convient d'éviter l'utilisation de remblais pour les routes d'accès rurales à faible trafic. Il est préférable de laisser l'eau couler sur la route au niveau de la nappe phréatique naturelle plutôt que de gêner l'écoulement de l'eau. Il convient d'associer à cela un profil vertical aussi plat et plat que possible pour minimiser les zones de concentration de l'écoulement de l'eau. Le potentiel d'érosion des matériaux sableux peut être accru, mais il peut être surmonté en utilisant des murs en béton de masse en aval de la route et en conservant la route comme une route non revêtue (figure 21). Cela permet généralement d'éliminer les effets érosifs des eaux de crue et les couches de roulement non revêtues peuvent être facilement entretenues après que les eaux se soient retirées afin de restaurer la qualité de la conduite si le besoin s'en fait sentir

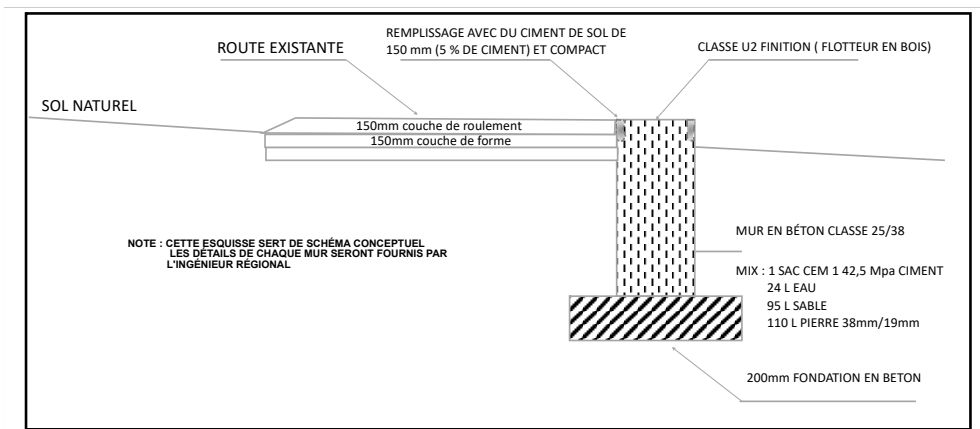


Figure 21 Mur en béton de masse pour minimiser les dommages causés par les inondations dans les vallées par des matériaux érodables

Une alternative à cela est d'utiliser des dérives en béton. Il peut s'agir de structures complexes visant à minimiser l'érosion (figure 22) ou de structures simples, éventuellement combinées avec les murs en béton de masse comme le montre la figure 21. Il est toutefois préférable qu'elles soient au niveau du sol naturel pour minimiser la sédimentation sur la structure et l'érosion en aval de la structure en raison des conditions d'écoulement turbulentes.



Figure 22 Gué en béton complexe avec régulateurs de vitesse de l'eau et bassin de tranquillisation

5.3.3.3 Érosion

Description

Des informations supplémentaires sur l'érosion, en plus de celles qui ont été discutées précédemment, sont incluses ici sous la rubrique "terrassements", car elles concernent principalement les impacts sur la surface des coupes, des remblais et des structures de drainage, plus que le sapement des remblais en raison des conditions d'eau turbulentes discutées précédemment. Les surfaces de sol en pente sur

lesquelles l'eau s'écoule s'érodent en fonction de la vitesse de l'eau qui s'écoule à la surface et de la résistance à l'érosion (cohésion) de la surface du sol.

Une certaine forme de végétation doit être utilisée sur toutes les pentes de route qui acceptent la croissance des plantes. Idéalement, cette végétation devrait être résistante aux changements de température et de précipitations prévus. Les pentes doivent également être conçues, dans la mesure du possible, de manière à favoriser la végétation, généralement aux endroits où les battements sont inférieurs à 1V:1.5H. La végétation contribue à renforcer le sol, à prévenir l'érosion excessive et à réduire les impacts de l'eau, la vitesse de ruissellement et les frottements. Les herbes locales à racines profondes doivent être utilisées autant que possible, mais certains types de végétation (par exemple le vétiver (*chrysopogon zizanioides*), originaire de l'Inde), sont particulièrement utiles et sont utilisés au niveau international. Il s'agit d'une grappe de graminées non envahissante dont les racines peuvent pénétrer entre 2 et 4 m de profondeur et qui est donc capable de fixer le sol et de résister à l'érosion.

Les matériaux érodés se déposent le plus souvent dès que la vitesse de ruissellement diminue et sont généralement déposés sur la route ou dans les drains latéraux ou transversaux. Tous ces éléments nécessitent un nettoyage (entretien) plus fréquent à mesure que l'érosion augmente.

Les traces de pieds et de véhicules qui quittent la route et descendent les pentes entraînent une perte de croissance de l'herbe, ce qui provoque rapidement l'érosion et la perte de matériaux lorsque la pluie tombe sur ces zones (figure 23). Il convient d'être prudent dans ces zones et de construire des accès bien conçus pour minimiser les problèmes d'érosion



Figure 23 Érosion causée par l'accès des véhicules, des piétons et des animaux hors de la route

L'un des principaux facteurs qui affectent l'érodabilité du sol, après les propriétés des matériaux, est l'effet du feu. Les dommages causés par le feu font que la pluie tombe directement sur le sol (perte de la protection de la végétation sur les terres brûlées), ce qui entraîne un détachement des particules de sol non protégées par l'impact des gouttes de pluie. Ces particules détachées sont ensuite plus facilement emportées (érodées) par l'eau/le ruissellement qui s'écoule sur le sol (figure 24). Plus la pente est raide, plus l'eau s'écoule rapidement à la surface et plus la perte de matière est importante. Le risque de feux de forêt entraînant ces problèmes sera considérablement accru par **des vents plus forts, des températures plus élevées et des conditions plus sèches**.

Pour protéger les pentes du sol contre la perte de végétation due aux incendies, il convient d'envisager l'utilisation d'une végétation à racines profondes et résistante à la sécheresse. De plus, les équipes d'entretien doivent veiller à ce que la végétation soit coupée afin de réduire au minimum les feux de friches à proximité des trottoirs.



Figure 24 Perte de sol non protégé au centre de la photographie. La zone brûlée sur la gauche est exposée à l'impact de la pluie et à l'érosion par rapport à la zone végétalisée sur la droite

En résumé, les techniques de protection suivantes sont couramment utilisées pour minimiser l'érosion de surface :

- Bioingénierie
- Riprap et géosynthétiques
- Gabions
- Blocs de béton articulés
- Revêtement en béton ou jointolement de pierres
- Pavage
- Géocellules

L'emplacement et l'étendue de la protection doivent être conçus en fonction des mécanismes d'écoulement prévus, des types de sols/matières concernés, des quantités d'eau prévues, etc. Une solution de conception unique est généralement requise pour chaque cas individuel.

Il devient de plus en plus populaire de combiner les remblais routiers avec des bassins d'eau ou des dispositifs de récolte (étangs routiers), où l'eau peut être retenue par le remblai routier à des fins agricoles ou pour d'autres besoins humains (AfCAP, 2013). Cela nécessite une conception soignée du remblai, où l'eau stagnante (généralement contre la pente du remblai) ne nuit pas à la stabilité ou au fonctionnement de la structure du remblai. Cela peut être réalisé en incorporant des argiles (généralement de la bentonite) dans les sols des pentes du remblai comme "agent d'imperméabilisation". De même, il ne doit pas y avoir de couches perméables imprévues dans le remblai qui permettent à l'eau accumulée de passer à travers le remblai. D'autres installations de collecte de l'eau comprennent l'utilisation de la digue pour contenir les eaux de ruissellement qui

peuvent ensuite être acheminées par le côté, et des drains à onglet à travers des ponceaux dans de petits réservoirs ou puisards à l'usage des agriculteurs travaillant à proximité des routes. Les fosses d'emprunt utilisées comme sources de matériaux de remplissage peuvent également être façonnées pour devenir des réservoirs d'eau.

5.4 Sols supports

Dans de nombreux cas, l'impact des mauvaises ou des problèmes de sous-niveaux sur les routes peut être tout aussi important, voire plus important que le climat. Cependant, l'impact combiné du climat et du Sol support est crucial pour la performance des revêtements routiers.

Il est plus facile, moins coûteux et plus faisable de traiter les futurs problèmes de sous-niveau lors de la construction initiale d'une route que lors de sa reconstruction ultérieure. Il n'est pas possible de procéder à l'entretien ou à la réparation de routine de sol support après la construction, car celle-ci est recouverte par les couches supérieures du matériau routier et, une fois construite, elle n'est pas facilement accessible pour être réparée ou modifiée sans que la structure de la chaussée ne soit entièrement enlevée.

Surélever la route sur un remblai permet de favoriser un drainage positif à partir de la surface de la route et d'éviter l'accumulation d'humidité dans les matériaux de la chaussée. Le danger est de créer un effet de barrage pour l'eau qui, autrement, se déplacerait en aval et d'accroître les inondations dans d'autres zones. Si la chaussée est surélevée, la conception doit alors intégrer davantage de ponceaux ou d'enrochements drainants sous la section de route qui permet à l'eau de circuler librement. L'utilisation de remblais pour la collecte de l'eau dans de petits barrages adjacents à la route a été mise en œuvre dans certaines régions (voir la section précédente), mais cela nécessite une conception minutieuse pour s'assurer que l'eau collectée n'a pas d'effet délétère sur le remblai ou la structure de la chaussée.

Il ne faut pas sous-estimer l'utilisation de seuils capillaires, comme indiqué dans la section sur les remblais, pour faciliter le drainage et l'assèchement des remblais, mais ils pourraient interférer avec les opérations de collecte de l'eau, s'ils sont installés.

Divers matériaux de sol support problématiques sont susceptibles de se produire et doivent être traités individuellement. Les sols supports problématiques, s'ils ne sont pas identifiés à temps et si des contre-mesures appropriées ne sont pas prises, peuvent avoir un effet important sur les chaussées et les remblais et peuvent être gravement affectés par les changements climatiques. Ces problèmes potentiels sont tous liés à l'humidité et conduisent principalement à la fissuration des joints bitumineux, ce qui augmente la probabilité que l'eau pénètre dans la structure de la chaussée et détériore la route (avec une augmentation concomitante des besoins et des coûts d'entretien).

Il est important de délimiter les conditions du sol support, car elles dicteront la structure de la chaussée nécessaire pour supporter le trafic prévu pendant sa durée de vie. Des procédures différentes sont nécessaires pour les nouvelles routes et les routes qui sont modernisées pour passer du gravier au revêtement standard. L'objectif, cependant, est de comprendre les matériaux sous-jacents et d'identifier à temps tout problème éventuel de sol. Les mécanismes des sols problématiques et leur identification sont résumés à l'annexe B. Seules quelques considérations de conception possibles pour les rendre résistants au climat et minimiser les problèmes futurs sont incluses dans cette section. Ces considérations doivent être prises en compte en même temps que les méthodes d'atténuation prévues dans les guides de conception locaux.

5.4.1 Argiles expansives

Bien que l'estimation du soulèvement potentiel soit impérative pour les structures sur l'argile expansive, elle n'est pas aussi critique pour les sous-niveaux sous les routes, en particulier les routes d'accès rurales où les exigences en matière de rugosité ne sont pas aussi strictes que pour les routes de mobilité primaire transportant un trafic plus important. Il est plus important d'identifier l'existence possible du problème et le potentiel de soulèvement différentiel le long de la route et de prendre les précautions nécessaires. Celles-ci seront généralement basées sur le degré de gonflement attendu, déterminé à partir d'essais en laboratoire (voir annexe B).

Si le soulèvement potentiel calculé dépasse 25 à 50 mm (produit du soulèvement potentiel et de l'épaisseur de la couche expansive), des contre-mesures doivent être mises en place. S'il est probable qu'il y ait un mouvement différentiel important en raison de propriétés ou d'épaisseurs variables des matériaux, de conditions de charge changeantes ou de différences de drainage localisées, les contre-mesures devront en tenir compte pour éviter les sections de route localisées de mauvaise qualité. Toutefois, les réductions de la qualité de roulement peuvent être considérées comme acceptables sur les routes à faible trafic (< 100 000 ASE) où des contre-mesures coûteuses ne sont probablement pas justifiées.

Lorsqu'il s'agit de ponceaux ou de petites structures de pont, il est généralement nécessaire de quantifier le mouvement potentiel avec plus de précision, car les mouvements peuvent ici entraîner la fissuration des éléments en béton. Le meilleur moyen d'y parvenir est de tester à l'aide d'un oedomètre des échantillons découpés dans des blocs.

L'orientation correcte des échantillons de blocs est impérative car les argiles expansives ont tendance à être fortement anisotropes avec des gonflements nettement plus faibles dans la direction horizontale. Ce test doit être effectué en conjonction avec de bonnes estimations des changements potentiels de la teneur en humidité in situ d'une saison à l'autre.

Les solutions qui peuvent être envisagées pour les routes à faible volume sur des argiles expansives sont notamment les suivantes :

- Maintenir la route sur l'argile comme une section non revêtue et la maintenir en état,
- Aplatissement des pentes latérales entre 1V:4H et 1V:6H selon la profondeur de l'argile)
- Enlever la terre expansive et la remplacer par un matériau inerte,
- Pré-humidification avant la construction du remblai ou de la formation (à la MOC),
- Pose de couches pionnières non compactes de sable, de gravier ou d'enrochement sur l'argile et humidification, soit naturellement par les précipitations, soit par l'irrigation (100 à 500 mm d'épaisseur selon l'épaisseur de l'argile et le potentiel de gonflement),
- Stabilisation à la chaux de l'argile pour modifier ses propriétés (coûteux - jusqu'à 6 % de chaux peuvent être nécessaires),
- Le mélange du sable fin avec l'argile pour en modifier l'activité (le rapport de mélange optimal doit être déterminé par l'expérimentation en laboratoire,
- Scellage des accotements (pas moins de 1m de large).
- Le compactage de fines couches d'argile de moindre plasticité sur l'argile expansive pour isoler les argiles actives sous-jacentes des changements d'humidité importants, et
- Un succès limité a été obtenu en utilisant des membranes d'étanchéité et/ou des barrières verticales contre l'humidité, qui sont généralement des géo-synthétiques.

La figure 25 donne une indication préliminaire des contre-mesures possibles (numérotées comme ci-dessus) en fonction de la dilatation potentielle déterminée comme indiqué à l'annexe B. Il convient de

noter qu'une combinaison de ces mesures est généralement la plus efficace et que toutes devraient aller de pair avec une conception et une construction soignées des drains latéraux, qui devraient de préférence être étanches.

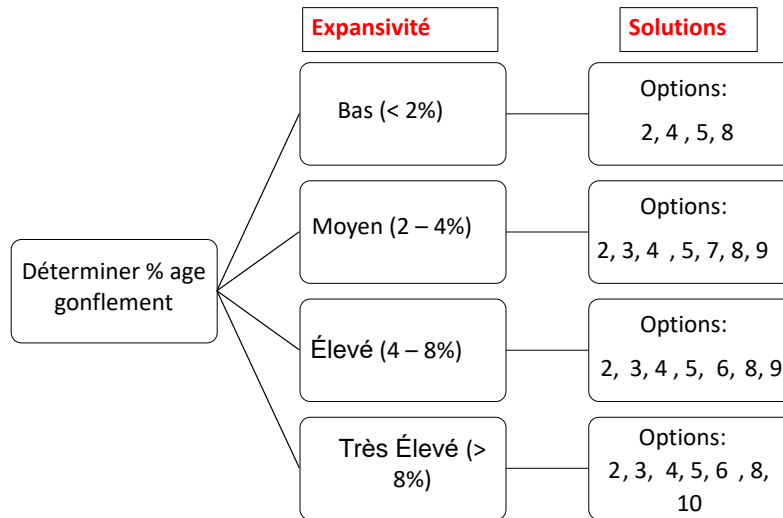


Figure 25 Solutions possibles pour les routes sur des argiles actives en fonction de la dilatation potentielle

La solution optimale dépendra des conditions locales et, dans de nombreux cas, plusieurs solutions peuvent être utilisées en combinaison. Dans de nombreux cas, pour les routes à faible volume, il peut être préférable de conserver la route comme une route de gravier sur les vastes sections d'argile et d'appliquer l'entretien nécessaire.

L'une des considérations les plus importantes est d'essayer de minimiser la zone de mouvement saisonnier de l'humidité sous la route (figure 24) et d'augmenter la zone d'équilibre de l'humidité. Une combinaison d'aplanissement de la pente, de remplacement de matériaux, d'accotements étanches et de drains latéraux revêtus, comme le montre la figure 25, est généralement le moyen le plus rentable d'y parvenir, mais la conception des contre-mesures doit être spécifique à chaque situation. En minimisant la zone d'humidité saisonnière les effets de **l'augmentation ou de la diminution des précipitations, de la hausse des températures, de l'assèchement**, etc. peuvent être pratiquement annulés.

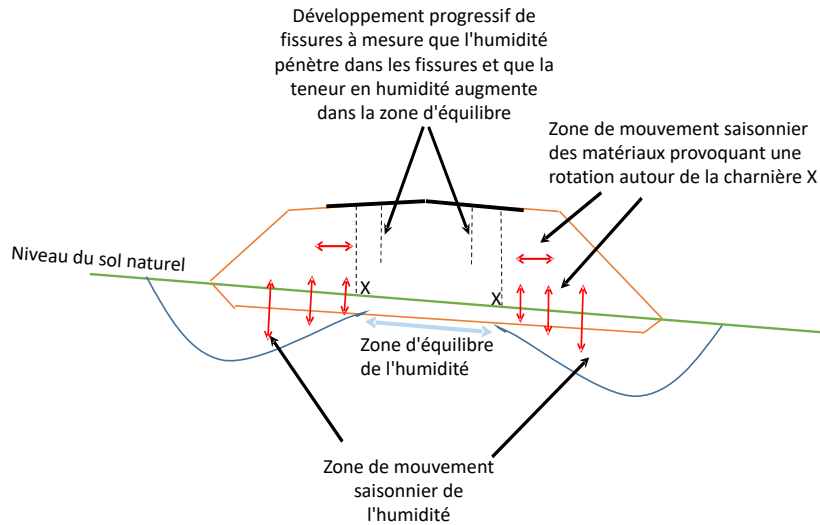


Figure 26 Régime typique de déplacement de l'humidité sous les routes sur des argiles expansives

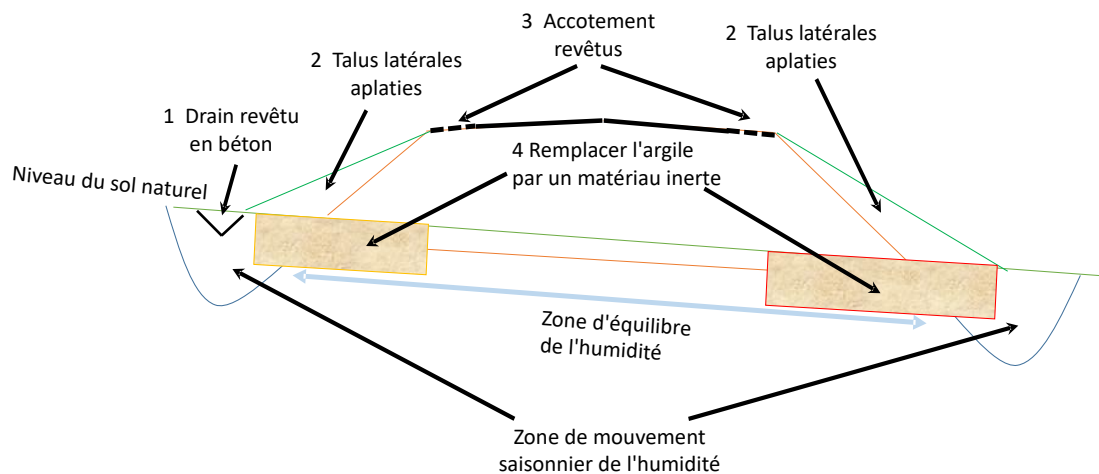


Figure 27 Quelques contre-mesures utilisées pour augmenter la zone d'équilibre de l'humidité

Les argiles expansives sont souvent épaisses et étendues latéralement, ce qui rend la mise en œuvre de contre-mesures coûteuse. La technique la plus efficace pour contrecarrer les sous-niveaux susceptibles de bouger fortement consiste à enlever l'argile expansive sous la structure de la route et à la remplacer par un radeau de matériau inerte. Cela implique généralement l'excavation et l'enlèvement de 600 à 500 tonnes de matériaux inertes.

1 500 mm (ou même plus dans certains cas) de matériau sur toute l'empreinte du prisme routier (ou au moins sous les accotements et les pentes latérales) combiné à des structures de drainage qui éliminent toute l'eau des pentes et des ponceaux adjacents au remblai. L'enlèvement des matériaux permet de réduire le potentiel de gonflement et d'augmenter la charge sur la couche de sol support expansive avec un matériau généralement plus dense et mieux compacté. Malheureusement, les volumes importants de matériaux nécessaires rendent souvent cette solution impraticable ou peu économique pour les routes à faible trafic, à moins que le problème ne soit localisé. En général, les

matériaux expansifs couvrent une large zone et l'importation de matériaux de substitution implique le transport de grandes quantités de matériaux inertes sur de longues distances.

La solution recommandée et probablement la plus économique, spécifiquement pour les routes à faible trafic présentant un potentiel de gonflement élevé à très élevé, consiste à retirer partiellement l'argile de la couche de sol support (300 à 400 mm) et à la remplacer par un matériau moins actif, à augmenter la hauteur du remblai en utilisant un matériau inactif pour fournir une charge plus importante sur l'argile, à sceller les accotements de la route et à aplanir les pentes du remblai en utilisant le matériau retiré de la couche de sol support et des drains latéraux. Cela a pour effet d'éloigner la zone de fluctuation saisonnière de l'humidité de la structure de la chaussée et d'induire des mouvements et des fissures dans les pentes de remblai plus souples plutôt que dans la structure plus rigide de la chaussée.

Une attention particulière doit être accordée aux ponceaux. L'argile qui se trouve en dessous doit être remplacée par un matériau inerte, tous les joints doivent être soigneusement scellés pour éviter les fuites et les entrées et sorties doivent être bien calibrées pour éviter la formation de flaques d'eau. Il est toutefois essentiel de bien comprendre les mouvements potentiels d'humidité dans et autour de la route et de les mettre en relation avec les potentiels de gonflement des différents matériaux de revêtement (remblai, accotements, sol support, etc.).

Il est également bon d'enlever et de contrôler le rétablissement des arbres "aimant l'eau". Les racines de ces arbres cherchent l'eau sous la chaussée et l'enlèvent de l'argile, ce qui provoque un tassement important de la route pendant la saison sèche, qui peut ou non se rétablir pendant la saison des pluies. Ce tassement est généralement associé à des fissures arquées et/ou longitudinales (figure 26).



Figure 28 Exemple de fissuration due à la déshydratation causée par des arbres à côté de la route, entraînant un affaissement de plus de 150 mm dans la zone rapiécée

Les modifications de l'humidité du sol dues aux effets du changement climatique (**augmentation ou diminution des précipitations, augmentation des températures, augmentation du vent et des feux de forêt**) auront un impact important sur les mouvements de la surface du sol et les structures associées. Il est probable que les structures de la chaussée se fissurent davantage et il faudra mettre en œuvre les contre-mesures nécessaires pour lutter contre ces changements.

5.4.2 Sols dispersifs

Les contre-mesures pour éviter les dommages dispersifs du sol dans l'environnement routier sont relativement simples :

- Bien éviter autant que possible son utilisation dans les remblais
- L'enlever et le remettre en place dans le sol support
- Gérer les flux d'eau et le drainage dans la région

Comme la présence de sodium comme cation d'échange dans les argiles est le problème majeur, le traitement à la chaux ou au gypse permettra aux ions calcium de remplacer les ions sodium et de réduire le problème. L'utilisation de gypse est recommandée par rapport à la chaux car la chaux peut entraîner une stabilisation du sol avec le retrait et la fissuration qui lui sont associés, permettant à l'eau de circuler à travers les fissures.

Il est également important que le matériau soit compacté à 2 ou 3 % au-dessus de la teneur en humidité optimale pour obtenir une densité aussi élevée que possible.

Pour éviter les problèmes de tassement et d'érosion des sols, le drainage doit être bien contrôlé. Le recouvrement des sols avec des matériaux non érodables et une bio-ingénierie soigneuse, assistée par des géosynthétiques si nécessaire, est généralement efficace. Une fois que l'érosion s'est produite, les canaux et les ravines doivent être remblayés avec des matériaux moins érodables et les flux d'eau doivent être redirigés. Il est important de noter que la bio-ingénierie ne se limite pas à la revégétalisation, mais qu'elle est une combinaison de concepts biologiques, mécaniques et écologiques, tels que l'ancrage, le piquetage, l'empilement de pierres et les géosynthétiques, tous associés à une végétation appropriée.

La figure 27 montre un tronçon de route de plus de 50 ans avec des zones localisées nécessitant une reconstruction régulière. Des sols très dispersés ont été utilisés pour le remblaiement dans ces zones



Figure 29 Exemple de détresse récurrente dans un remblai en raison de l'utilisation de sols hautement dispersifs comme matériau de remblai

5.4.3 Sols salins

Les mesures suivantes doivent être envisagées :

- Comme les problèmes de sels solubles proviennent de l'accumulation et de la cristallisation des sels sous le revêtement routier et dans la couche de base supérieure, il convient de tenter de réduire au minimum les sels dans les couches de la chaussée et le sol support.
- Si le revêtement est suffisamment imperméable (coefficient de perméabilité, k en nanomètres/seconde)/épaisseur du revêtement, T en mm ou $k/T < 30 (\mu\text{sec})^{-1}$ pour éviter le passage de la vapeur d'eau, la cristallisation ne se produira pas sous le revêtement.
- La construction doit se dérouler le plus rapidement possible afin de minimiser la migration des sels à travers les couches. Seuls des apprêts imperméables doivent être utilisés, par exemple des émulsions de bitume.
- L'ajout de chaux pour augmenter le pH à plus de 10 supprimera également la solubilité des sels les plus solubles.

Même pour les classes de routes les plus basses, les effets de matériaux excessivement salins peuvent entraîner une perte rapide et totale de l'étanchéité bitumineuse et des précautions doivent donc être prises pour toutes les classes de routes. L'utilisation de revêtements non bitumineux doit être envisagée par rapport aux matériaux salins. En raison de la relation générale entre l'aridité et les problèmes de matériaux salins, **la diminution des précipitations et l'augmentation des températures** devraient rendre les problèmes de sel soluble plus répandus.

5.4.4 Argiles tendres

Les remblais routiers construits sur des argiles tendres doivent être soigneusement contrôlés pendant leur construction afin d'éviter les défaillances de stabilité, car les pressions d'eau interstitielle augmentent sous les charges appliquées. Il est recommandé de construire les remblais dans ces zones lentement, couche par couche, tout en surveillant les pressions d'eau interstitielle, et de n'ajouter des couches supplémentaires que lorsque les pressions d'eau interstitielle se sont dissipées de manière adéquate. Malgré ces mesures, le tassement à long terme se poursuit et des problèmes sont souvent rencontrés avec des tassements différentiels importants entre les remblais d'approche fondés sur les argiles et les ponts fondés sur des pieux. Ces tassements différentiels à long terme nécessitent un entretien continu pour assurer un rendement adéquat de la route.

L'utilisation d'une large gamme de produits géosynthétiques comme couches de séparation et pour faciliter et accélérer le drainage a contribué à améliorer la construction dans ces zones au cours des dix ou vingt dernières années, et il convient d'obtenir des conseils spécialisés à cet égard.

L'élévation du niveau de la mer entraînera un plus grand dépôt de matériaux alluviaux fins dans les zones côtières et on peut s'attendre à ce que la présence de ces argiles tendres augmente en épaisseur dans les zones côtières actuelles ainsi que plus en amont à mesure que les eaux montent. **Des températures plus élevées et des conditions plus sèches** pourraient entraîner des changements de volume importants dans ces matériaux.

5.4.5 Zones humides/nappes phréatiques élevées

Le traitement des zones humides pour les routes peut être coûteux si l'objectif est de réduire les nappes phréatiques en utilisant des systèmes de drainage souterrains. Ces systèmes seraient rarement justifiés pour les routes à faible trafic.

Les mesures les plus efficaces et les plus rentables pour les routes à faible trafic consistent à élever le niveau de la route à au moins 750 mm au-dessus du niveau naturel du sol, avec une couche perméable de gravier ou de remblai rocheux (d'au moins 100 à 150 mm d'épaisseur) sur la formation naturelle (après enlèvement de la couche arable et de la végétation). Des drains latéraux correctement conçus et nivelés doivent également être construits pour éviter la présence d'eau stagnante à proximité de la route.

L'installation de systèmes de drainage souterrains est rarement justifiée pour les routes à faible volume en raison de leur coût élevé et de la nécessité permanente de les entretenir avec diligence. Toutefois, dans les cas où ils sont indispensables, ils doivent être conçus par un spécialiste du drainage et des eaux souterraines en fonction du régime hydrologique local et des voies d'écoulement.

L'évolution des précipitations améliorera la situation si les précipitations diminuent et si les zones s'assèchent, ou bien la situation restera similaire et les contre-mesures décrites ci-dessus seront toujours pertinentes. Bien **que l'augmentation de la température et de la vitesse du vent** puisse réduire l'impact du problème, la cause fondamentale du problème de l'eau ne sera pas affectée dans ces scénarios.

5.4.6 Sols déformables

Si des sols potentiellement collapsables sont identifiés, il convient de faire appel à une assistance spécialisée pour leur traitement sous les routes revêtues afin d'éviter un orniérage excessif. En général, un degré élevé de compactage vibratoire humide est nécessaire pour éliminer le potentiel d'effondrement. Cependant, comme la plupart de ces matériaux se trouvent dans des zones

relativement arides, l'utilisation d'un compactage à fort impact énergétique (sans ajout d'eau, qui est rare dans ces zones) s'est avérée la plus efficace. Déformation susceptible d'affecter les routes non revêtues sera retiré au cours de l'opération classique de nivellement de routine et aucune précaution importante n'est nécessaire.

5.5 Drainage (eau provenant de la réserve routière)

5.5.1 Description

L'eau qui tombe directement sur la chaussée, les accotements et les talus et qui finit par s'écouler dans les drains latéraux doit être particulièrement bien contrôlée. L'objectif premier est de s'assurer que cette eau ne s'infilte pas dans la structure de la chaussée, qu'il s'agisse d'une route non revêtue ou d'une route revêtue. Il faut également que l'eau ne s'accumule pas sur la surface des routes non revêtues (ce qui entraînerait un ramollissement et une déformation), que l'eau s'écoule des routes revêtues de manière à minimiser le risque de dérapage ou d'aquaplanage, que le mouvement de l'eau hors de la surface n'entraîne pas l'érosion de la surface de la route (revêtue ou non) ou des accotements et que l'eau s'écoule effectivement dans les drains latéraux où elle peut être efficacement éliminée de l'environnement routier.

La plupart de ces problèmes sont résolus en veillant à ce que la surface de la route soit régulière, avec une pente uniforme vers les accotements et une pente légèrement plus importante sur les accotements vers le point de rupture de l'accotement si la route n'est pas revêtue. Les ornières et les nids de poule gêneront l'écoulement de l'eau et augmenteront les problèmes potentiels. De même, la pratique courante en Afrique subsaharienne qui consiste à construire les accotements, généralement avec de l'herbe ou de la terre, mais souvent les deux (figure 28), entraîne une accumulation d'eau au bord du revêtement, qui s'écoule ensuite dans l'accotement et les bords de la structure de la chaussée, ce qui entraîne souvent des ruptures importantes des passages de roues extérieurs.



Figure 30 Accotements gazonnés et encombrés réduisant à néant l'efficacité du drainage de la surface de la route

5.5.2 Considérations relatives à la conception

Routes non revêtues

Pour éviter l'infiltration d'eau dans la couche de roulement et les couches sous-jacentes, la surface de la route doit être en bon état et présenter une cambrure prononcée, non inférieure à 4-5 %. Toute dépression (nid de poule) ou irrégularité de la surface (chaussée et accotements, généralement constitués des mêmes matériaux) accumulera l'eau, ce qui adoucira la couche et entraînera un élargissement de la dépression, tout en permettant à l'eau de s'infiltrer dans les couches sous-jacentes et de les affaiblir. Le maintien d'une route en bon état ne peut être assuré que par un entretien régulier, à l'aide d'une niveleuse conduite par un opérateur expérimenté et compétent.

Sur les pentes supérieures à 5 ou 6 % et les cambrures ou les surélévations supérieures à 5 %, l'eau de ruissellement provoque l'érosion de la plupart des types de matériaux, autres que les bons graviers granulaires bien compactés conformes avec les spécifications décrites dans la section "Drains latéraux" ci-dessous. Sur des pentes allant jusqu'à 6 %, la cambrure doit être plus prononcée que la pente dans la mesure du possible afin de garantir que les précipitations s'écoulent latéralement de la route dans les drains latéraux et non dans la pente, où elles peuvent prendre suffisamment de vitesse pour provoquer une érosion importante. Plusieurs techniques sont disponibles pour capter cette eau et la déplacer hors de la route aux intervalles nécessaires. Il s'agit notamment de bosses, de bandes de caoutchouc ou de boîtes en bois, dont chacune doit être évaluée en fonction de son adéquation.

Il est essentiel de disposer de drains latéraux bien calibrés qui recueillent l'eau et la déplacent le long de la route et dans des drains à onglet ou des ponceaux, comme indiqué dans la section "Drains latéraux" ci-dessous. Une coupe transversale typique d'une route non revêtue avec des drains adjacents est présentée à la figure 29. Les exigences en matière de h_{min} (hauteur entre le sommet de la route et le revers du drain latéral) sont indiquées dans le Tableau 13 et d_{min} (profondeur minimale entre le fond de la couche de roulement et le niveau naturel du sol) ne doit pas être inférieure à 150 mm. La largeur des drains doit être telle que l'eau soit efficacement évacuée et dépendra des pentes dominantes.

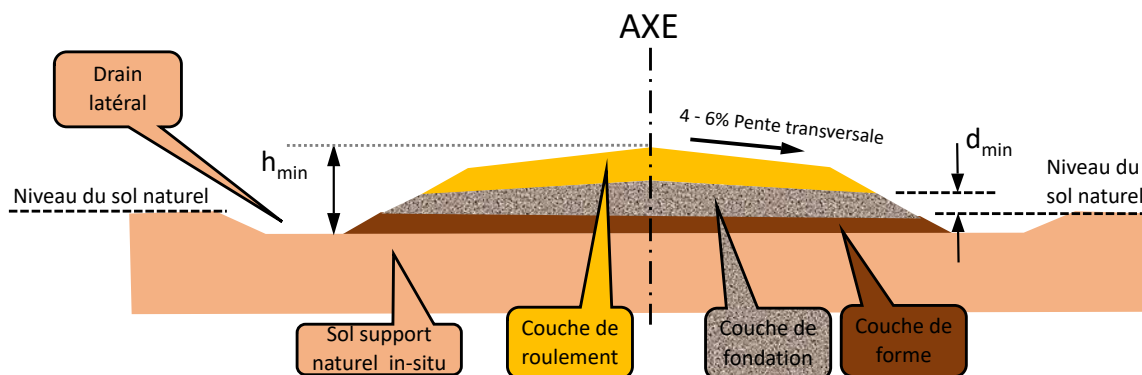


Figure 31 Exigences en matière de drainage pour les routes non revêtues

Tableau 13 Valeurs des h_{min} pour les routes non revêtues

Trafic (mesa)	h_{min} (mm)		
	Pluie < 600 mm	Pluie 600 – 850 mm	Pluie > 850 mm
< 30 000	250	300	350
30 000 – 100 000	350	400	450
> 100 000	450	500	550

L'augmentation des précipitations et les événements extrêmes sont les seuls facteurs de stress climatique importants qui affecteront le drainage des routes non revêtues. Toutefois, à condition que les questions abordées dans cette section soient traitées, il devrait être possible de construire des routes résistantes au climat.

Routes bitumées

L'accès de l'eau dans les sous-couches des routes bitumineuses se fait généralement par des fissures non scellées, des nids de poule non colmatés et des accotements mal entretenus. Là encore, seules l'application et la gestion correctes de l'entretien régulier et périodique, en supposant que la conception originale du revêtement était appropriée et que le joint était bien construit, permettront d'assurer un revêtement imperméable.

Les accotements non revêtus des routes revêtues doivent être traités de la même manière qu'une couche de roulement en gravier. Comme décrit ci-dessus, il est essentiel que les accotements soient légèrement plus bas que le revêtement pavé et qu'ils s'écartent de la route avec un cambrage approprié pour éliminer l'eau sans souffrir d'une érosion excessive et qu'ils soient bien compactés. Un bon et fréquent entretien des accotements est essentiel pour garantir qu'ils conservent leur capacité de drainage.

En ce qui concerne les routes non revêtues ci-dessus, **l'augmentation des précipitations et les événements extrêmes** sont les facteurs de stress climatique les plus importants qui affecteront le drainage des routes revêtues. Toutefois, l'absence d'entretien régulier de la surface revêtue sous l'effet de **l'augmentation prévue des températures** pourrait entraîner une fissuration supplémentaire qui pourrait permettre l'accès de l'eau dans la chaussée.

Pour les routes revêtues, la conception du drainage est illustrée à la figure 30 avec un minimum de d_{min} de 150 mm et h_{min} selon le type de drain et la pente comme indiqué dans le Tableau 14 avec une capacité à satisfaire les exigences pour la période de retour des tempêtes de conception.

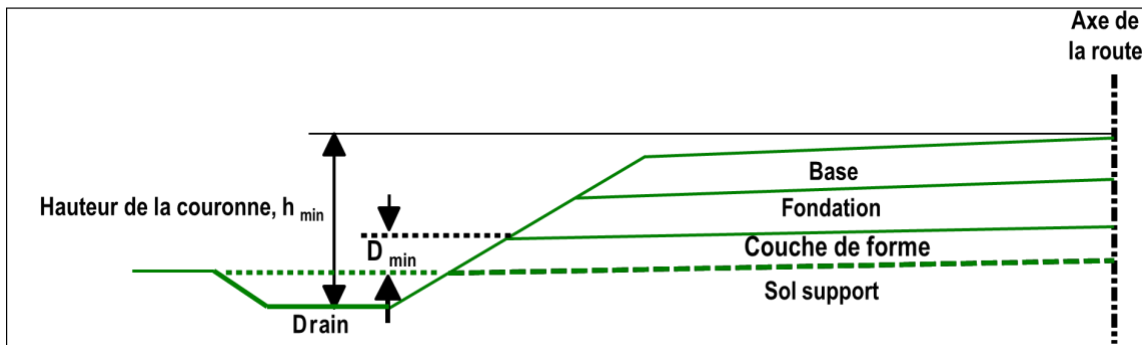


Figure 32 Exigences de drainage pour les routes revêtues

Tableau 14 Valeurs des h_{\min} pour les routes revêtues

h_{\min} (mm)			
Drains en terre		Drains revêtus	
Gradient < 1%	Gradient > 1%	Gradient < 1%	Gradient > 1%
750	650	650	500

Drains latéraux

L'eau provenant des routes et des accotements non pavés et pavés doit s'écouler le plus rapidement possible dans des drains latéraux correctement formés et calibrés le long de la route. Ceux-ci doivent permettre à l'eau de s'écouler, sans formation de flaques, et être conduits dans des drains en onglet à des intervalles appropriés d'où l'eau peut être évacuée des environs de la route vers les champs adjacents et les cours d'eau naturels. Les drains latéraux doivent être situés à la base de la formation ou des talus, de préférence à au moins 2 m du point de rupture de l'accotement.

Trois formes principales de drains latéraux sont utilisées : En forme de V, rectangulaire ou trapézoïdale. Ceux qui ont une section trapézoïdale sont normalement les plus faciles à entretenir et sont mieux construits et entretenus par un travail manuel. Ils doivent avoir une largeur minimale de 500 mm avec une pente longitudinale minimale de 1 %. Si des niveleuses doivent être utilisées pour l'entretien, des drains en forme de V doivent être construits.

Les drains doivent être conçus en utilisant des techniques conventionnelles pour limiter les vitesses d'écoulement de manière à éviter l'érosion/l'affouillement. Avec ***l'augmentation prévue des événements extrêmes***, la capacité des drains latéraux devra être réévaluée. En l'absence de connaissances locales détaillées sur les changements des périodes de ***précipitation*** et de retour, il est suggéré d'augmenter les capacités calculées existantes de 100 % pour tenir compte des augmentations probables.

Si l'affouillement est inévitable en raison de contraintes matérielles et topographiques, il convient d'envisager l'installation de dispositifs de contrôle de l'affouillement ou même de revêtements en béton ou en pierre mortaisée dans le drain. L'espacement entre les contrôles d'affouillement doit être tel que l'eau dans les drains ne s'accumule pas à une vitesse élevée, avec un espacement typique d'environ 5 m sur les pentes plus raides (>10%) et d'environ 15 m sur les pentes inférieures à environ 5%.

Il peut s'agir d'installations très simples comprenant, par exemple, un rondin chevillé (figure 31), des paniers en gabions sophistiqués, des palissades, des voies d'eau engazonnées, des couches de broussailles, des clôtures en bambou, des clôtures en torchis, et d'autres mesures similaires selon la situation.



Figure 33 Contrôle de l'affouillement des grumes

En outre, en évacuant l'eau des drains latéraux vers les drains à onglet à intervalles réguliers, les volumes et les vitesses d'écoulement de l'eau et l'érosion potentielle des drains latéraux seront réduits. L'eau doit être acheminée dans les drains à onglet du même côté de la route que le drain latéral afin de réduire le nombre de ponceaux le long de la route. Cependant, dans les zones de coupe, il est généralement nécessaire de déplacer l'eau vers le côté ouvert de la coupe périodiquement pour la dissiper. L'espacement typique des drains à onglet dépend de la pente du drain latéral et des matériaux naturels présents dans le drain. Des suggestions d'intervalles basées sur l'expérience de l'auteur principal sont fournies dans le Tableau 15.

Tableau 15 Intervalles suggérés pour les drains à onglet en fonction de la pente et de la cohésion du matériau

Gradient de drainage latéral (%)	Intervalle maximal de drains exutoires dans le type de matériau (m)	
	Matériaux non cohésifs	Matériaux Cohésifs
12	10	50
10	10	60
8	20	75
6	30	100
4	40	150
2	50	300

Remarque : à une pente inférieure à environ 2 %, la vitesse de l'eau est faible et l'envasement et la croissance de l'herbe peuvent devenir un problème. Cela nécessite un entretien régulier.

Les drains à onglet doivent déboucher sur les drains latéraux à un angle compris entre 30 et 45° et les drains latéraux doivent être bouchés pour "forcer" l'eau à se déplacer dans le drain à onglet. Les drains à onglet doivent avoir une pente de 2 à 3 % et doivent s'éloigner progressivement des drains latéraux en devenant de moins en moins profonds et de plus en plus larges. La figure 32 montre un drain à onglet mal construit qui est trop court et bloqué à son extrémité.



Figure 34 Un drain à onglet court qui ne peut pas dissiper efficacement l'eau collectée

En terrain plat, la dissipation de l'eau est souvent difficile et des arrangements devraient éventuellement être pris avec les propriétaires fonciers voisins pour créer des bassins peu profonds où l'eau peut s'accumuler et pénétrer lentement dans le sol ou être conservée comme source temporaire pour l'irrigation ou le stockage (collecte de l'eau). Les drains à onglet qui s'arrêtent à moins de 7 ou 8 m de la route devraient être évités et leur extrémité devrait être située en dessous du niveau de la route, capable de dissiper rapidement et efficacement l'eau collectée et de préférence de rejeter l'eau en dehors de la réserve routière.

5.6 Drainage (eau provenant de l'extérieur de la réserve routière)

5.6.1 Description

L'eau provenant de l'extérieur de la réserve routière se caractérise par les précipitations qui sont collectées dans les bassins versants et qui descendent vers la mer ou les grands barrages ou peuvent être le résultat de l'inondation locale de grandes rivières. Cette eau traverse les routes à des points stratégiques, généralement dans la partie la plus basse de la vallée, et nécessite généralement un pont, un grand ponceau ou une autre structure (majeure) pour permettre à l'eau de s'écouler sous (ou parfois par-dessus) la route. Il faut garder à l'esprit que les principaux bassins versants des grands fleuves (par exemple le Limpopo, le Zambèze, le Nil, la Volta, etc.) peuvent être situés en dehors des frontières du pays - ceci, ainsi que la présence de grands barrages qui permettent de contrôler le débit des fleuves, pourrait rendre la quantification du débit des fleuves très difficile dans le pays.

Les températures plus élevées attendues, les précipitations plus importantes, les tempêtes plus intenses et les tempêtes plus fréquentes et plus importantes pourraient avoir un effet dévastateur sur l'infrastructure des ponts et des ponceaux intérieurs. Les ponts des zones côtières seront également touchés par les changements de salinité de l'eau résultant de l'élévation du niveau de la mer ainsi que par des marées de tempête plus intenses. Ces facteurs de changement climatique entraîneront la nécessité de faire face à une quantité d'eau généralement plus importante, à des inondations plus fréquentes et à des vitesses d'eau plus rapides et plus destructrices, probablement plus que ce pour

quoi les structures actuelles ont été conçues. Une grande partie des données historiques sur lesquelles repose la conception hydrologique ne seront plus valables. Les considérations à cet égard sont abordées plus loin dans cette section. Cependant, il sera important de :

- d'identifier les structures les plus vulnérables et d'augmenter le "facteur de sécurité" inhérent à leur conception ;
- de s'assurer que les systèmes de drainage sont bien entretenus et fonctionnent correctement
- identifier les zones critiques ou les routes prioritaires où les conséquences de la défaillance et de la fermeture sont graves. Un réalignement local, le cas échéant, peut être nécessaire, mais il ne sera généralement envisagé que dans le cadre d'un projet de réparation et de réhabilitation après que les dommages causés par la tempête se soient produits.

L'augmentation du facteur de sécurité comprend :

- l'utilisation de galeries et d'aérations qui peuvent être franchies en toute sécurité au lieu de ponceaux ou de petits ponts qui peuvent être bloqués par des débris
- fournir une protection supplémentaire aux ponceaux qui pourraient être bloqués par des débris
- un meilleur drainage de la surface pour que l'eau soit plus fréquemment dispersée hors de la route
- réduire la concentration en eau au moyen de drains transversaux et de drains à onglet supplémentaires afin de réduire le volume d'eau que chacun doit traiter.

Les ponts sont généralement l'élément le plus coûteux de l'infrastructure routière et nécessitent une protection supplémentaire. L'intensité accrue des tempêtes produira plus d'eau avec des vitesses d'écoulement plus élevées, auxquelles le pont devra peut-être faire face, ce qui entraînera l'érosion des culées (figure 33) et augmentera le risque de dommages aux structures du pont par les débris présents dans l'eau. La figure 34 montre un exemple de la perte totale d'un remblai et d'un ponceau lors d'une tempête violente, avec l'emplacement final du tuyau métallique de 2 m de diamètre à 100 m en aval.



Figure 35 Dommages causés par l'inondation à la culée du pont après le débordement de la berge



Figure 36 Dommages causés à un ponceau en acier après la tempête avec perte totale du remblai. La photo de droite montre l'emplacement final du tuyau métallique

Les débris transportés par la rivière lors des inondations (par exemple, les grands arbres) causent souvent des dommages directs aux ponts ou bloquent les entrées des ponts, ce qui entraîne des modifications de la capacité hydraulique et le débordement de la structure.

En 1919, Lewis a publié un article dans lequel il déclarait qu'"il ne faut pas accorder trop d'importance à la formule (pour le calcul des crues maximales). Il est peu probable que l'on découvre une formule qui s'appliquerait à toutes les zones de drainage. L'inondation maximale dépend de trop de circonstances incertaines, telles que l'intensité des précipitations, la taille et la forme du bassin versant et du canal et la perméabilité de la surface du sol". C'est encore vrai aujourd'hui, près de 100 ans plus tard, notamment en ce qui concerne la variation de l'intensité des précipitations et de la perméabilité de la surface du sol.

Lors de la conception de grands ouvrages, le débit maximal prévu lié au bassin versant de la rivière ou du cours d'eau est généralement utilisé pour déterminer la capacité de débit du pont et les ouvertures requises. La pluie qui tombe dans le bassin versant est déterminée en fonction de la période de retour prévue de certains événements pluvieux, généralement basée sur des mesures antérieures. C'est cette période de retour qui est susceptible de changer (c'est-à-dire que dans des scénarios de tempêtes plus sévères, la quantité de pluie tombant lors d'une future tempête avec une période de retour de 100 ans sera plus importante que celle qui tombe actuellement lors d'une tempête avec une période de retour de 100 ans) et doit être modifiée pour les conceptions futures. Les événements extrêmes après des périodes de sécheresse prolongées entraîneront une plus grande "absorption" des précipitations par le sol, mais les précipitations de forte intensité entraîneront également des écoulements rapides avant que l'eau ne puisse s'infiltrer dans le sol, en fonction des propriétés hydrologiques de la surface du sol.

Des recherches menées au Ghana (COWI, 2010), par exemple, ont indiqué que la tempête centennale actuelle au Ghana, peut être attendue une fois tous les 18 ans à l'avenir (2050) sur la base des projections existantes pour le Ghana - plus de cinq fois plus fréquemment qu'une tempête centennale serait attendue aujourd'hui.

Les traversées de cours d'eau doivent être conçues de manière à pouvoir faire face aux changements attendus en matière **d'intensité des précipitations** et de ruissellement, de manière à équilibrer les coûts de construction avec les coûts économiques et sociétaux liés au fait de ne pas disposer d'une capacité de drainage suffisante et de subir ainsi des dommages d'érosion excessifs, voire l'effondrement de structures plus importantes. Les coûts élevés des structures par rapport aux coûts globaux des routes rurales à faible volume devraient certainement dicter l'utilisation accrue de gués et

de galeries appropriés qui sont conçus pour être "débordés" pendant des périodes limitées, sans endommager les structures ou prolonger inutilement la durée des inondations.

Les structures de pont existantes près de la côte devront également être soigneusement réévaluées. L'élévation du niveau de la mer entraînera de nouveaux niveaux d'eau pour les rivières/estuaires, ce qui réduira l'ouverture des ponts et pourrait entraîner des débordements et des dommages aux ponts lors des inondations. On peut s'attendre à une forte augmentation de la sédimentation dans ces zones, ce qui réduira toutefois le risque d'affouillement des fondations des ponts existants en raison de la profondeur des eaux et des sédiments.

L'un des principaux problèmes potentiels des structures de pont actuelles est l'effet des changements de température sur les caractéristiques volumétriques (expansion et contraction) des composants du pont. La dilatation différentielle des différentes parties de la structure du pont et les parties constamment dans l'ombre entraîneront une augmentation des contraintes se développant dans les composants du pont.

Le type de pont a un impact majeur sur les effets thermiques. Les structures en acier, en béton ou en bois ont toutes des coefficients de dilatation thermique différents et se comportent donc différemment. Les structures en bois sont probablement les moins affectées par les gradients thermiques et nécessitent rarement des considérations thermiques spécifiques. En revanche, les effets thermiques sur les structures en acier peuvent être modélisés relativement simplement car les coefficients de dilatation de l'acier sont généralement connus et assez uniformes dans toute la structure. Le béton armé est un matériau composite comprenant des agrégats, de la pâte de ciment, du sable et de l'acier, tous ayant des caractéristiques thermiques potentiellement différentes.

Les principaux facteurs qui influencent les mouvements thermiques dans le béton sont les suivants :

- La nature des granulats ;
- La teneur en humidité du béton durci ;
- le pourcentage de granulats dans le mélange de béton en volume ; et
- La quantité et la répartition des armatures dans le béton.

Les effets d'autres facteurs tels que le type de ciment, la résistance nominale et l'âge du béton ainsi que les techniques de durcissement sont moins importants. Le coefficient de dilatation du béton partiellement humide est plus élevé que celui du béton complètement sec ou saturé résultant du comportement thermique de la pâte de ciment, qui a un coefficient maximal à des teneurs en humidité intermédiaires et des coefficients plus faibles à l'état saturé et complètement sec. Les valeurs des coefficients de dilatation thermique des granulats se situent entre 3,5 et 12,5 microdéformations /°C pour des températures allant jusqu'à 65°C, les matériaux non quartzés étant les plus faibles et les matériaux riches en quartz ayant les valeurs les plus élevées (Owens, 2009).

Le coefficient de dilatation thermique du ciment durci est compris entre 11 et 16 microdéformations par °C pour des "températures d'air normales", ce qui pourrait ne plus être le cas à l'avenir. Les roches ayant un coefficient de dilatation arithmétique moyen dans toutes les directions cristallographiques très différent de cette valeur peuvent être délétères dans le béton (Owens, 2009) en raison de la dilatation différentielle, en particulier si les coefficients de dilatation thermique sont faibles par rapport à ceux du béton. Ainsi, il peut être nécessaire de faire plus attention au type d'agrégat utilisé pour les éléments de pont en béton. Pour compliquer les choses, l'inclusion d'acier d'armature entraîne des mouvements volumétriques différents dans les éléments en béton proprement dits.

L'effet des températures plus élevées doit certainement être pris en compte par les ingénieurs en structure dans la conception des structures de pont en béton et il peut être prudent en fait

d'augmenter l'utilisation de structures en bois dans certaines situations de routes à faible volume pour minimiser les problèmes potentiels. Cependant, elles sont plus susceptibles d'être endommagées par les feux de forêt. En outre, des températures plus élevées (et un rayonnement ultraviolet plus fort) auront un impact significatif sur la durabilité des joints de dilatation en caoutchouc des ponts en béton, qui se détérioreront plus rapidement et nécessiteront un entretien et un remplacement plus fréquents.

Il convient de souligner que les remblais des routes ne sont normalement pas conçus comme des structures de contrôle des inondations, bien qu'ils pourraient bien l'être dans certaines zones. Il existe également des différences importantes entre les mécanismes d'inondation et d'érosion fluviale et côtière, qui ont une incidence sur la manière la plus efficace de minimiser les dommages causés aux remblais routiers par les inondations. Les mécanismes de défaillance courants des remblais routiers sont le débordement, l'infiltration, la canalisation, l'érosion par les vagues, l'abaissement de la résistance des matériaux par trempage et le glissement latéral sur le sol support. Il existe une grande variété de techniques d'adaptation et de contre-mesures qui ne peuvent être couvertes de manière exhaustive dans une directive de cette nature et il convient de se référer, par exemple, à la synthèse 496 (2016) du NCHRP pour ces mesures.

Les ponts sont généralement conçus par des ingénieurs en structure spécialisés, dont la plupart doivent être conscients des changements climatiques imminents qui sont susceptibles d'affecter les ponts pendant leur durée de vie, et doivent tenir compte de ces considérations. La conception des futurs ponts exigera que l'ingénieur en structure/ pont soit pleinement conscient du changement climatique prévu dans le bassin versant de la rivière/du cours d'eau que le pont enjambera, ainsi que de l'impact des changements des précipitations dans les bassins versants régionaux. Les changements de température et de vent prévus ainsi que le nombre de jours de chaleur devront tous être pris en compte dans la conception.

Un problème important affectant les structures du pont est l'affaiblissement ou la perte de soutien des piles en raison de l'affouillement de l'eau (figure 35). Toutes les rivières subissent un affouillement naturel, mais la construction de piliers et de culées de ponts modifie les caractéristiques du débit de la rivière (direction, vitesse et turbulence accrue), ce qui entraîne un affouillement supplémentaire à proximité des nouvelles structures. Cet effet dépend des caractéristiques de la configuration du canal de la rivière ainsi que du volume et de la vitesse de l'eau.

Avec l'augmentation prévue de l'intensité des tempêtes, ces dommages risquent d'augmenter et les conceptions devront intégrer des mesures supplémentaires de protection contre l'affouillement et l'érosion. De nombreuses techniques de prévision et de traitement de l'affouillement sont disponibles (TRL, 2000) mais devront être modifiées pour tenir compte des futurs changements climatiques. En général, la forme des piles doit être conçue de manière à réduire les turbulences en amont et en aval de celles-ci.



Figure 37 Affaissement du tablier du pont dû à l'affouillement de la pile de support

L'affouillement autour des fondations est généralement limité (figure 36), mais les semelles doivent être conçues ou protégées pour éviter de tels problèmes.



Figure 38 Affouillement localisé autour de la semelle de la pile du pont

Il ne faut pas non plus sous-estimer la nécessité de protéger le sol entourant les ponceaux contre l'érosion. Il est essentiel de prévoir des parois de tête et des parois latérales adéquates. On voit souvent des exemples où les murs d'aile "se séparent" du mur de tête, ce qui permet à l'eau de s'infiltrer derrière le mur d'aile et finit par entraîner l'érosion et l'effondrement (figure 37).



Figure 39 Séparation des murs des ailes du mur de tête d'un ponceau relativement neuf

S'assurer que le système de drainage fonctionne correctement est essentiellement une question d'entretien, même s'il y aura des exemples de ponceaux mal conçus avec un alignement ou une pente inadéquats par rapport aux canaux et aux lignes de fossé qui devront être réparés ou remplacés, généralement après que les défaillances se soient produites.

Il est important que la route ne réduise pas de manière significative les zones inondables, sinon les volumes d'eau potentiellement plus importants seraient limités à des voies d'écoulement plus étroites, ce qui entraînerait des vitesses de pointe plus élevées et un potentiel d'érosion plus important.

5.6.2 Considérations relatives à la conception

Il existe de nombreuses directives et codes pour la conception et la construction de grandes structures en béton et en acier, comme l'Overseas Road Note 9 (TRL, 2000). Cependant, peu de directives sont généralement disponibles concernant les petites structures. À cet égard, le document d'orientation Petites structures pour les routes rurales : A Practical Planning, Design, Construction & Maintenance Guide (Larcher et al, 2010) fournit des informations complètes pour aider les ingénieurs et les techniciens dans la planification et la fourniture de petites structures routières.

Ponts

Diverses questions concernant la conception des ponts doivent être prises en compte car les ponts sont normalement conçus pour durer entre 50 et 100 ans (ou plus pour les structures plus importantes). Outre les charges que les ponts sont conçus pour supporter, ils doivent être conçus pour supporter le volume d'eau prévu qui les traversera lors des pics d'inondation ainsi que d'autres problèmes potentiels décrits ci-dessous :

Débits d'eau maximums

Les débits d'eau maximums peuvent être calculés à l'aide de diverses techniques standard qui ne sont pas décrites en détail ici. Cependant, ces techniques utilisent des périodes de retour, qui sont des déterminations probabilistes de la fréquence des débits de pointe calculés pour différentes intensités de tempête. Les principaux changements apportés aux méthodes conventionnelles de conception des ponts concernent les périodes de retour. Celles-ci devront être mises à jour régulièrement en utilisant les dernières projections **des précipitations** prévues, déterminées à partir de la modélisation du climat

local¹⁵. En l'absence de telles périodes de retour révisées, il est également possible d'utiliser des scénarios réels de la pire éventualité basés sur des intensités de pluie spécifiques, mais ceux-ci donneront normalement lieu à des conceptions plus prudentes et plus coûteuses.

Les quantités et les vitesses d'écoulement de l'eau sont également basées sur diverses caractéristiques de surface (par exemple, le type de sol et l'exposition, la couverture végétale, etc.)). Avec le changement climatique, ces caractéristiques sont également susceptibles d'évoluer avec le temps et des questions comme celle-ci devront également être prises en compte dans le calcul des débits des rivières. Les changements de la végétation dus aux **variations de température ou de précipitations** sont également susceptibles d'affecter le type de débris transportés par les rivières (augmentation ou diminution des arbres, arbres plus grands ou plus petits, gros blocs rocheux, etc.

Pour tenir compte de l'augmentation potentielle des débits d'eau, les tabliers des ponts devront être plus hauts, les portées plus longues et les volumes de terrassement dans les remblais d'approche augmenteront considérablement (éventuellement avec des matériaux de meilleure qualité), ce qui entraînera inévitablement une forte augmentation des coûts des structures.

Culées

Les matériaux derrière les culées de pont doivent être aussi résistants à l'érosion que possible et compactés à une densité aussi élevée que possible pour éviter les dommages lors des inondations. Ils doivent également être protégés des écoulements d'eau en surélevant les murs des ailes, en appliquant un enrochement mortier ou d'autres méthodes de protection contre l'érosion (paniers en gabions ou matelas Reno) et en minimisant les turbulences d'écoulement autour d'eux. De nombreuses techniques de protection des culées contre l'érosion et l'affouillement figurent dans le rapport 587 du NCHRP (Barkdoll et al, 2007) et le choix optimal dépendra de la situation locale et des matériaux disponibles.

Piliers

Les piliers sont principalement endommagés par le affouillement de leurs fondations. L'affouillement est fonction de l'écoulement turbulent en amont, en aval et autour des fondations. La meilleure façon de réduire ce phénomène est de veiller à la forme optimale des piles et de fonder les supports sur des matériaux peu susceptibles d'être récurés. La profondeur et l'étendue de l'affouillement peuvent être estimées à partir de différents modèles (par exemple TRL, 2000) et cela, ainsi que le type de fondation et le matériau du substrat, doit être utilisé pour optimiser la conception. Les caractéristiques du lit du cours d'eau auront généralement la plus grande influence sur le type de fondation, qui aura un effet sur le potentiel d'affouillement et sera également affecté par l'affouillement induit. Si le lit du cours d'eau ne présente que de minces dépôts de matériaux alluviaux, on peut utiliser des fondations directement sur le substratum rocheux ou d'autres couches compétentes. Si le lit du cours d'eau présente des dépôts épais de matériaux fins, on utilise normalement des pieux. Il peut s'agir soit de pieux porteurs en bout de ligne si le substrat rocheux ou d'autres couches dures ne sont pas trop profondes, soit de pieux de friction où se produisent des dépôts excessifs de matériaux fins. Les pieux de friction doivent être conçus de manière à ce que en cas de affouillement, la longueur de la pile non exposée est encore suffisante pour fournir le support de friction nécessaire.

¹⁵ Les tableaux d'intensité, de durée et de fréquence (IDF) avec les quotas de changement climatique, avec quelques variations régionales des quotas en fonction du changement climatique prévu, devraient idéalement être élaborés de manière centralisée par les agences nationales et être maintenus à l'étude (par exemple EA, 2016 et ADB, 2018).

Structures

Les effets de l'augmentation des températures et des changements saisonniers et diurnes plus importants sur les structures des ponts et leurs composants devront être pris en compte lors de la conception de leur structure. Il s'agit là de considérations de conception normales, mais il faut y réfléchir un peu plus pour pouvoir faire face aux conditions prévues dans 50 ou 100 ans. La dilatation accrue des matériaux nécessitera des joints de dilatation plus importants, qui à leur tour nécessiteront de meilleurs matériaux d'étanchéité et d'imperméabilisation, ainsi qu'une maintenance accrue pour assurer leur bon fonctionnement. L'utilisation plus large de structures monolithiques qui évitent ou minimisent les appuis et les joints de dilatation pourrait également être envisagée.

L'un des défis posés par les joints de dilatation des ponts est qu'ils constituent un élément flexible et qu'ils nécessitent un entretien important. Certains types de joints sont eux-mêmes un point d'entrée pour l'eau qui peut s'écouler sur les éléments de la sous-structure et accélérer la détérioration. L'importance de la dilatation du pont dépend du type de structure, des changements de température, de la longueur du pont et du type de matériau utilisé (béton armé, poutrelle d'acier, etc.).

La plupart des pays disposent de "codes de conception des ponts", qui devront être continuellement mis à jour pour intégrer des caractéristiques qui rendront les ponts plus résistants au climat.

Ponceaux¹⁶

Il est essentiel que les ponceaux soient alignés avec soin le long de la route, de préférence perpendiculairement aux voies de drainage et de passage des vapeurs qui traversent la route. Lorsque l'eau en mouvement doit changer de direction soudainement, le risque d'érosion grave est rapidement accru. De même, les mesures de protection autour du ponceau doivent être telles que l'érosion de la formation adjacente ou du remblai soit minimisée lors des événements de débit d'eau normal. Il n'est généralement pas économiquement possible de protéger de l'érosion de longues distances de remblais, si ce n'est en veillant à ce que le remblai soit recouvert d'une bonne herbe locale bien enracinée et bien entretenue.

La capacité des ponceaux, comme les ponts, doit être conçue de manière à faire passer l'eau prévue à travers eux sans provoquer de barrage en amont. Des exemples ont été observés, par exemple, où une ligne de chemin de fer parallèle à une route et légèrement en amont comportait plusieurs ponceaux composés chacun de 3 boîtes d'un mètre carré. La route parallèle avait des ponceaux aux mêmes endroits en aval des ponceaux de la voie ferrée, mais ceux-ci n'étaient constitués que d'un seul tuyau de 600 mm - la capacité était donc manifestement insuffisante et l'on pouvait s'attendre à ce que le remblai de la route soit endommagé lors de fortes pluies.

En cas de risque de débordement du ponceau, les points bas doivent être éliminés et la route doit être aussi plate que possible pour éviter un écoulement turbulent localisé sur le remblai. La pente en aval de la berge sur la longueur du débordement potentiel doit également être aplatie pour réduire la vitesse de l'eau et minimiser l'érosion et le sapement.

Dans les grands bassins hydrographiques, l'utilisation de barrages et d'ouvrages de contrôle des crues en amont (généralement en coopération avec d'autres agences nationales) doit être envisagée pour essayer de minimiser les effets des tempêtes en cas de doute dans le calcul des volumes d'écoulement. Cela pourrait être envisagé dans le cadre des opérations de collecte des eaux.

¹⁶ Voir aussi BAD, 2018.

5.7 Construction

Plusieurs facteurs liés au changement climatique pourraient avoir un impact sur la construction des futures infrastructures de routes et de ponts, certains de manière négative et d'autres de manière positive.

Pendant les longues **périodes de sécheresse** prévues dans certaines régions (qui sont également plus chaudes), la disponibilité de l'eau pour la construction pourrait être limitée pendant des périodes plus longues et les distances de transport pourraient être plus longues nécessaire. Le coût de l'eau devrait également augmenter car la construction est en concurrence avec d'autres utilisations pour sa disponibilité limitée. Simultanément, l'eau appliquée aux couches pendant ces périodes de compactage s'évaporerait beaucoup plus rapidement et de plus grandes quantités d'eau seront nécessaires à la construction.

Lorsque la stabilisation des matériaux est utilisée à grande échelle (par exemple, les sables du centre du Mozambique), le temps de travail de la stabilisation (c'est-à-dire de l'ajout d'eau jusqu'au moment du compactage final et du rognage) sera considérablement réduit sous des températures de travail plus élevées.

Les taux d'autres réactions chimiques affectant la stabilisation et la dégradation des minéraux peuvent également être augmentés sous des températures élevées. Un avantage possible, cependant, de températures plus élevées peut être l'allongement des fenêtres pour le revêtement bitumineux tout au long de l'année, c'est-à-dire des périodes froides plus courtes).

Adaptation

En termes de construction, il convient de faire la distinction entre les infrastructures existantes, qui ne peuvent être modifiées du jour au lendemain, et les infrastructures qui doivent être reconstruites. Dans le cas de ces dernières, il y aurait de nombreuses possibilités d'introduire des solutions d'infrastructure routière plus résistantes au climat.

Dans le cas des infrastructures existantes, les résultats d'une analyse des risques dicteraient les actions qui nécessitent une attention immédiate (par exemple, la modernisation des systèmes de drainage). Les mesures d'adaptation pourraient être introduites progressivement (par exemple, lors de l'entretien ou de la réhabilitation/mise à niveau prévus) en fonction des priorités.

Le changement climatique pourrait nécessiter certains ajustements dans les processus de construction. **Les conditions de sécheresse**, par exemple, sont susceptibles d'entraîner de plus grandes pénuries d'eau, ce qui fera augmenter le coût de l'eau et, simultanément, le coût des projets de construction, à moins que des agents de surface (aides au compactage) soient ajoutés à l'eau de construction et/ou que les méthodes de compactage soient adaptées pour tenir compte de cette pénurie d'eau (par exemple, compactage à fort impact énergétique).

En plus d'affecter la disponibilité des ressources pour la construction (et aussi l'entretien) des routes, le changement climatique pourrait également affecter la fenêtre de travail sécuritaire et la productivité de la main-d'œuvre en extérieur, ce qui nécessiterait des ajustements dans les opérations. En cas de chaleur extrême, par exemple, les opérations de construction pourraient être déplacées à la nuit pour réduire le risque de stress thermique¹⁷.

À l'avenir, les saisons de construction pourraient se raccourcir ou s'allonger, et pourraient se déplacer plus tôt ou plus tard dans l'année. Ces changements sont inconnus à ce stade et varieront d'un pays à

¹⁷ Voir aussi : Kjellstrom, et al. (2009) ; Dunne et al. (2013) et Vivid Economics Ltd (2017).

l'autre, mais les ministères ou les services des routes concernés doivent être informés de cette possibilité, enregistrer les changements par rapport au statu quo et planifier en conséquence.

Pour réduire au minimum les problèmes liés aux changements climatiques sur les routes, il est essentiel que la construction respecte au moins les exigences minimales des spécifications standard recommandées, voire les dépasse. Dans certains cas, il peut être nécessaire de modifier ou d'adapter les spécifications locales pour tenir compte des divers changements climatiques potentiels, et ces modifications peuvent être spécifiques à un pays ou même à un district, selon le cas. Par exemple, le compactage (des sous-niveaux, des formations, des talus, des culées et des couches de chaussée) à des densités plus élevées que celles actuellement spécifiées augmente immédiatement la rigidité, réduit la perméabilité et le potentiel d'érosion et diminue les vides et le potentiel d'orniérage. Le compactage est l'une des activités de construction les moins coûteuses et ne doit pas être lésé. L'incorporation d'exigences de durabilité améliorées pour les matériaux de base peut être nécessaire lorsque l'on prévoit une élévation des eaux souterraines ou du niveau local de la mer.

La perte d'eau pendant la construction par temps chaud et sec peut être minimisée en construisant la nuit et en utilisant des équipements de recyclage pour l'ajout d'eau. Si ces options ne sont pas réalisables, la livraison plus rapide de plus grandes quantités d'eau (plus de citernes d'eau sur le site) et de réduire le temps de traitement de la construction (construction de longueurs plus courtes, rouleaux et niveleuses supplémentaires, etc. Des recherches sur les méthodes permettant d'utiliser des eaux de moins bonne qualité (par exemple, eau de mer, eau de forage saumâtre, effluents recyclés, etc.

Diverses autres pratiques de construction devront être modifiées pour tenir compte du changement climatique. Avec la stabilisation au ciment par exemple, il peut être nécessaire de construire des sections plus courtes à la fois, d'utiliser d'autres ciments à réaction plus lente pour la stabilisation (CEM IV et CEM V) ou même des mélanges de chaux et de cendres volantes. Le choix du type de stabilisateur (par exemple la qualité du ciment) deviendra important pour permettre un temps de travail maximal. L'utilisation de recycleurs in situ pour mélanger le stabilisateur et réduire le temps de construction doit également être envisagée. Leur coût élevé peut être justifié par la réduction potentielle des problèmes de construction, souvent rencontrés avec les ciments modernes. Les temps de rupture des émulsions de bitume seront beaucoup plus courts les jours de grande chaleur, ce qui nécessiterait également une modification des techniques de construction standard.

Rien ne peut être fait contre une détérioration plus rapide des matériaux non durables dans les structures routières à des températures plus élevées (par exemple, utilisation de liants à faible viscosité dans l'asphalte) - il faudra s'assurer que tous les matériaux utilisés sont d'une durabilité acceptable, bien que peu d'exemples de défaillances dues à la détérioration des matériaux ou à la durabilité pure aient été observés sur des routes à faible circulation. Au contraire, la durabilité est rarement une exigence de spécification pour les matériaux routiers à faible volume.

Lorsque de grands éléments en béton sont construits par temps chaud, des précautions doivent être prises pour limiter toute accumulation importante de chaleur dans le béton. Si la prise finale se produit lorsque le béton est en expansion à cause des températures élevées, un retrait "thermique" supplémentaire peut entraîner un retrait global potentiel important de l'élément. De même, le risque de fissures de retrait plastique ou de fissuration thermique en raison de gradients de température peut définir les exigences en matière de durcissement et de protection du béton. En outre, l'augmentation des températures signifie une évapotranspiration accrue, c'est pourquoi la peau du béton doit être protégée correctement contre l'évaporation jusqu'à ce qu'une certaine maturité ou résistance soit obtenue pour assurer une résistance et une durabilité suffisantes. Les méthodes et les outils destinés

à aider le producteur de béton à planifier et à prévoir le processus de durcissement d'une structure en béton dans des conditions ambiantes diverses et changeantes devront être améliorés. Au minimum, le producteur de béton doit consulter les prévisions météorologiques locales pour obtenir des données sur la température. L'augmentation des températures peut également nécessiter la mise en place de béton de masse pour les structures et les chaussées la nuit. Notez que l'amélioration des prévisions météorologiques locales est un exemple d'outil d'adaptation à faible regret.

5.8 Entretien

5.8.1 Description

La maintenance est un domaine fondamental qui devra certainement être abordé. L'entretien des routes ne doit pas être considéré ou évalué comme une mesure d'adaptation - l'entretien n'est pas lié au changement climatique mais a toujours été nécessaire quelles que soient les conditions climatiques. Il est peu probable que les techniques changent de manière significative : cependant, la fréquence et les types d'entretien devront être adaptés aux changements climatiques, en particulier aux événements météorologiques extrêmes et à l'augmentation des températures.

Une attention particulière devra être accordée à la tonte de l'herbe plus luxuriante, à la taille plus fréquente des arbustes et buissons dans la réserve routière et les drains (pour minimiser les risques d'incendie et masquer les panneaux de signalisation), au nettoyage des routes (en particulier des débris d'inondation et du sable soufflé par le vent), **au nettoyage et à l'entretien des systèmes de drainage**, à l'élimination des dégâts causés par les tempêtes, etc. Récemment, des dommages causés par des feux de forêt aux glissières de sécurité et aux revêtements bitumineux ont été observés, pour la première fois dans certaines régions (figure 38).



Figure 40 Dommages aux poteaux de glissière de sécurité et aux revêtements bitumineux causés par les incendies

Sur la base d'entretiens avec les autorités routières de toute l'Afrique, il a été établi qu'environ un tiers des dépenses routières dans de nombreux pays africains sont consacrées à l'entretien. Selon les meilleures pratiques internationales, environ la moitié des dépenses routières devrait être consacrée à l'entretien et l'autre moitié à de nouveaux investissements routiers. Il est donc clair que **les dépenses d'entretien actuelles sont inadéquates** et que la nécessité de dépenses d'entretien supplémentaires pour faire face à d'éventuels changements climatiques sera inévitable dans la plupart des régions.

5.8.2 Adaptation

Il a été suggéré que la mesure optimale pour s'adapter au changement climatique consisterait à entretenir les routes de manière à ce qu'elles soient toujours dans un état aussi proche que possible de la perfection, auquel cas leur résilience à l'impact climatique est à tout moment maximale (COWI, 2010). Toutefois, cela est généralement plus facile à dire qu'à faire, principalement en raison des problèmes de financement, de compétences et de ressources. Cependant, un entretien régulier et de qualité est une condition fondamentale pour la résilience climatique.

La mise en place d'une base de données routière complète avec des évaluations visuelles régulières de tous les attributs classiques (par exemple, l'état du revêtement, l'état de la chaussée, y compris les fissures, l'orniérage, les nids de poule, les rapiécages, la déformation, etc. et la qualité de roulement) sera cruciale pour l'efficacité des stratégies d'entretien¹⁸. Cela permettra de surveiller l'évolution de l'état des routes et les besoins d'entretien qui en découlent au fil du temps, ce qui peut être lié en permanence à l'évolution des conditions climatiques et peut être utilisé pour identifier les tendances changeantes et les besoins budgétaires. Toutefois, cela repose sur l'hypothèse que les informations sur l'évolution des conditions routières et climatiques seront tenues à jour.

Des problèmes tels que la fissuration des routes revêtues, les ruptures de bordure et les nids de poule seront identifiés lors d'enquêtes visuelles sur l'état des routes et ces problèmes doivent être corrigés avant que des pluies ne tombent afin d'éviter des dégâts importants sur les routes revêtues.

L'entretien du drainage, en particulier, sera crucial. Il est fort possible qu'en raison des longues périodes de sécheresse prévues, l'entretien du drainage soit réduit ou négligé. Toutefois, au cours de ces périodes de sécheresse, le risque de tempêtes plus intenses et plus sévères sera beaucoup plus élevé et les dommages qui en résultent pour les infrastructures pourraient être dévastateurs si l'entretien du système de drainage a été négligé et est médiocre. Il sera important de s'assurer que tous les drains latéraux, transversaux et en onglet sont propres, bien calibrés et efficaces à tout moment.

Dans les zones où l'on prévoit des conditions plus sèches (et plus venteuses), l'approche du contrôle de la végétation sur les formations, les talus et les pentes coupées devra être telle qu'elle soit régulièrement dégagée par coupe afin de minimiser le potentiel de brûlage incontrôlé lors des feux de forêt. Dans des zones spécifiques, les herbes effectivement plantées devront être sélectionnées pour fournir un mélange d'herbes à racines profondes et d'herbes de surface (ou rhizomes) afin de protéger la surface contre l'érosion et les racines contre les dommages causés par le feu et de stabiliser le sol. Les graminées devront être adaptées à la zone (locales et résistantes à la sécheresse si nécessaire) et plantées sur des pentes aplaties le cas échéant pour favoriser leur croissance, en gardant à l'esprit qu'il est généralement difficile d'établir la végétation sur des pentes plus raides qu'environ 1:1. Il peut

¹⁸ L'AfCAP finance actuellement un projet de recherche et de renforcement des capacités sur la gestion des actifs pour les routes rurales

également être nécessaire de changer d'espèce dans certaines zones en fonction des changements climatiques afin d'encourager des plantes plus résistantes à la sécheresse, par exemple.

Le personnel d'entretien devra être plus soigneusement formé aux techniques et opérations d'entretien proprement dites afin de garantir qu'elles soient effectuées avec compétence et efficacité, en veillant à bien comprendre les raisons de l'exécution des diverses activités et les conséquences d'une mauvaise exécution de celles-ci.

Il est également important de trouver le bon équilibre entre la maintenance des équipements et la maintenance de la main-d'œuvre. Certaines opérations ne peuvent pas être effectuées efficacement à l'aide de techniques d'entretien manuel et il est essentiel, par exemple, d'utiliser périodiquement une niveleuse pour redonner forme à une route non revêtue - l'élimination des ornières et des dépressions sur les routes non revêtues ne peut pas être effectuée efficacement en utilisant de la main-d'œuvre, par exemple.

Lorsque la maintenance basée sur le travail est susceptible d'être efficace et efficiente, des systèmes de maintenance communautaires devraient être mis en place. Cela se traduit généralement par une plus grande appropriation des installations ainsi que par la motivation, l'expérience et les ressources nécessaires pour effectuer des réparations rapides et efficaces en fonction des besoins, mais surtout immédiatement après un événement (choc) extrême.

L'optimisation de la maintenance pour la résilience climatique est similaire aux programmes de maintenance normaux en ce qu'elle nécessite un certain nombre d'intrants et de phases comme suit :

- Développer une base de données pour l'entretien des routes, ainsi qu'une base de données actualisée des variables climatiques (changeantes) pertinentes
- Donner la priorité à l'entretien et à l'amélioration du drainage dans les zones les plus exposées aux inondations
- Augmenter la fréquence de l'entretien du drainage qui est discuté dans les manuels par rapport à la fréquence accrue des grandes tempêtes
- Réparer et nettoyer les canalisations et les structures de drainage dans les zones à haut risque avant la saison des pluies, bien que le moment de cette opération soit susceptible de devenir moins prévisible à l'avenir
- Allouer plus de fonds pour l'entretien des routes actuelles.

Les procédures d'entretien et les actions quotidiennes à l'épreuve du climat doivent être développées dans des manuels spécifiques à l'environnement et aux changements attendus des conditions environnementales dans un district ou une région.

Un aspect de l'entretien qui ne doit pas être sous-estimé est celui des réparations d'urgence à la suite de tempêtes ou d'inondations intenses. Il est inévitable que des dommages aux routes et aux ponts se produisent périodiquement, et des systèmes et procédures devraient être mis en place pour faciliter le déploiement rapide des ressources afin de rétablir la mobilité et l'accès après de tels événements. Les procédures normales de passation de marchés sont inappropriées dans de tels cas et les ressources appropriées doivent être disponibles à bref délai. Des techniques innovantes pour la restauration temporaire des dommages structurels doivent être développées et les ressources appropriées doivent être disponibles en permanence. Des fonds d'urgence sont nécessaires pour soutenir ces mesures de réaction rapide.

Conformément à ce qui précède, la réponse opérationnelle aux extrêmes climatiques devra être mise en œuvre par les autorités routières compétentes, lorsque cela se justifie et est faisable. Il faudra notamment que les équipes d'urgence soient en attente et informées par des prévisions

météorologiques locales de haute qualité pour imposer des restrictions d'accès à certaines routes, déblayer les routes des débris, détourner le trafic vers d'autres routes (si possible) et mettre en œuvre des actions pour rétablir l'accessibilité. En plus de ce qui précède, une communication devrait être mise en place pour informer les communautés sur les liaisons routières endommagées et les actions associées pour rétablir l'accessibilité.

5.9 Autres questions

Il ne faut pas sous-estimer les autres problèmes liés aux effets du changement climatique. Ceux-ci sont principalement liés à l'augmentation des températures.

Un exemple a été noté où l'expansion des glissière de sécurité métalliques a affecté les rails. Lorsque les ancrages étaient mal serrés pour permettre le mouvement, ce mouvement s'est produit sans déformation des rails ou des supports (figure 39.a). Lorsque les rails étaient fermement boulonnés au support (en bois dans ce cas), ils avaient été perturbés et une certaine déformation des glissière de sécurité et des points d'ancrage a été constatée (figure 39.b).



Figure 41 Effet de la dilatation des glissières de sécurité métalliques : a) desserrés et b) serrés de manière à éviter les mouvements thermiques et à provoquer des déformations (mouvement quotidien visible sur la photo de gauche

Une question similaire liée à des conditions de température plus élevées est l'impact des marquages routiers. La plupart des routes d'accès rurales à faible trafic ne sont pas marquées (lignes centrales, etc.), mais là où elles se trouvent, en particulier sur l'asphalte, elles sont souvent associées à des fissures importantes autour d'elles. C'est un effet de la différence de température entre l'asphalte foncé qui absorbe la chaleur et la peinture blanche qui réfléchit la chaleur, et de la dilatation différentielle qui en résulte. De telles fissures nécessiteraient un entretien régulier (colmatage des fissures).

5.10 Résumé

Les mesures d'adaptation possibles pour chaque variable climatique et chaque problème technique sont résumées dans les tableaux suivants (Tableau 16 à Tableau 22). Il convient de noter que nombre d'entre elles sont des solutions et des innovations génériques et que les solutions particulières basées sur les connaissances locales, l'expérience récente et les produits propriétaires disponibles dans la région doivent être prises en compte lorsqu'elles sont rentables. L'objectif principal étant de rendre l'installation aussi résistante que possible au climat pour un coût minimal, il est essentiel que des mesures simples et peu coûteuses soient évaluées dans un premier temps pour déterminer si elles sont adaptées et pratiques. Si ces mesures sont éliminées au motif qu'elles sont inadaptées, des mesures plus coûteuses doivent être envisagées. Toutefois, l'expérience a montré que des techniques simples peuvent être très rentables.

Tableau 16 Dangers et adaptations liés à l'augmentation des précipitations

Facilité	Conséquence - Problèmes et dommages éventuels	Mesures préventives proposées Suggestions de remèdes
Routes de terre non aménagées	Inondation (eaux de surface excessives) ramollissement des matériaux Impraticabilité plus fréquente sur les matériaux de mauvaise qualité Érosion de la surface Perte de la forme de la route Blocage (envasement) des drains	Rehausser le niveau au standard à celui de routes de terre aménagées Relever le niveau
Routes de terre aménagées	Inondation (eaux de surface excessives) Ramollissement des matériaux Impraticabilité Érosion de la surface Perte de forme Blocage des canalisations	Améliorer les processus de construction Améliorer le drainage Rehausser le niveau au standard à celui de routes en terre battue (élever la surface de roulement et amélioration du drainage).
Routes en terre battue	Ramollissement du matériau Érosion de la surface Perte de forme Blocage des drains	Amélioration de la sélection des matériaux Amélioration de la construction Amélioration de l'entretien
Routes revêtues	Perte de résistance des matériaux de la couche Endommagement des revêtements minces Endommagement des bords de la chaussée Blocage des drains et des ponceaux Érosion des accotements non revêtus	Relever le niveau des routes Utiliser des conceptions structurelles et des revêtements appropriés Garantir une construction de haute qualité Utiliser des revêtements appropriés Augmenter le nombre de ponceaux et de drains transversaux et inverser les pentes Bon entretien (en particulier des fissures de surface et des nids de poule)

Travaux de terrassement	<p>Instabilité accrue des pentes Saturation et affaiblissement des sols Érosion de la surface et des drains Sous-découpage Croissance excessive de la végétation Envasement et blocage des drains</p>	<p>Des efforts de compactage plus importants Bon drainage (de surface et de sous-sol) Bonne conception (facteurs de sécurité plus élevés) Davantage de mesures de stabilisation des pentes Entretien accru Techniques de bio-ingénierie pour stabiliser les pentes. Bon entretien</p>
Sols support	<p>Expansion et fissuration Effondrement et tassement de support Ramollissement Plus de circulation des matériaux salins Déformation des structures rigides Érosion dans la réserve routière Probabilité accrue de formation de cavités</p>	<p>Identification correcte des sol support problématiques Mesures correctes pour remédier aux problèmes Éviter ou traiter de manière appropriée les sol support problématiques Bonne conception Bon drainage</p>
Drainage (eau provenant de l'emprise routière)	<p>Accumulation d'eau à proximité de la route Érosion de la surface de la route et des drains Ramollissement des matériaux sous la route Fragilisation des accotements non revêtus Plus de défaillances dans trace des roues externes de véhicules</p>	<p>Une bonne conception et une bonne construction du système de drainage Utilisation de matériaux de meilleure qualité Entretien régulier et de qualité</p>
Drainage (eau provenant de l'extérieure de l'emprise de la route)	<p>Érosion des berges et des culées des ponceaux et des ponts Ensablement/sédimentation des ponceaux et des ponts Affouillement des fondations des ponts Débordement des ponts Dommages causés aux ponts par les débris</p>	<p>Modifier les périodes de retour dans la conception ou l'utilisation des précipitations extrêmes prévues Augmenter les ouvertures des ponceaux et des ponts Bonne conception, y compris le potentiel de débordement (remblais et dérives au niveau du sol naturel) Bon entretien Conception visant à minimiser les effets des débris (enlèvement ou barrières/pièges en amont) Utilisation de barrages de contrôle des inondations</p>

Construction	Humidité excessive dans les matériaux Retards de construction Réduction des périodes de travail et augmentation des délais Dommages causés par l'eau à des travaux partiellement achevés Davantage de barrages à caissons pendant la construction	Difficile à atténuer Construire en saison sèche Utilisation accrue de la chaux vive Amélioration de la programmation de la construction en fonction des prévisions météorologiques
Entretien	Entretien supplémentaire nécessaire Plus de débroussaillage Dommages supplémentaires aux drains Nécessité de conserver la bonne forme des surfaces routières non revêtues Amélioration de l'entretien des accotements non revêtus Comblir les nids de poule et colmater les fissures des routes revêtues	Mise en place de ressources et de systèmes adéquats, alignés sur les prévisions météorologiques Programmes de maintenance des communautés locales Bonne formation des inspecteurs et des équipes de maintenance Entretien plus régulier Entretien de bonne qualité

Tableau 17 Dangers et adaptations liés à la diminution des précipitations (mais à des événements plus extrêmes)

Facilité	Conséquence - Problèmes et dommages éventuels	Mesures préventives proposées Suggestions de remèdes
Routes de terre non aménagées	Usure et perte accrues de graviers sur les surfaces plus sèches Augmentation des émissions de poussières sur de plus longues périodes Développement accru des matériaux meubles et des rugosités (ondulations) Détérioration plus rapide du gravier en raison de la perte de cohésion des fines	Matériau compact de meilleure qualité Mise à niveau aux normes techniques
Routes de terre aménagées	Usure et perte accrues de graviers sur les surfaces plus sèches Augmentation des émissions de poussières sur de plus longues périodes Développement accru des matériaux meubles et des rugosités (ondulations) Détérioration plus rapide du gravier en raison de la perte de cohésion des fines	Améliorer les processus de construction Augmenter le compactage Augmenter l'entretien Mise à niveau aux normes de routes en terre battue ou revêtues
Routes en terre battue	Développement accru de la rugosité (ondulation) Augmentation des pertes de matériaux Période de poussière plus longue	Amélioration de la sélection des matériaux Amélioration de la construction Amélioration de l'entretien Mise à niveau aux normes de routes revêtues

Routes revêtues	<p>Dommages aux revêtements minces et à l'asphalte</p> <p>Détérioration plus rapide du liant</p> <p>Teneur en humidité d'équilibre réduite - chaussées plus résistantes</p>	<p>Utiliser des conceptions structurelles appropriées</p> <p>Assurer une construction de haute qualité</p> <p>Utiliser des revêtements et des liants appropriés</p> <p>Bon entretien</p>
Travaux de terrassement	<p>Séchage et fissuration</p> <p>Entrée rapide de l'humidité dans les fissures de tension dans les pentes (défaillances de pentes dues au retrait et aux fissures de tension)</p> <p>Augmentation de l'érosion due à des tempêtes plus intenses</p> <p>Dommages causés à la végétation et au mobilier routier par la multiplication des feux de forêt</p> <p>Il est plus difficile d'établir une protection contre l'érosion par la bio-ingénierie</p>	<p>Bon drainage pour dissiper rapidement les pluies intenses périodiques</p> <p>Bonne conception</p> <p>Techniques de bio-ingénierie pour stabiliser les pentes</p> <p>Maintenir la végétation coupée pour éviter les feux de forêt Utiliser des plantes et des herbes résistantes à la sécheresse</p> <p>Évitez les équipements en bois en bordure de route (glissières de sécurité, panneaux de signalisation, etc.)</p> <p>Réduire les angles de pente pour ralentir le ruissellement</p>
Sols support	<p>De plus grandes fluctuations d'humidité dans les sols argileux</p> <p>Séchage accru des matériaux</p> <p>Rétrécissement et fissuration</p> <p>Plus de précipitation de sels</p>	<p>Identification correcte des sols supports problématiques</p> <p>Mesures correctes pour remédier aux problèmes Bonne conception</p> <p>Construire dans des conditions d'humidité estimées en service</p>
Drainage (eau provenant de l'emprise routière)	<p>Plus d'érosion (sols plus secs) Plus d'envasement et de sédimentation</p> <p>Risque de brûlage plus élevé en cas de non-entretien</p> <p>Moins de végétation pour lier les sols</p>	<p>Bonne conception du drainage</p> <p>Drain végétal</p> <p>Maintenir la végétation coupée</p>
Drainage (eau provenant de l'extérieure de l'emprise de la route)	<p>Plus d'érosion</p> <p>Plus d'envasement et de sédimentation Débordement des ponts</p> <p>Des inondations plus graves</p> <p>Dommages causés aux ponts et aux ponceaux par les débris</p>	<p>Modifier les périodes de retour dans la conception Concevoir pour éviter l'affouillement et l'érosion après les périodes de sécheresse</p> <p>Bonne conception structurelle Bonne maintenance</p>
Construction	<p>Insuffisance d'eau pour la construction</p> <p>Perte plus rapide d'eau de compactage due à l'évaporation</p>	<p>Utilisation de techniques de compactage innovantes et d'agents réducteurs d'eau</p> <p>Rouleaux plus grands ou différents</p> <p>Utilisation de l'eau de moins bonne qualité pour la construction</p> <p>Techniques de construction modifiées</p>
Entretien	<p>Plus d'entretien des surfaces non revêtues</p> <p>Plus d'entretien pour réparer les dégâts causés aux canalisations</p> <p>Augmentation des réparations de l'érosion de surface</p>	<p>Système de gestion de l'entretien</p> <p>Maintenir l'herbe et les buissons courts pour éviter les incendies</p> <p>Maintenir les drains et les ponceaux bien entretenus</p>

Tableau 18 Dangers et adaptations liés à l'augmentation des températures

Facilité	Conséquence - Problèmes et dommages éventuels	Mesures préventives proposées Suggestions de remèdes
Routes de terre non aménagées	Un assèchement plus rapide de la route Augmentation de la fissuration Développement accru de la rugosité Génération plus rapide de poussière Un assèchement plus rapide de la route Augmentation de la fissuration	Pas d'atténuation Rehausser le niveau au standard à celui de routes de terre battue
Routes de terre aménagées	Un assèchement plus rapide de la route Augmentation de la fissuration Développement accru de la rugosité (ondulation) Génération plus rapide de poussière et de matières meubles	Pas d'atténuation Rehausser le niveau au standard à celui de routes de terre battue
Routes en terre battue	Un assèchement plus rapide de la route Augmentation de la fissuration Développement accru de la rugosité (ondulation) Génération plus rapide de poussière et de matériaux meubles	Amélioration de la sélection des matériaux Amélioration de la construction Amélioration de l'entretien Application de palliatifs contre la poussière
Routes revêtues	Vieillesse plus rapide des liants bitumineux Ramollissement du bitume dans l'asphalte et déformation plus rapide à chaud Expansion et flambage des routes et des structures en béton	Utiliser des revêtements plus appropriés Utiliser des liants différents (plus durs) dans l'asphalte Modification des mélanges de béton et du renforcement Utilisation d'additifs pour le béton Un entretien plus fréquent
Travaux de terrassement	Un séchage et une fissuration plus rapides Perte de végétation (ou changement d'espèces) sur les pentes latérales (eau insuffisante) Davantage d'incendies de forêt entraînant la perte du rôle liant des racines pour le sol Augmentation de l'érosion due à la perte de végétation	Un meilleur compactage et une meilleure protection des pentes pour minimiser l'assèchement Amélioration de la sélection des matériaux de surface du sol Utilisation d'une végétation à racines profondes et résistante à la sécheresse sur les pentes du sol Techniques de bio-ingénierie pour stabiliser les pentes. Maintenir l'herbe et les buissons coupés bas pour réduire les incendies

Sols support	Des effets minimales Un certain rétrécissement des sols Plus de mouvement des sels dans les matériaux salins	Isolement des sols sensibles pour minimiser l'assèchement. Utilisation d'une végétation à racines profondes et résistante à la sécheresse sur les pentes du sol Éviter les matériaux salins dans les chaussées
Drainage (eau provenant de l'emprise routière)	Assèchement, fissuration et érosion plus rapides Perte de végétation (ou changement d'espèces) sur les pentes latérales Davantage d'incendies de forêt entraînant la perte du rôle liant des racines pour le sol	Maintenance accrue Meilleur choix de matériau ou de type de revêtement Garder la végétation coupée bas
Drainage (eau provenant de l'extérieur de l'emprise de la route)	Plus grande expansion/contraction des éléments du pont Des gradients de température plus importants dans les éléments en béton Plus d'érosion et d'envasement	Bonne conception - béton et renforcement Structures de pont innovantes (intégrales, etc.) Bon entretien
Construction	Réactions plus rapides lors de la stabilisation du ciment Séchage plus rapide du béton Des besoins en eau plus importants pour la construction Risque de contrainte thermique (main-d'œuvre)	Des processus de construction plus rapides (machines de recyclage) Des rouleaux plus grands ou différents Un meilleur durcissement du béton est nécessaire
Entretien	Veiller à ce que la végétation soit coupée afin de réduire les feux de forêt Entretien régulier des éléments de déplacement du pont Risque de stress thermique (main-d'œuvre)	Un entretien plus fréquent Maintenir la végétation à faible hauteur Aligner la programmation de la maintenance sur les prévisions météorologiques

Tableau 19 Dangers et adaptations liés à la baisse des températures

Facilité	Conséquence - Problèmes et dommages éventuels	Mesures préventives proposées Suggestions de remèdes
Routes de terre non aménagées	Aucun effet, sauf à des altitudes extrêmes - gel de l'eau à la surface de la route	
Routes de terre aménagées	Aucun effet, sauf à des altitudes extrêmes - gel de l'eau à la surface de la route	
Routes en terre battue	Aucun effet, sauf à des altitudes extrêmes - gel de l'eau à la surface de la route	

Routes revêtues	Réduction des fenêtres pour la construction de revêtements bitumineux Vieillessement moins rapide des liants bitumineux Fracture plus fragile du bitume à froid	Utiliser des revêtements et des liants appropriés Un entretien plus fréquent
Travaux de terrassement	Effet minime	
Sols support	Effet minime	
Drainage (eau provenant de l'emprise routière)	Effet minime Des gradients de température plus importants dans les éléments en béton	
Drainage (eau provenant de l'extérieure de l'emprise routière)	Effet minime	
Construction	Réduction des périodes de travail pour certaines opérations (pavage, stabilisation)	Utilisation de conceptions innovantes
Entretien	Entretien accru des revêtements bitumineux (colmatage des fissures et réparation des nids de poule) Fermeture des routes après la décongélation des matériaux congelés	

Tableau 20 Dangers et adaptations liés à l'augmentation du vent (et aux feux de forêt qui en résultent)

Facilité	Conséquence - Problèmes et dommages éventuels	Mesures préventives proposées Suggestions de remèdes
Routes de terre non aménagées	Un assèchement plus rapide Augmentation des taux de détérioration en raison de la perte de fines Accumulation accrue de sable	Rehausser le niveau au standard à celui de routes de terre battue Précautions contre l'accumulation de sable (entretien accru, pièges à sable, etc.)
Routes de terre aménagées	Un assèchement plus rapide Augmentation des taux de détérioration en raison de la perte des fines Accumulation accrue de sable	Rehausser le niveau au standard à celui de routes de terre battue Précautions contre l'accumulation de sable (entretien accru, pièges à sable, etc.)
Routes en terre battue	Augmentation des taux de détérioration en raison de la perte de fines Accumulation accrue de sable	Amélioration de la sélection des matériaux Amélioration de la construction Amélioration de l'entretien Précautions contre l'accumulation de sable (entretien accru, pièges à sable, etc.)
Routes revêtues	Accumulation accrue de sable Dommages éventuels aux revêtements bitumineux causés par le feu	Précautions contre l'accumulation de sable (entretien accru, pièges à sable, etc.)

Travaux de terrassement	Perte de végétation due au brûlage Érosion accrue des pentes latérales Dommages causés au mobilier routier par les incendies	Techniques de bio-ingénierie pour stabiliser les pentes. Maintenir la végétation basse Éviter le mobilier routier en bois
Sols support	Aucun effet Augmentation de l'érosion due à la perte de végétation (incendies)	Amélioration de l'entretien
Drainage (eau provenant de l'emprise routière)	Perte de végétation due au brûlage Davantage d'érosion des drains	Bonne conception du drainage Un entretien régulier et de qualité (végétation courte pour minimiser les risques d'incendie)
Drainage (eau provenant de l'extérieure de l'emprise de la route)	Plus grande charge de vent sur les ponts Perte de végétation due au brûlage Plus d'érosion des drains Davantage de débris dans les eaux de crue en raison des dommages causés par le feu Dommages causés par le feu aux ponts (en bois principalement mais aussi en béton) Davantage de dommages à la protection contre l'érosion (vagues)	Concevoir des ponts plus solides Entretien de la végétation et de la brousse pour éviter les incendies Éviter les structures en bois Amélioration des mesures de protection contre l'érosion
Construction	Plus de poussière Évaporation plus rapide de l'eau de construction	Palliation de la poussière Techniques de construction modifiées
Entretien	Augmentation de l'entretien des routes non revêtues pour minimiser les ondulations résultant de la perte de poussière Nettoyage régulier des débris de la rivière et de la végétation du bassin versant	Dragage des routes pour l'enlèvement des ondulations Déblaiement des installations de drainage Davantage d'extraction de sable dans les zones côtières et arides Amélioration du contrôle de la végétation pour réduire les incendies

Tableau 21 Dangers et adaptations liés à l'élévation du niveau de la mer et aux ondes de tempête

Facilité	Conséquence - Problèmes et dommages éventuels	Mesures préventives proposées Suggestions de remèdes
Routes de terre non aménagées	Inondations et dégâts causés par les tempêtes Augmentation de la teneur en humidité des sols supports Augmentation de l'érosion et de l'envasement Perte de praticabilité	Pas d'atténuation possible Rehausser le standard à un niveau élevé
Routes de terre aménagées	Inondations et dégâts causés par les tempêtes Augmentation de la teneur en humidité des sols supports Augmentation de l'érosion et de l'envasement Perte de praticabilité	Pas d'atténuation possible Rehausser le standard à un niveau élevé
Routes en terre battue	Inondations et dégâts causés par les tempêtes Augmentation de la teneur en humidité des sols Érosion et envasement	Amélioration de la sélection des matériaux Amélioration de la construction Amélioration de l'entretien Placer sur un remblai surélevé
Routes revêtues	Détérioration des revêtements routiers par les sels et l'impact de l'eau Dépôt de débris Augmentation de la teneur en humidité du sol support et réduction du support	Utiliser des revêtements appropriés Utiliser des sols supports trempés Entretien plus fréquent Protection contre les dégâts causés par le sel
Travaux de terrassement	Augmentation du taux d'humidité avec l'élévation du niveau de la mer Fluctuation des niveaux d'humidité avec des poussées Réduction de la résistance des sols	Protection par les barrières Reconstruction pour augmenter le niveau des routes au-dessus du niveau naturel du sol Dérives et chaussées en béton
Sols support	Augmentation de la teneur en humidité	Des chaussées plus épaisses pour protéger les sols supports faibles
Drainage (eau provenant de l'emprise routière)	Accumulation d'eau à proximité de la route Erosion Ramollissement des matériaux	Une bonne conception du drainage Un entretien régulier et de qualité
Drainage (eau provenant de l'extérieure de l'emprise de la route)	Affouillement des fondations Dépôt de débris Augmentation des dégâts causés par le sel sur le béton et l'acier	Augmenter la protection (barrières) Utiliser des revêtements résistants aux chlorures sur le béton Éviter les composants en fer et en acier Utilisation accrue des remblais/levages Bonne conception Bon entretien

Construction	Conditions plus humides Eaux salines Nouvelles routes (planification et conception)	Procédures de construction innovantes Prendre des précautions contre les sels solubles
Entretien	Entretien accru dans les zones côtières et de basse altitude Augmentation des dommages causés par les tempêtes	Assurer un drainage adéquat Utiliser la végétation pour contrôler l'humidité (bio-ingénierie) Développer des systèmes de réponse rapide informés par des prévisions météorologiques de haute qualité

Tableau 22 Dangers et adaptations liés aux variations du niveau des eaux souterraines

Facilité	Conséquence - Problèmes et dommages éventuels	Mesures préventives proposées Suggestions de remèdes
Routes de terre non aménagées	Sol supports plus humides ou plus sèches	Pas d'atténuation possible Rehausser le niveau au standard à celui de routes de terre battue
Routes de terre aménagées	Sol supports plus humides ou plus sèches	Pas d'atténuation possible Rehausser le niveau au standard à celui de routes de terre battue
Routes en terre battue	Sol supports plus humides ou plus sèches	Des structures de chaussée plus épaisses ou plus minces selon les besoins Drainage du sous-sol si nécessaire
Routes revêtues	Sol supports plus humides ou plus sèches Des conditions plus salines affectant les structures des chaussées	Des structures de chaussée plus épaisses ou plus minces selon les besoins Précautions contre les dommages causés par le sel soluble Drainage du sous-sol si nécessaire
Travaux de terrassement	Instabilité des pentes (localisée)	Incorporation de mesures de stabilisation des pentes
Sols support	Mouvements volumétriques possibles	Conception pour les sols à problèmes
Drainage (eau provenant de l'emprise routière)	Les infiltrations et les fontaines localisées	Intégrer des drains de sous-sol
Drainage (eau provenant de l'extérieure de l'emprise routière)	Modification du type de surface pour l'évaluation du ruissellement Autrement, comme pour toute autre structure	Pas d'exigences particulières Modification des quantités de ruissellement
Construction	Des conditions de travail difficiles	Utilisation de techniques de construction innovantes et d'agents réducteurs d'eau
Entretien	Pas de changement notable	L'entretien éventuel des drains souterrains doit être ajouté à l'entretien normal

6 Résumé et conclusions

L'Afrique est l'une des régions les plus vulnérables du monde en ce qui concerne les impacts du changement climatique. Au cours des quatre dernières décennies, les pays africains ont connu plus de 1 400 catastrophes météorologiques enregistrées qui ont causé la mort de plus de 600 000 personnes, laissé 7,8 millions de personnes sans abri (99 % à cause des inondations et des tempêtes) et touché environ 460 millions de personnes.

La plupart des routes rurales à faible trafic en Afrique sont utilisées pour l'accessibilité, par opposition à la mobilité. Avec les changements attendus des conditions climatiques (le Roux et al, 2016) résultant du changement climatique, on peut donc s'attendre à ce que la détérioration continue et périodique des réseaux routiers ruraux à faible trafic existants en Afrique subsaharienne se poursuive à une échelle de plus en plus fréquente.

Cette ligne directrice aborde les questions des méthodologies appropriées et économiques pour les évaluations de la vulnérabilité et des risques, de la hiérarchisation des interventions d'adaptation et identifie une série de considérations de conception pour améliorer la résilience des routes d'accès rurales. La disponibilité des fonds est cruciale pour la mise en œuvre de toute mesure d'adaptation et il faudra trouver un équilibre délicat entre les mesures appropriées et les fonds disponibles. La vaste gamme de mesures identifiées dans la ligne directrice couvre la plupart des éventualités et les mesures ou combinaisons de mesures les plus appropriées devront être identifiées et conçues par les ingénieurs concernés, en suivant les principes normaux de conception de haute qualité. De nombreuses contre-mesures nécessitent une conception spécialisée, et cela ne doit pas être omis.

L'importance cruciale d'un drainage adéquat, avec des pratiques de maintenance opportunes et de qualité, est également soulignée et des conseils sont donnés. La fréquence et les types d'entretien devront être adaptés aux changements climatiques, en particulier aux événements météorologiques extrêmes et aux températures plus élevées.

Cette ligne directrice doit être utilisée conjointement avec le manuel d'adaptation au climat qui l'accompagne, les lignes directrices pour la gestion des changements et le manuel d'évaluation visuelle.

Références

- AASHO (1964). A Guide for Functional Highway Classification. American Association of State Highway Officials, National Association of Counties, National Association of County Engineers. Washington DC.
- ADB (2011). Guidelines for Climate Proofing Investment in the Transport Sector Road Infrastructure Projects
- ADB (2018). Adjusting Hydrological Inputs to Road Design for Climate Change Risk Based on Extreme Value Analysis. Report ADB PPTA 8957-VIE. Asian Development Bank, Manilla.
- Adger, W.N., Arnell, N.W. and Tompkins, E.L. (2005). Successful adaptation to climate change across scales. *Global Environmental Change*, 15, 77-86.
- Administração Nacional de Estradas (ANE), (2016). Consultancy Services for Assessment of Climate Vulnerability and Identification of Options for Building Climate Resilience into the Lower Limpopo Roads Network in Gaza Province: Draft Climate Resilience Report. Contract No. 10/DG/2014, March 2016.
- AfCAP (2013). Use of road works to enhance community water supplies in Mozambique -Final Design Report. AFCAP/MOZ/054/B.
- AFDB (2011). The Cost of Adaptation to Climate Change in Africa. African Development Bank, Abidjan.
- Barkdoll, B.D., Houghton, M.I. and Melville, B.W. (2007). Countermeasures to Protect Bridge Abutments from Scour. NCHRP Report 587. NCHRP, Transportation Research Board, Washington, D.C.
- Bennett, G. L., Roering, J. J., Mackey, B. H., Handwerger, A. L., Schmidt, D. A. and Guillod, B. P. (2016). Historic drought puts the brakes on earthflows in Northern California, *Geophys. Res. Lett.*, 43, doi:10.1002/2016GL068378.
- Biagini, B., Bierbaum, R., Stults, M., Dobardzic, S. and McNeeley, S.M. (2014). A typology of adaptation actions: A global look at climate adaptation actions financed through the Global Environment Facility. *Global Environmental Change*, 25, 97-108.
- Bipartisan Policy Centre (BPC), (2010). Transportation Adaptation to Global Climate Change. Washington, DC.
- Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED) & the United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNISDR), (2015). The Human Cost of Weather related Disasters 1995-2015.
- Chinowsky, P., Schweikert, A., Strzepek, N., Manahan, K. and Strzepek, K. (2011). Adaptation advantage to climate change impacts on road infrastructure in Africa through 2100, WIDER Working Paper, No. 2011/25, ISBN 978-92-9230-388-4, the United Nations University World Institute for Development Economics Research (UNU-WIDER), Helsinki.
- Chinowsky, P., Schweikert, A., Strzepek, N., Manahan, K., Strzepek, K. and Schlosser, C. (2013). Climate Change Adaptation Advantage for African Road Infrastructure, *Climatic Change*, Springer, vol. 117(1), pages 345-361. March 2013.

- Clay, N. and King, B. (2019). Smallholders' uneven capacities to adapt to climate change amid Africa's 'green revolution': Case study of Rwanda's crop intensification program. *World Development*, 116, 1-14.
- COTO (2013). Road Asset Management Manual. Draft Technical Methods for Highways No. 22 (TMH22). Committee of Transport Officials, Pretoria.
- COWI (2010). Making Transport Climate Resilient: Country Report: Ghana. World Bank, Washington, DC. Report P-70922A_04.
- Department of Transport (DOT), (1990). The structural design, construction and maintenance of unpaved roads. Draft TRH 20, Department of Transport, Pretoria.
- Department of Transport (DOT), (1996). Structural design of flexible pavements for interurban and rural roads. Draft TRH 4, Department of Transport, Pretoria.
- DFID UK (2009): Opportunities and Risks of Climate Change and Disasters (ORCHID) and Climate Risk Impacts on Sectors and Programmes, <http://tinyurl.com/ccorchid>.
- Dosio, A. (2017). Projection of temperature and heat waves for Africa with an ensemble of CORDEX Regional Climate Models. *Climate Dynamics*, 49, 493-519.
- Dosio, A., Jones, R.G., Jack, C., Lennard, C., Nikulin, G. and Hewitson, B. (2019). What can we know about future precipitation in Africa? Robustness, significance and added value of projections from a large ensemble of regional climate models. *Climate Dynamics*, early view.
- Dunne, J.P., Stouffer, R.J. and John, J.G. (2013). Reductions in labour capacity from heat stress under climate warming. *Nature Climate Change*, 3, 563-566.
- Emerson, W.W. (2002). Emerson Dispersion Test, In 'Soil Physical Measurement and Interpretation for Land Evaluation, Australian Soil and Land Survey Handbook Series, Vol. 5'. (Eds: N McKenzie, K Coughlan, and H Creswell), pp 190-199 (CSIRO Publishing, Collingwood, Victoria).
- Emery, S.J. (1992). The prediction of moisture content in untreated pavement layers and an application to design in southern Africa. Bulletin 20, Division of Roads and Transport Technology, Pretoria.
- Environment Agency (2016). Adapting to Climate Change: Advice for Flood and Coastal Erosion Risk Management Authorities. Environment Agency, Bristol.
- TRB (2008). Potential impacts of climate change on US transportation. Special Report 290, Transportation Research Board, National Research Council of the National Academies.
- FHWA (2012). Risk-based transportation asset management: Evaluating threats, capitalizing on opportunities. Report 1: Overview of Risk Management. Washington, DC: U.S. Department of Transportation.
- Fourie, A.B. (1996). Predicting rainfall-induced slope instability. *Proceedings of Institution of Civil Engineers, Geotechnical Engineering*, 119: 211-218.
- Gallivan, F., Ang-Olson, J. and Turchetta, D. (2009). Integrating Climate Change into State and Regional Transportation Plans. Seminar paper submitted for presentation at the

Transportation Research Board annual meeting and publication in the Transportation Research Record.

- Gill, J.C. and Malamud, B.D. (2017). Anthropogenic processes, natural hazards, and interactions in a multi-hazard framework. *Earth-Science Reviews*, 166, 246-269.
- Global Facility for Disaster Reduction and Recovery (GFDRR), (2016). ThinkHazard. <https://www.gfdr.org/sites/default/files/publication/ThinkHazard!.pdf>. Accessed 15 August 2016.
- Gourley, C.S. and Greening, P.A.K. (1999). Performance of Low-Volume Sealed Roads; Results and Recommendations from Studies in Southern Africa. TRL Report PR/OSC/167/99. TRL Ltd, Crowthorne, Berkshire, UK.
- Hallegatte, S. (2009). Strategies to adapt to an uncertain climate. *Global Environmental Change*, 19, 240-247.
- Head, M., Verhaeghe, B., Paige-Green, P., le Roux, A., Makhanya, S. and Arnold, K. (2019). Climate Adaptation: Risk Management and Resilience Optimisation for Vulnerable Road Access in Africa: Climate Adaptation Handbook, GEN2014C. London: ReCAP for DFID.
- Head, M., Verhaeghe, B. and Maritz, J. (2019). Climate Adaptation: Risk Management and Resilience Optimisation for Vulnerable Road Access in Africa: Change Management Guidelines, GEN2014C. London: ReCAP for DFID.
- Highways Agency (2008). Climate Change Adaptation Strategy: Volume 1. Department for Transport, United Kingdom.
- Himalaya Times (2016). Haphazard road construction puts settlements at risk. *The Himalayan Times*, Kathmandu, Nepal, 29 July 2016. <http://blogs.agu.org/landslideblog/2016/07/29/2016-monsoon-1/> accessed 1/8/2016.
- Hughes, G., Chinowsky, P. and Strzepek, K. (2010). The cost of adapting to climate change for infrastructure. Discussion Paper No.2. Washington, D.C.: World Bank Group.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2007). Fourth Assessment Report.
- Keller, G. and Sherar, J. (2003). Low-volume roads engineering: Best management practices field guide. USDA Forest Service/USAID. https://www.fs.fed.us/t-d/programs/forest_mgmt/projects/lowvolroads/
- Kjellstrom, T., Kovats, R.S., Lloyd, S.J., Holt, T. and Tol, R.S. (2009). The direct impact of climate change on regional labor productivity. *Archives of Environmental & Occupational Health*, 64, 217-227.
- Kopp, R.E., Horton, R.M., Little, C.M., Mitrovica, J.X., Oppenheimer, M., Rasmussen, D.J., Strauss, B.H. and Tebaldi, C. (2014). Probabilistic 21st and 22nd century sea-level projections at a global network of tide-gauge sites. *Earth's Future*, 2, 383-406.
- Le Roux A., Engelbrecht F., Paige-Green P., Verhaeghe B., Khuluse-Makhanya S., McKelly D., Dedekind Z., Muthige M., van der Merwe J. and Maditse K. (2016). Climate Adaptation: Risk

Management and Resilience Optimisation for Vulnerable Road Access in Africa: Climate Threats Report, GEN2014C. London: ReCAP for DFID.

Le Roux, A., Makhanya, S., Arnold, K. and Roux, M. (2019). Climate Adaptation: Risk Management and Resilience Optimisation for Vulnerable Road Access in Africa: Climate Risk and Vulnerability Assessment Guidelines, GEN2014C. London: ReCAP for DFID.

Lewis, M.R. (1919). Experiments on the proper time and amount of irrigation. Twin Falls Exp. Stn., 1914, 1915, and 1916.

Leyland, R. and Paige-Green, P. (2011). A simple slope hazard management system for the South African primary road network. Proc 8th International Conference on Managing Pavement Assets (ICMPA2011), Santiago, Chile, November 2011.

Larcher, P., Petts, R. and Spence, R. (2010). Small Structures for Rural Roads: A Practical Planning, Design, Construction & Maintenance Guide. Global Transport Knowledge Partnership (gTKP), Volume 1 to 4.

Malherbe J., Engelbrecht F.A. and Landman W.A. (2013). Projected changes in tropical cyclone climatology and landfall in the Southwest Indian Ocean region under enhanced anthropogenic forcing. *Clim Dyn* 40 2867–2886.

Mattsson, L.G. and Jenelius, E. (2015). Vulnerability and resilience of transport systems—A discussion of recent research. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 81, 16-34.

McGuire, B. (2010). Potential for a hazardous geospheric response to projected future climate changes. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 368, 2317-2345.

Moser, S.C. and Boykoff, M.T. (eds.) (2013). *Successful adaptation to climate change: Linking science and policy in a rapidly changing world*. Routledge.

NCHRP (2014a). *Strategic Issues Facing Transportation Volume 2: Climate Change, Extreme Weather Events, and the Highway System: Practitioner’s Guide and Research Report*. NCHRP Report 750, NCHRP, Transportation Research Board, Washington, D.C.

NCHRP (2014b). *Design methods for in-stream flow control structures*. NCHRP Report 795, NCHRP, Transportation Research Board, Washington, D.C.

NCHRP (2016). *Minimizing Roadway Embankment Damage from Flooding: A Synthesis of Highway Practice*. Synthesis 496 Transportation Research Board, Washington, D.C.

NCHRP #20-83, Task 2.3 Synthesis Report ("Review of key climate impacts to the highway system and current adaptation practices and methodologies") - this document has been integrated in NCHRP 750.

Nicholls, R.J., Hanson, S.E., Lowe, J.A., Warrick, R.A., Lu, X. and Long, A.J. (2014). Sea-level scenarios for evaluating coastal impacts. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 5, 129-150.

OECD (2009). *Integrating Climate Change Adaptation into Development Co-operation*. Paris: Organisation for Economic Co-operation and Development.

Owens, G. (Editor), (2009). *Fulton’s Concrete Technology*. Cement and Concrete Institute, Midrand.

- Paige-Green, P. (1989). The influence of geotechnical properties on the performance of gravel wearing course materials. PhD Thesis, University of Pretoria.
- Paige-Green, P., Verhaeghe, B. and Roux, M. (2019). Climate Adaptation: Risk Management and Resilience Optimisation for Vulnerable Road Access in Africa: Visual Assessment Manual, GEN2014C. London: ReCAP for DFID.
- PIARC (1997). Landslides: Techniques for Evaluating Hazard. PIARC Technical Committee on Earthworks, Drainage, Subgrade (C12). Paris: World Road Association.
- PIARC (2012). Dealing with the Effects of Climate Change on Road Pavements. Report 2012R06EN. Paris: World Road Association.
- PIARC (2015). International climate change adaptation framework for road infrastructure. Report 2015R03EN. Paris: World Road Association.
- Shrestha, A, GC, E., Prasad Adhikary, R., and Kumar Rai, S. (2012). Resource Manual on Flash Flood Risk Management – Module 3: Structural Measures. Eds.: International Centre for Integrated Mountain Development, ICIMOD, Nepal.
- Southern Africa Transport and Communications Commission (SATCC), (2003). Guideline, Low-Volume Sealed Roads. Gaborone: South African Development Community (SADC).
- Stakhiv, E.Z. (2011). Pragmatic Approaches for water management under climate change uncertainty 1. JAWRA Journal of the American Water Resources Association, 47, 1183-1196.
- Transport Research Laboratory (TRL), 2000. A design manual for small bridges. Overseas Road Note (ORN) 9, Transport Research Laboratory, Crowthorne, England.
- Transportation Research Board (TRB), 2008. Potential Impact of Climate Change on U.S. Transportation. TRB Special Report 290. National Research Council of the National Academies, Washington, DC.
- Tsoar, H., (2005). Sand dunes mobility and stability in relation to climate. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 357(1), pp.50-56.
- Turner, A.K. and Schuster R.L. (1996). Landslides: investigation and mitigation. Special Report 247. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC
- Vivid Economics Ltd (2017). Impacts of higher temperatures on labour productivity and value for money adaptation: Lessons from five DFID priority country case studies. Vivid Economics Ltd, London.
- Weber, T., Haensler, A., Rechid, D., Pfeifer, S., Eggert, B. and Jacob, D. (2018). Analyzing regional climate change in Africa in a 1.5, 2, and 3 C global warming world. Earth's Future, 6, 643-655.
- Wilby, R.L., Troni, J., Biot, Y., Tedd, L., Hewitson, B.C., Smith, D.G. and Sutton, R.T. (2009). A review of climate risk information for adaptation and development planning. International Journal of Climatology, 29, 1193-1215.
- Wilby, R.L. and Vaughan, K. (2011). The hallmarks of organizations that are adapting to climate change. Water and Environment Journal, 25, 271-281.

- Wilby, R.L. and Keenan, R. (2012). Adapting to flood risk under climate change. *Progress in Physical Geography*, **36**, 349-379.
- World Bank (2009). *The Costs of Adapting to Climate Change for Infrastructure*, Washington, DC.
- World Bank (2010). 'Economics of Adaptation to Climate Change: Ethiopia'. Washington, DC: World Bank.
- WSDOT (2012). *Guidance for Project-Level Greenhouse Gas and Climate Change Evaluations*. March. Olympia, WA: Environmental Services. http://www.wsdot.wa.gov/NR/rdonlyres/73ADB679-BDA6-4947-93CA-87C157862DD7/0?/WSDOT_Project_GHG_Guidance_March_2012.pdf

ANNEXE A : Formulaire de collecte des données de l'évaluation

Road Number:		Date:		Assessors:		Weather:	S. PC. C. R. H. Cold	Topography:	F. R. H. M.	Landcover and use:	A. F. N. PU. D. O.
--------------	--	-------	--	------------	--	----------	----------------------	-------------	-------------	--------------------	--------------------

Chainage	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
Grade																		
Access to facilities																		
No. of alternative roads																		
Common vehicle types																		

GPS and photo No																		
------------------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Erodibility																		
Sugrade																		
Road surface - unpaved																		
Side drains - unlined																		
Embankment slopes																		
Cut slopes																		

Subgrade problems																		
Material type																		
Moisture																		

Drainage (in reserve)																		
Road shape																		
Shoulders																		
Side slopes																		
Side drains																		
Mitre drains																		

Drainage (streams)																		
Structure																		
Approach fills																		
Erosion of approach fills																		
Protection works																		
Flood plain																		

Slope stability																		
Cut stability																		
Fill stability																		

Construction																		
Overall finish																		
Erosion protection works																		

Maintenance																		
Quantity																		
Quality																		

COMMENTS:																		
------------------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Exemple d'un formulaire complété pour l'évaluation de la résilience climatique avec des photos d'appui

Road Number:	B - G	Date:	2018/08/01	Assessors:	PPG	Weather:	S. <input type="checkbox"/> PC. <input type="checkbox"/> C. <input type="checkbox"/> R. <input type="checkbox"/> H. <input type="checkbox"/> Cold	Terrain	F. <input type="checkbox"/> R. <input type="checkbox"/> H. <input type="checkbox"/> M.	Landuse	A. <input type="checkbox"/> F. <input type="checkbox"/> N. <input type="checkbox"/> PU. <input type="checkbox"/> O.
---------------------	-------	--------------	------------	-------------------	-----	-----------------	---	----------------	--	----------------	---

Chainage	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2	
Grade	F	F	F-U	U	U	U	U	U	U-F	F-D	D	D	D	D	D-F	F	F	F	F	F	F

GPS and photo No	08.1123 38.3535																				
-------------------------	--------------------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Erodibility																					
Subgrade	0	0	0	4/4	0	0	0	3/3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Road surface - unpaved	Paved																				
Side drains - unlined	2/4	5/1	0	4/5	0	0	4/5	4/3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Embankment slopes	0	0	0	5/4	5/1	0	3/3	3/3	0	2/1	2/1	2/1	3/2	3/5	3/5	0	0	0	0	0	0
Cut slopes																					

Subgrade problems																					
Material type	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Molsture														Possible	Possible						

Drainage (in reserve)																					
Road shape	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Shoulders	0	0	3/3	4/3	4/5	4/5	3/3	2/3	0	0	2/3	2/2	2/2	0	0	1/2	0	0	0	0	0
Side slopes	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Side drains	0	0	5/5	0	0	0	0	5/3	5/3	0	0	0	0	0	0	0	2/1	0	0	0	0
Mitre drains																					

Drainage (streams)																					
Structure	3/1 - 1			4/1 - 2	4/1 - 2								5/1 - 2	5/1 - 2	5/1 - 2						
Embankments																					
Erosion								5/1											3/1		
Protection works																					

Slope stability																					
Cut stability																					
Fill stability	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Construction																					
Overall finish	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Erosion protection works																					

Maintenance																					
Quantity	3/4	0	5/4	5/4	5/4	5/4	4/4	5/4	5/4	5/4	5/4	5/4	5/4	5/4	5/4	5/4	5/4	5/4	5/4	5/4	5/4
Quality	2/5	2/5	2/5	2/5	2/5	2/5	2/5	2/5	2/5	2/5	2/5	2/5	2/5	2/5	2/5	2/5	2/5	2/5	2/5	2/5	2/5

COMMENTS:
 1. Culvert silted at inlet
 1. Needs culverts

Photos d'appui



Élément d'évaluation : Erodabilité - Drains latéraux, non revêtus

Dégradation : Forte érosion des drains latéraux

Chaînage : 300 m à 400 m

Degré : 4 Étendue : 5



Élément d'évaluation : Drainage (en réserve) - Drains latéraux

Dégradation : Blocage des drains latéraux par des débris de glissement de terrain

Chaînage : 700 m à 800 m

Degré : 5 Étendue : 3



Élément d'évaluation : Drainage (en réserve) - Drainage latéral

Dégradation : Endommagement de la protection contre l'érosion dans le drain latéral

Chaînage : 1 600 m à 1 700 m

Degré : 2 Étendue : 1



Élément d'évaluation : Drainage (cours d'eau) - Érosion

Dégradation : Érosion des berges et Endommagement aux ouvrages de protection

Chaînage : 700 m à 800 m

Degré : 5 Étendue : 1



Élément d'évaluation : Drainage (en réserve) - Drains latéraux

Dégradation : Mauvais entretien du drain latéral revêtu

Chaînage : 700 m à 800 m

Degré : 5 Étendue : 3



Élément d'évaluation : Drainage (cours d'eau) - Érosion des remblais d'approche

Dégradation : Mauvaise maîtrise de l'eau à côté de la route entraînant l'érosion du remblai d'approche du pont

Chaînage : 1 600 m à 1 700 m

Degré : 3 Étendue : 1



Élément d'évaluation : Drainage (en réserve) – accotements

Dégradation : Mauvais entretien des accotements

Chaînage : 300 m à 400 m

Degré : 4 Étendue : 3

ANNEXE B : Causes des problèmes de sol et identification

B.1 Argiles expansives

B.1.1 Causes

Les argiles expansives sont très répandues dans le monde entier et ont une importance économique majeure. Les routes sont généralement endommagées par des irrégularités et des bosses longitudinales, des mouvements différentiels à proximité des ponceaux et des fissures longitudinales. La présence d'arbres le long de la route entraîne souvent une extraction localisée de l'humidité par leurs racines avec le développement d'affaissements sporadiques et de fissures en arc de cercle. Les dommages causés par l'argile expansive aux routes affectent généralement davantage leur viabilité que leur intégrité structurelle, à condition que les fissures et les dégradations de la surface soient réparées rapidement et efficacement. Les dommages sont généralement limités aux zones qui connaissent des précipitations saisonnières importantes ou un mauvais drainage des eaux de surface.

Les sols expansifs sont ceux qui contiennent des argiles à smectite (montmorillonite), qui proviennent principalement de l'altération chimique des minéraux de base formant la roche. Les pires argiles expansives se trouvent probablement sur les gabbros, les basaltes et les dolérites profondément altérés dans les zones tropicales et subtropicales. Les argiles expansives se trouvent aussi couramment dans les sols transportés dérivés localement ou à une certaine distance des roches ignées de base altérées. Des smectites peuvent également se former à partir de l'altération, dans des conditions alcalines, d'autres minéraux silicatés pauvres en potassium, à condition que le calcium et le magnésium soient présents et que la lixiviation soit empêchée. Bien que le potentiel d'expansion d'un sol puisse être lié à de nombreux facteurs, il est principalement contrôlé par la quantité de minéraux de smectite.

Les changements de volume des sols expansifs sont confinés aux quelques mètres supérieurs d'un dépôt de sol où la teneur en humidité saisonnière varie en raison des cycles de séchage et d'humidification. La zone dans laquelle les changements de volume sont le plus susceptibles de se produire est définie comme la zone active. La zone active peut être évaluée en traçant la teneur en humidité in situ avec la profondeur pour les échantillons prélevés pendant les saisons humides et sèches. La profondeur à laquelle la teneur en eau ne présente aucune variation saisonnière est la limite de la zone active. Cette profondeur est également appelée la profondeur inférieure de la variation saisonnière de l'humidité. Cependant, avec **les changements prévus des précipitations et des températures**, la durée et les caractéristiques de la saison sèche devraient changer, ce qui entraînera des mouvements d'humidité plus importants dans cette zone de profondeur critique. Ces mouvements devraient causer des dégâts plus importants sur les routes en terre battue.

B.1.2 Reconnaissance des argiles expansives

La façon la plus simple d'identifier la présence de sols expansifs est de procéder à des observations sur le terrain où l'expression de fissures en surface dans les sols gris foncé, noirs ou parfois rouges est évidente, comme le montre la figure B.1. Cependant, la présence d'une épaisse couche de terre transportée ou de terre végétale non expansive peut parfois masquer ces fissures et il faut alors creuser une fosse d'essai dans laquelle on observera des fissures et des glissements de terrain. L'identification de la smectite dans les sols supports se fait au mieux par diffraction des rayons X.



Figure B.1 Preuve typique de la présence de sols argileux expansifs

De par leur nature, les argiles smectites auront tendance à être plus plastiques que les autres minéraux argileux et une mesure de l'indice de plasticité, ou mieux encore de l'activité (rapport entre l'indice de plasticité et la fraction d'argile) est une bonne indication de la présence de smectites. C'est l'une des premières méthodes d'indication des sols potentiellement expansifs à l'aide de la figure B.2 basée sur la fraction argileuse du sol (moins 2 μm) et l'indice de plasticité (IP) standard. Il convient de noter que les estimations du degré de gonflement obtenues à l'aide de cette technique ne tiennent pas compte de la teneur initiale en humidité des matériaux, en supposant qu'ils passent d'un état sec normalement utilisé en laboratoire à un état humide. On sait qu'une humidité d'équilibre se développe sous une structure routière et que la fluctuation de l'humidité dans cette zone est minime. Cependant, depuis le dessous de la voie extérieure des routes à accotements non scellés jusqu'au bord du remblai, des fluctuations d'humidité importantes et variables se produisent. Il est cependant peu probable que la teneur en humidité initiale dans ces zones soit particulièrement sèche.

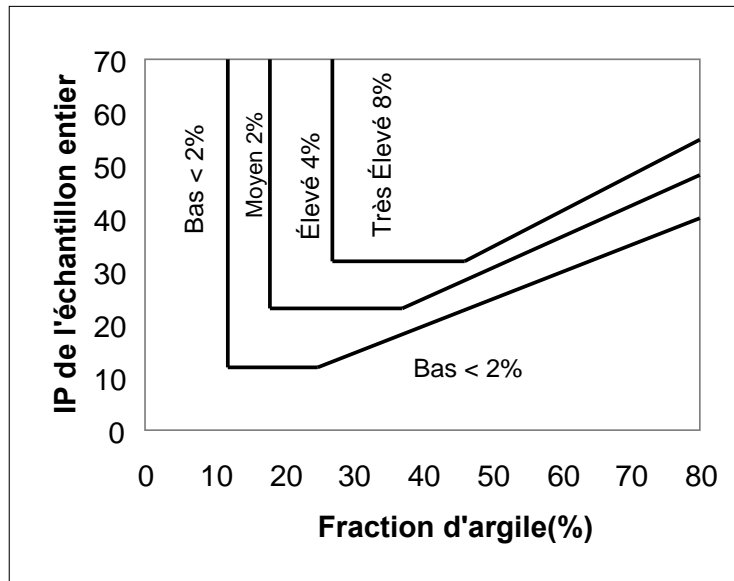


Figure B.2 Identification des sols argileux expansifs et estimation de l'expansion (Van der Merwe, 1976)

Une indication des sols potentiellement expansifs peut également être obtenue à partir des cartes des types de sols où les matériaux identifiés comme sols "verticaux" auront toujours des caractéristiques expansives, tandis que les sols ayant un statut de base élevé (ou "eutrophique") et une teneur en argile élevée devraient être étudiés de manière plus approfondie, car ils ont le potentiel d'être expansifs.

B.2. Matériaux dispersifs/érodables/ étanche

B.2.1 Causes

Les matériaux dispersifs, érodables et étanche sont similaires dans leur aspect sur le terrain (expositions fortement érodées, ravinées et canalisées), mais diffèrent sensiblement dans les mécanismes de leurs actions. Heureusement pour les constructeurs de routes, seuls les sols dispersifs (probablement moins courants) présentent des problèmes de quelque importance. La figure B.3 montre un sol dispersif typique avec des signes évidents de canalisation.



Figure B.3 Sol dispersif montrant la formation de "tuyaux"

Les sols dispersifs sont ceux qui, lorsqu'ils sont placés dans l'eau, ont des forces de répulsion entre les particules d'argile qui dépassent les forces d'attraction. La fraction colloïdale est alors mise en suspension et l'eau stagnante reste en suspension (figure B.4). Dans l'eau en mouvement, les particules dispersées sont emportées. Cela a évidemment de sérieuses implications dans le génie des barrages en terre, mais a moins de conséquences dans le génie routier, sauf lorsqu'il s'agit de remblais. Les sols dispersés se développent souvent dans des zones basses avec une topographie légèrement vallonnée et des pentes relativement plates. Leur environnement de formation est également généralement caractérisé par une pluviosité annuelle inférieure à 850 mm.



Figure B.4 Sol dispersif dans l'eau (test de miettes) montrant une suspension qui ne se dépose pas

Les sols érodables ne se désintègrent pas nécessairement ou ne se dispersent pas dans l'eau. Ils ont tendance à perdre de la matière à cause de la traînée de frottement de l'eau qui s'écoule sur le matériau et qui dépasse les forces de cohésion qui maintiennent le matériau ensemble.

Les sols érodables se désintègrent dans l'eau en particules de la taille de limon, de sable et de gravier, sans se disperser. La cause de ce processus est probablement une combinaison du gonflement des particules d'argile, de la génération de fortes pressions d'air dans les pores lorsque l'eau est aspirée dans les vides du matériau et du ramollissement de tout début de cimentation.

Les sols qui s'affaissent et s'érodent lorsqu'ils se présentent sous forme de sous-couches ou même lorsqu'ils sont utilisés dans des remblais ne risquent pas de poser de problèmes importants, à moins que l'eau ne s'écoule à travers le remblai ou la sous-couche. Les problèmes sont donc principalement liés à une mauvaise conception des ponceaux et du drainage. D'autre part, l'inclusion de sols dispersifs dans le sol support ou le remblai a entraîné des défaillances importantes dues à la tuyauterie, au creusement de tunnels et à la formation de cavités dans la structure. Il est donc important d'identifier les sols dispersifs à temps.

B.2.2 Reconnaissance

L'analyse et la reconnaissance des sols dispersifs nécessitent divers tests d'ingénierie des sols et de laboratoire pédologique. Ces tests comprennent

- Détermination du pourcentage de sodium échangeable (ESP)
- Capacité d'échange de cations (CEC)
- Test de miettes¹⁹
- Double test de l'hydromètre, et
- Le taux d'absorption du sodium (SAR) et le pH.

Le test de miettes sur des morceaux de matériaux non perturbés (placés dans de l'eau pure) est généralement la première indication la plus simple, mais n'est pas toujours définitif. Les sols dispersés ont tendance à produire une suspension colloïdale ou un trouble sur la mie/grosseur pendant le test, sans que le matériau ne se désintègre nécessairement complètement. La désintégration de la mie dans les sols d'extinction est très rapide et forme un amas de limon, de sable et de gravier. Les sols érodables ne se désintègrent pas nécessairement toujours dans le test de la mie, car ils nécessitent une force de frottement de l'eau en mouvement pour détacher le matériau de surface, sans qu'aucune partie du matériau détaché ne reste en suspension.

Il n'est pas très important (ni même possible dans de nombreux cas) de quantifier la perte potentielle réelle de matériau dispersif des sous-niveaux et des remblais car le processus est lié au temps et, si l'on dispose de suffisamment de temps, tout le matériau colloïdal pourrait théoriquement être dispersé et enlevé, ce qui entraînerait la formation de canalisations, une érosion interne et finalement la perte de matériau à grande échelle. Il est cependant important d'identifier la présence de sols dispersifs, et leur différenciation des matériaux érodables et d'extinction, afin que les précautions nécessaires puissent être prises s'ils affectent la chaussée construite. Compte tenu de ***l'assèchement accru des sols pendant les périodes de sécheresse prolongées*** suivies de ***tempêtes intenses***, on peut s'attendre à ce que les routes, y compris les sols dispersifs, soient fortement endommagées.

¹⁹ Le test de miettes d'Emerson (2002) s'est avéré applicable aux routes à faible trafic. L'eau de pluie peut être utilisée pour le test en l'absence d'eau distillée ou "en bouteille". Le test s'est avéré fiable pour la prévision du comportement dispersif des sols avec le test du trou d'épingle.

B.3 Sols salins

B.3.1 Causes

Contrairement aux sols dispersifs qui sont affectés par la présence d'un nombre excessif de cations de sodium fixés aux argiles, les matériaux salins sont affectés par la combinaison de cations et d'anions spécifiques sous forme de sels solubles, indépendants des argiles. Ceux-ci peuvent constituer un problème majeur dans les projets routiers où la migration des sels solubles sous les revêtements bitumineux (figure B.5) entraîne l'affaiblissement de la base supérieure et le cloquage et la désintégration des revêtements. Les sels solubles, en particulier les sulfates, et leurs acides peuvent également avoir un effet néfaste sérieux sur la stabilité/durabilité des matériaux et du béton stabilisés chimiquement.

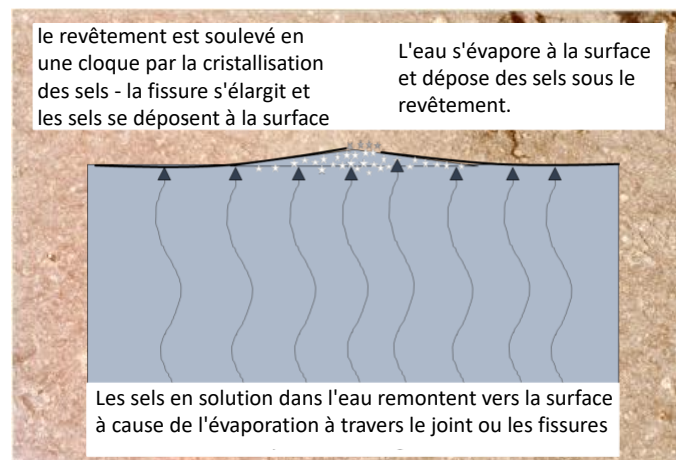


Figure B.5 Mécanisme des dommages causés par le sel soluble aux revêtements bitumineux

Les dommages causés aux routes par le sel soluble ont été signalés principalement dans les zones arides, semi-arides et chaudes et sèches. Les sels peuvent provenir des sols naturels in situ sous les structures ainsi que des matériaux importés pour les couches de revêtement ou de l'eau de construction salée. Seule la présence de sels solubles dans les matériaux de sol support est prise en compte dans la présente ligne directrice, car les matériaux des autres couches peuvent être contrôlés à condition que le problème soit identifié à temps.

Les matériaux de sol support dans les zones où la surface du sol présente une certaine dépression entraînant une accumulation saisonnière d'eau sont particulièrement sujets à l'accumulation de sels lessivés provenant des zones environnantes. Dans d'autres zones plates, la remontée capillaire des eaux souterraines et les précipitations dans les sols salins peuvent entraîner la migration ascendante des sels vers la surface du sol ou à proximité. Avec le changement climatique attendu, l'aridité croissante et les modifications du niveau de la mer devraient accroître les problèmes de sels solubles si les précautions nécessaires ne sont pas prises.

B.3.2 Reconnaissance

Dans certains cas, la présence visible de dépôts de sel cristallisé à la surface du sol est une indication certaine de la nécessité d'une investigation supplémentaire pour d'éventuels problèmes de sel. Ce problème est souvent associé à la présence d'animaux qui lèchent la surface du sol. Dans la plupart des autres cas, la présence de sel est mieux confirmée par des méthodes d'essai en laboratoire.

Dans le contexte de l'ingénierie routière classique, l'identification d'éventuels problèmes de sel soluble est basée sur le pH et la conductivité des matériaux. Il convient de noter que les résultats des tests de conductivité électrique et de pH peuvent varier considérablement en fonction du prétraitement, de la teneur en humidité à laquelle les mesures sont effectuées et, en particulier, de la fraction granulométrique du matériau testé.

Les limites d'utilisation des matériaux salins sont généralement basées sur les travaux réalisés dans des pays spécifiques et leur applicabilité à d'autres domaines est inconnue. En général, une conductivité électrique de plus de 0,15 Sm⁻¹ sur la fraction passante de 6,7 mm (ou une résistance électrique inférieure à 200 Ω sur la fraction de moins de 2 mm) devrait susciter des inquiétudes et indiquer la nécessité d'une enquête plus approfondie. De même, une teneur en sel soluble supérieure à 0,5 % devrait être une source de préoccupation éventuelle et conduire à des investigations supplémentaires.

B.4. Argiles tendres

B.4.1 Causes

Des problèmes très répandus, surtout dans les zones côtières estuariennes (lagunes) et marécageuses, résultent de la présence d'argiles alluviales très molles dans ces zones. Les argiles molles profondes des zones estuariennes se forment principalement en raison des fluctuations périodiques du niveau des phoques. Les argiles tendres de l'intérieur des terres ont tendance à être beaucoup moins profondes après avoir été déposées dans les zones marécageuses. Les argiles tendres sont généralement, mais pas nécessairement, saturées et normalement consolidées à légèrement sur-consolidées (en raison des fluctuations du niveau de la nappe phréatique). Les matériaux ont donc une faible résistance au cisaillement, sont hautement compressibles et leurs faibles perméabilités entraînent des problèmes de tassement liés au temps. En outre, la présence fréquente de matières organiques dans les argiles affecte leur comportement et la détermination de leurs propriétés.

Comme indiqué ci-dessus, la présence de ces matériaux est principalement dans les zones côtières, bien qu'ils puissent également être associés à de grands systèmes fluviaux matures. La résistance au cisaillement de ces argiles se situe normalement entre 10 et 40 kPa, ce qui les rend difficiles à fouler. Les argiles tendres sont rarement uniformes en profondeur et sont généralement intercalées avec des limons et des sables, qui offrent des voies de drainage plus perméables que ce qui serait déterminé par des tests d'oedomètre sur des échantillons d'argile non perturbés. Toutefois, la profondeur et la résistance des matériaux sont telles qu'il n'est pas recommandé de les inspecter dans des puits de test ou des trous de tarière.

L'élévation potentielle future du niveau de la mer est susceptible d'introduire de plus grandes zones d'argiles tendres et d'entraîner une augmentation des problèmes de construction de routes dans les zones côtières.

B.4.2 Reconnaissance

L'état in situ de ces matériaux est l'une de leurs propriétés les plus importantes qui doit être prise en compte - les essais sur des échantillons perturbés donnent généralement des résultats qui n'ont pas de sens. Il est donc préférable d'utiliser des méthodes d'essai in situ telles que l'essai de pénétration standard (SPT), le cisaillement des pales ou l'essai de pénétration des cônes (CPT) pour déterminer les profondeurs, la présence de couches de limon ou de sable, les résistances et si possible les perméabilités. Si ces éléments peuvent être identifiés avec un degré de confiance raisonnable, il est possible d'estimer la quantité et le taux de tassement et la stabilité potentielle des remblais sur les matériaux.

B.5. Zones humides/nappes phréatiques élevées

B.5.1. Causes

Il est possible que certaines zones non argileuses aient une nappe phréatique proche de la surface naturelle du sol, ce qui rend difficile le placement des structures routières et peut affecter leur intégrité structurelle. Contrairement aux zones argileuses, le problème n'est pas la faible résistance ou le potentiel de tassement, mais l'effet de l'eau (et des pressions élevées d'eau interstitielle sous la charge du trafic) sur la structure de la chaussée.

Les nappes phréatiques élevées entraînent une humidité in situ élevée et constante, mais il est également possible que des conditions de forte humidité fluctuantes dans la sous-structure de la chaussée se produisent en raison des précipitations saisonnières et des caractéristiques du changement climatique à long terme. Une bonne compréhension des conditions d'humidité et de l'environnement doit être définie au cours de toute enquête impliquant des matériaux de sol support.

Divers indices d'humidité, tels que l'indice d'humidité de Thornthwaite ou les cartes de surplus d'eau, peuvent fournir des informations très utiles sur les problèmes potentiels à cet égard. Il faut cependant garder à l'esprit que les zones climatiques figurant sur ces cartes peuvent changer en fonction de ***l'augmentation ou de la diminution des précipitations et de l'évaporation*** avec le temps. Nombre des problèmes rencontrés sur les routes sont communs à des zones d'humidité spécifiques, et ceux-ci ont été mis en évidence sous leurs rubriques respectives dans le présent guide.

B.5.2 Reconnaissance

Il est généralement facile de reconnaître les conditions humides potentielles, qui se caractérisent par des zones d'eau stagnante, des types de végétation spécifiques (roseaux, herbes à papyrus, etc.), des conditions boueuses localisées et souvent la présence de crabes et de grenouilles. Toutefois, avec les changements des conditions climatiques, en particulier l'augmentation des périodes de tempêtes extrêmes, les routes construites au niveau du sol naturel ou à proximité pourraient devenir impraticables pendant de plus longues périodes.

B.6. Sols déformables

B.6.1. Reconnaissance

Les sols effondrables résultent d'une condition unique dans laquelle des "ponts" de matériaux fins (généralement des argiles ou des oxydes de fer) dans un cadre de particules plus grossières et plus dures (principalement du quartz) deviennent faibles lorsqu'ils sont humides et s'effondrent sous la charge. La condition importante est que le matériau doit être dans un état partiellement saturé, puis mouillé et chargé simultanément, ce qui est une situation courante sous les structures routières. Elles ont tendance à être plus fréquentes dans les zones plus sèches.

Les matériaux pliables peuvent se produire aussi bien sur des matériaux résiduels que sur des matériaux transportés. De nombreux granits et grès feldspathiques, lorsqu'ils sont altérés par les intempéries, font que le feldspath se transforme en kaolinite, les particules de quartz restant intactes. Cela forme une structure de type nid d'abeille qui, lorsqu'elle est mouillée et chargée, entraîne un cisaillement ou un "effondrement" des ponts d'argile et un tassement ou une réduction du volume du matériau. Certains basaltes et dolérites ayant des densités sèches de 1200 à 1300 kg/m³ ont également montré un potentiel d'effondrement.

Les indications de la possibilité d'effondrement des matériaux sont les suivantes :

- Une très faible densité, en raison du grand nombre de vides séparant la charpente de quartz
- Densités inférieures à environ 1600 kg/m³ (la plupart du temps entre 1000 et 1585 kg/m³)
- La présence de "trou miniature" (pinhole) ou de vides observés lors du profilage du sol

- Habituellement, plus de 60 % de la masse du matériau se situe dans la plage de 0,075 à 2 mm et moins de 20 % est plus fine que 0,075 mm
- Lorsque le matériau extrait d'une fosse est insuffisant pour remplir à nouveau la fosse (la structure d'effondrement sera perturbée et le matériau diminuera de volume).

Le scénario climatique prévu, qui prévoit **des périodes de sécheresse plus longues** suivies de **tempêtes potentiellement extrêmes**, aura un impact majeur sur les zones de sol effondrable non identifiées ou non aménagées. Le mouillage de sol support après des périodes de sécheresse prolongées suivies de l'application de charges de trafic devrait entraîner une déformation importante de la surface de la route. Le résultat de l'effondrement du sol support se manifeste principalement par le développement d'une surface de route profondément orniétrée et souvent inégale et par une détérioration significative de la qualité de roulement de la route (figure B.6).



Figure B.6 Manifestation typique de l'effondrement du sol support