

Guide d'aide à la conception structurale des chaussées municipales



INFRASTRUCTURES
DE SURFACE

MISSION DU CERIU

Mettre en œuvre toute action de transfert de connaissance et de recherche appliquée pouvant favoriser le développement du savoir-faire, des techniques, des normes et des politiques supportant la gestion durable et économique des infrastructures et la compétitivité des entreprises qui travaillent dans le secteur.

A PROPOS

LE CERIU

Fondé en 1994, le Centre d'expertise et de recherche en infrastructures urbaines (CERIU) est un organisme sans but lucratif **né du besoin de réhabiliter les infrastructures municipales de façon performante et à des coûts acceptables.**

Grâce à l'expertise variée de ses **180 membres organisationnels** regroupant municipalités, entreprises, ministères, laboratoires et institutions d'enseignement et à son approche unique axée sur le partenariat et la concertation, le CERIU est le seul organisme à offrir une perspective intégrée en regard des enjeux reliés aux infrastructures urbaines.

Véritable centre d'innovation, le CERIU œuvre à changer les mentalités et les habitudes afin de promouvoir de nouvelles manières de faire plus efficaces et plus économiques ainsi qu'à développer des outils adaptés aux besoins des municipalités et des entreprises de services publics.

—

Le conseil permanent Infrastructures de surface œuvre à appuyer et soutenir le développement de l'expertise et des meilleures pratiques en matière de développement durable des infrastructures municipales de surface par des activités de normalisation, de diffusion, de formation, de recherche, de veille et de transfert technologique.

REMERCIEMENTS

Le CERIU tient à remercier chaleureusement les membres du comité de travail pour leur dévouement et leurs précieuses contributions.

La réalisation de ce document, pilotée par le CERIU, en collaboration avec ses partenaires de son conseil permanent Infrastructures de surface, n'aurait pas pu être possible sans le dévouement et la précieuse contribution des membres du comité de travail. Nous les remercions pour leur disponibilité et leur enthousiasme tout au long du projet.

L'ÉQUIPE DE TRAVAIL

- Supervision par la Conseil permanent infrastructures de surface
- Coordination: **Célia Abbas**, ing., M. Ing, chargée de projets au CERIU
- Chargé de projet: **Éric Lachance-Tremblay**, ing., M. Sc. A., Ph. D.

AVEC LA COLLABORATION SPÉCIALE DE

NOM COMPLET ET TITRE	FONCTION	ORGANISATION
Danny Bérubé, ing,	Ingénieur	Ville de Québec
Jean-Pascal Bilodeau	Professeur adjoint	Université de Laval
Michael Côté, ing, FIC	Ingénieur - Service Infrastructures	Ville de Gatineau
Julie Michelle Fortin, ing.	Ingénieure de projets - Division ingénierie	Ville de Granby
Saliha Yahmi, ing. M. Ing. M.M.P	Experte Infrastructures Routières	Ville de Longueuil

TABLE DES MATIÈRES

A PROPOS	I
REMERCIEMENTS	II
1.0. MISE EN CONTEXTE DU GUIDE	1
2.0. OBJECTIFS ET OUTILS DE DIMENSIONNEMENT ABORDÉS	2
2.1. OBJECTIFS DU GUIDE	2
2.2. MÉTHODES ET OUTILS DE DIMENSIONNEMENT ABORDÉS DANS CE GUIDE	2
3.0. NOTIONS THÉORIQUES PERTINENTES	3
3.1. PRINCIPES DE DIMENSIONNEMENT	4
3.2. PARAMÈTRES DE DIMENSIONNEMENT	5
3.2.1. Trafic	5
3.2.2. Conditions climatiques	7
3.2.3. Sol d'infrastructure et condition de l'existant	9
3.2.4. Notion de risque et durée de vie de conception	10
3.3. ENROBÉS BITUMINEUX	11
3.3.1. Choix du bitume	12
3.3.2. Granulats et caractéristiques	12
3.3.3. Utilisation de granulats bitumineux recyclés (GBR)	13
4.0. OUTILS DE DIMENSIONNEMENT	14
4.1. LOGICIEL CHAUSSÉE 2 (AASHTO 1993, MÉTHODE EMPIRIQUE DES NOMBRES STRUCTURAUX)	14
4.1.1. Principe de fonctionnement : méthode empirique des nombres structuraux	14
4.1.2. Principe de fonctionnement : module de vérification des effets du gel	16
4.1.3. Intrants requis	19
4.2. LOGICIEL MÉCANISTE EMPIRIQUE AASHTOWare PAVEMENT ME	21
4.2.1. Principe de fonctionnement	21
4.2.2. Intrants requis	23
4.3. LOGICIEL MÉCANISTE EMPIRIQUE I3C-ME	27
4.3.1. Principe de fonctionnement : cumul de l'endommagement par fatigue et de l'orniérage structural	28
4.3.2. Intrants requis	29

4.4. AVANTAGES ET CONTRAINTES DES MÉTHODES ET LOGICIELS DE DIMENSIONNEMENT PRÉSENTÉS	33
4.5. ÉLÉMENTS À PRENDRE EN CONSIDÉRATION DANS LA RÉFLEXION	35
5.0. CONCLUSION	37

ANNEXES

ANNEXE 1 - Valeurs des paramètres delta PSI, fiabilité et soulèvement au gel du logiciel Chaussée 2 selon la classe de DJMA et le type route	41
ANNEXE 2 - Descriptif des différentes classes de véhicules selon la Federal Highway Administration	42
ANNEXE 3 - Tableau de choix des composants - Enrobé & des zones climatiques produits par Transport Québec	43

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Exemple de données de profondeur de gel relevé par le biais des stations météorologiques	8
Tableau 2: Valeurs de paramètre W_{18} calculées à partir du logiciel Chaussée 2 pour une structure de chaussée donnée selon le DJMA et le type de route considéré	11

LISTE DES FIGURES

Figure de page de couverture - M. Éric Lachance Tremblay	
Figure 1 - Structure de chaussée souple (Adaptée de [2])	3
Figure 2 - Illustration schématique du transfert de charge dans une structure de chaussée	4
Figure 3 - Schématisation des sollicitations dans une chaussée (Tirée de [5])	5
Figure 4 - Schématisations de l'effet des conditions climatiques sur les enrobés bitumineux (Tirée de [5])	7
Figure 5 - Défectomètre à masse tombante (FWD)	10
Figure 6 - Exemple du module Gel 1994 - Chaussée 2	16
Figure 7 - Courbe de protection partielle (Tirée de [4])	17
Figure 8 - Exemple du module GEL - Chaussée 2	18
Figure 9 - a) Illustration du volet Objectifs - Chaussée 2, b) Paramètres liés au niveau de fiabilité et au delta PSI sélectionné par défaut en fonction des objectifs - Chaussée 2	19
Figure 10 - Illustration du volet Climat - Chaussée 2	20
Figure 11 - Illustration du volet Couches de matériaux - Chaussée 2	21
Figure 12 - Fenêtre d'information générale du projet - PavementME	23
Figure 13 - Fenêtre permettant de sélectionner les indicateurs de performance et les valeurs limites - PavementME	24

LISTE DES FIGURES

Figure 14 - Fenêtre d'entrée de la distribution du trafic - PavementME	24
Figure 15 - Fenêtre d'entrée des paramètres liés au trafic - PavementME	24
Figure 16 - Fenêtre de sélection des paramètres climatiques - PavementME	25
Figure 17 - Fenêtre de sélection des matériaux granulaires non traités et des caractéristiques - PavementME	26
Figure 18 - Module de calcul du module résilient pour les matériaux granulaires non traités - PavementME	26
Figure 19 - Fenêtre de sélection des matériaux granulaires traités et des caractéristiques - PavementME	26
Figure 20 - Fenêtre de sélection des enrobés bitumineux et des caractéristiques - PavementME	27
Figure 21 - Fenêtre de sélection des caractéristiques liées au bitume - PavementME	27
Figure 22 - Tableau de bord du logiciel - i3C-ME	30
Figure 23 - Illustration du module du logiciel i3C-ME permettant de modifier a) les paramètres des pneus, b) les caractéristiques de l'essieu	30
Figure 24 - Illustration du module permettant l'entrée manuelle des températures et de la durée de chacune des saisons- i3C-ME	31
Figure 25 - Illustration de la base de données des facteurs saisonniers du module 5- i3C-ME	32
Figure 26 - Exemple de cas où le nettoyage des fossés serait nécessaire	35

Selon un rapport publié en 2019, 16,4% du réseau routier municipal canadien était classé en mauvais ou très mauvais état, ce qui représente 146 255 km [1]. Le besoin d'entretien est réel, le réseau routier du Canada nécessite des interventions de réfection et de réhabilitation importantes, or les budgets d'entretien sont limités. Pour pallier au besoin de réhabilitation en contexte de budget limité, il est primordial d'effectuer des choix de conception justes et éclairés.

Le dimensionnement structural des chaussées demeure un domaine spécialisé. Plusieurs outils informatiques sont disponibles, mais nécessitent une grande quantité de données et une paramétrisation qui peuvent influencer grandement les résultats obtenus. De plus, les notions théoriques pertinentes au dimensionnement structural des chaussées sont complexes. Dans le cadre du contexte lié au génie municipal, la décentralisation de l'information rend la tâche encore plus ardue aux décideurs.

Ce guide se veut une introduction à propos de la conception de chaussée, plus précisément concernant le dimensionnement de la structure de chaussée. Les notions techniques pertinentes au dimensionnement de chaussée y seront présentées, de même qu'une description du principe de fonctionnement de chacun des outils de dimensionnement sélectionnés. L'objectif du guide est de fournir aux acteurs du domaine municipal des connaissances techniques spécifiques afin d'être en mesure de guider leur réflexion lors du processus décisionnel qui concerne des projets de réfection ou de construction routière.

Il est important de noter que ce guide présente des informations générales, et qu'il ne s'applique pas au cas de figure complexe, par exemple, l'utilisation d'isolant dans la structure de chaussée. Par ailleurs, certains facteurs tels que le drainage, la sécurité routière, l'accessibilité durant les travaux et l'impact sur l'environnement sont importants à prendre en compte dans le cadre du processus de conception d'une chaussée. Ces éléments ne seront pas abordés dans le cadre du présent guide.

2.0 OBJECTIFS ET OUTILS DE DIMENSIONNEMENT ABORDÉS

2.1_ OBJECTIFS DU GUIDE

- Fournir aux acteurs du domaine municipal les notions théoriques pertinentes au dimensionnement structural de chaussée en contexte municipal ;
- Décrire le principe de fonctionnement de trois (3) méthodes et outils de dimensionnement structural des chaussées utilisés au Québec ;
- Inventorier les intrants requis (niveau et qualité) pour alimenter les méthodes et outils de dimensionnement discutés ;
- Caractériser les avantages et contraintes des différentes méthodes.

2.2_ MÉTHODES ET OUTILS DE DIMENSIONNEMENT

- Logiciel Chaussée 2 (AASHTO 1993, méthode empirique des nombres structuraux) incluant un exemple d'application ;
- Logiciel mécaniste empirique AASHTOWare Pavement ME (MEPDG) ;
- Logiciel mécaniste empirique i3C-ME.

Une structure de chaussée souple (ou flexible) est composée d'un revêtement bitumineux (une (1) ou plusieurs couches d'enrobé bitumineux) reposant sur diverses couches de matériaux granulaires. Chaque couche de matériaux, présente dans une structure de chaussée, remplit un rôle fonction de la position de la couche dans la structure (Figure 1). Par exemple, la fondation et la sous-fondation ont un rôle à jouer au niveau du drainage de la structure de chaussée, les enrobés bitumineux ont un rôle au niveau de la sécurité de roulement des usagers. Dans l'ensemble, l'objectif principal de la structure de chaussée est de protéger le sol d'infrastructure : 1) des effets du gel, 2) des effets du trafic.

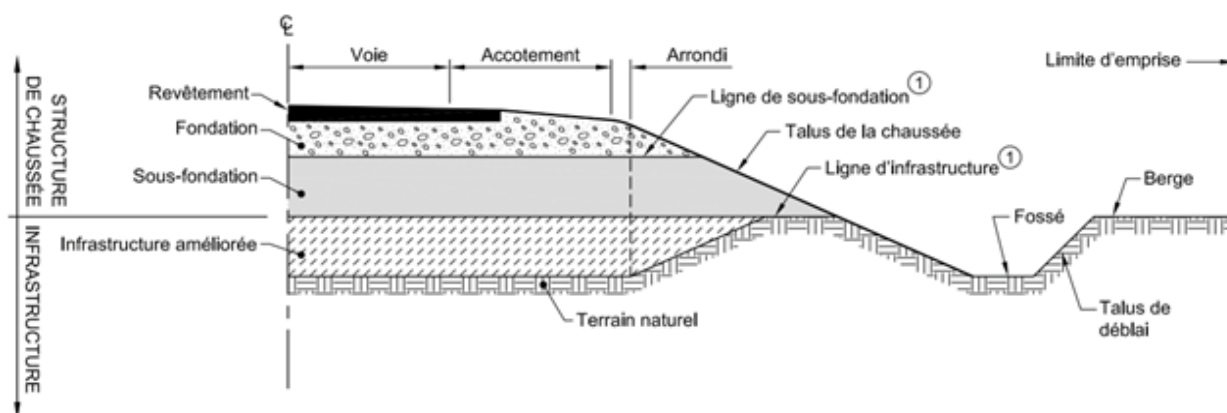


Figure 1: Structure de chaussée souple (Adaptée de [2])

Au Québec, une grande proportion des sols d'infrastructures (terrain naturel) sont composés de matériaux sensibles aux effets du gel (ex. argile, silt, till), ces matériaux peuvent gonfler lorsqu'ils sont saturés d'eau et que les températures sont en deçà du point de gel. À ce sujet, l'un des rôles de la structure de chaussée est de protéger le sol d'infrastructure en place en agissant à titre d'isolant pour limiter la pénétration du front de gel, et en limitant la quantité d'eau pouvant s'infiltrer vers le sol d'infrastructure. Pour la sélection des matériaux de fondation et de sous-fondation, on s'intéressera notamment à la granulométrie des matériaux utilisés, de même que l'épaisseur des différentes couches de matériaux granulaires afin d'obtenir une protection au gel adéquate.

De plus, les sols d'infrastructures sont généralement des matériaux avec une faible capacité portante, il ne serait pas envisageable de circuler sur ces matériaux avec des poids lourds. Ainsi, dans une optique de protection du sol d'infrastructure vis-à-vis des effets du trafic, le rôle des différentes couches de matériaux est de répartir les charges sur le sol d'infrastructure de façon que celui-ci soit en mesure de supporter les charges induites par le trafic (Figure 2). À cet effet, la notion de rigidité des matériaux, également appelée module réversible, de rigidité ou complexe selon le type de matériau, est très importante, puisque cela aura un impact sur le transfert de charge aux couches sous-jacentes.

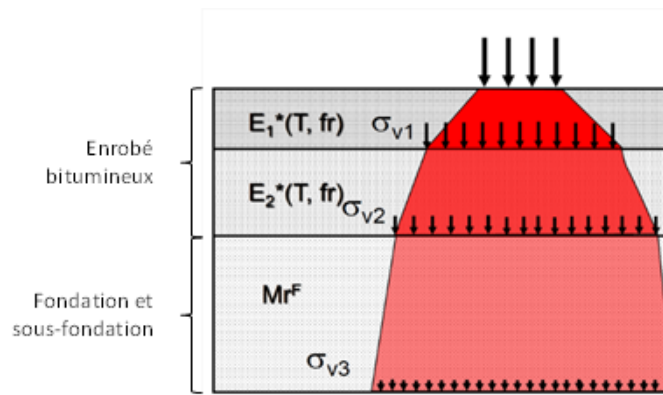


Figure 2 - Illustration schématique du transfert de charge dans une structure de chaussée

3.1_ PRINCIPES DE DIMENSIONNEMENT

Dans les climats tels que celui du Québec, le dimensionnement d'une structure se fait selon deux objectifs :

- 1) résistance aux charges induites par le passage des véhicules (dimensionnement structural),
- 2) protection des effets liés au gel (dimensionnement au gel).

Le **dimensionnement structural** d'une structure de chaussée peut se faire selon deux (2) approches :

- 1) empirique,
- 2) mécaniste empirique (ME).

Le dimensionnement de type empirique est le plus répandu au Québec, toutefois le dimensionnement ME gagne en popularité et fait l'objet de nombreux travaux de recherche tant au niveau de l'industrie, que du milieu universitaire et du ministère des Transports.

L'approche de dimensionnement empirique repose sur l'expérience du passé et/ou le résultat d'essais de laboratoire dit empirique. La complexité du dimensionnement empirique est très variable. Cela peut être aussi simple que l'établissement pour un secteur donné d'un catalogue de coupes types de structures de chaussée basé sur les performances antérieures des chaussées existantes. Il peut aussi y avoir un développement de modèle de comportement dit empirique qui se fait à partir d'une banque de données suffisante pour être capable d'établir un lien entre une variable considérée et le résultat envisagé. Ces modèles de comportement sont développés sur la base d'observations et/ou d'essais et visent à établir un lien entre les paramètres de conception considérés et la performance attendue de la structure de chaussée. Il est important de souligner que la qualité des données influence grandement la précision des approches de dimensionnement empirique.

L'approche considérée par le dimensionnement ME repose sur le principe de la mécanique des matériaux. Le calcul des valeurs de contraintes et de déformations observables dans la structure de chaussée (volet mécaniste) se fait par l'utilisation de modèles mathématiques de comportement des matériaux, ces modèles tiennent compte des caractéristiques et propriétés du matériau, l'épaisseur de la couche et du trafic [3]. L'aspect empirique provient du fait que des modèles empiriques sont ensuite utilisés pour faire le lien entre les valeurs de contraintes-déformations obtenues par les modèles mécanistes, et la performance de la chaussée dans le temps.

Dans les climats froids tels que celui du Québec, le dimensionnement d'une structure de chaussée doit également comprendre un volet **dimensionnement au gel**. En effet, la structure de chaussée doit limiter la pénétration de gel vers le sol d'infrastructure. Il est important de noter que dans la pratique, il serait extrêmement coûteux de construire des structures de chaussées permettant une isolation complète du sol d'infrastructure vis-à-vis des effets du gel. En effet, les structures de chaussées du Québec devraient avoir une épaisseur totale variant entre 1,5 et 3,0 mètres en fonction de la région ou de la route sur laquelle elle se situe pour que l'isolation soit considérée comme complète [4]. Similairement aux principes de dimensionnement structural, le dimensionnement au gel peut se faire selon les approches empiriques ou mécaniste empirique en fonction des modèles et logiciels considérés.

3.2_ PARAMÈTRES DE DIMENSIONNEMENT

3.2.1_ TRAFIC

L'effet du passage du trafic est variable selon le type de matériau considéré. La répétition du passage des véhicules engendre des petites tractions répétées à la base des couches d'enrobés (Figure 3), ce qui mène éventuellement à la fissuration du revêtement. Les fissures apparaissent en bas de couche et se propagent vers la surface du revêtement, phénomène appelé remontée de fissures (fissuration de type « bottom-top »). Pour évaluer cet aspect, on s'intéresse à la résistance à la fissuration de fatigue. En parallèle, la répétition du passage des véhicules engendre des compressions répétées (Figure 3), ce qui mène éventuellement à l'apparition de déformations permanentes. L'accumulation de ces déformations permanentes est appelée l'orniérage.

Par ailleurs, la qualité du collage des couches d'enrobés bitumineux joue un rôle important au niveau de la durabilité des chaussées revêtues d'enrobé. En effet, un collage adéquat des couches d'enrobés par l'utilisation d'un liant d'accrochage permet de considérer ces différentes couches travaillant comme une seule et unique couche d'une rigidité plus élevée que si les couches travaillent indépendamment les unes par rapport aux autres.

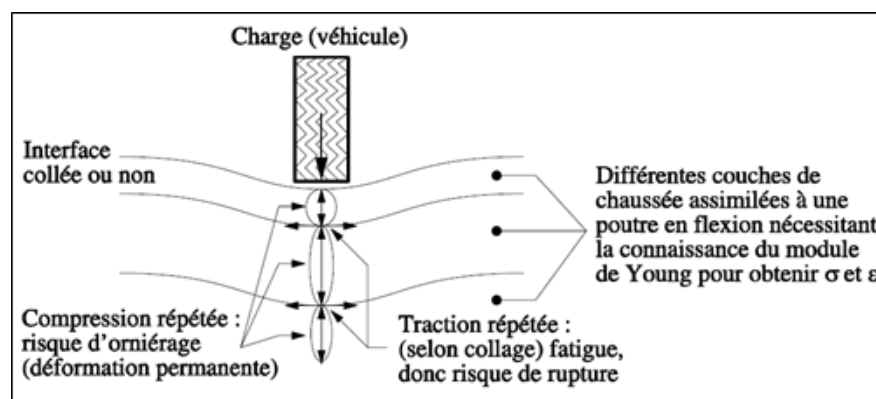


Figure 3 - Schématisation des sollicitations dans une chaussée (Tirée de [5])

Dans les principaux logiciels de dimensionnement de chaussée, l'effet du trafic est généralement considéré par l'application de deux paramètres de conception qui sont les suivants :

- **Débit journalier moyen annuel (DJMA) :**

Le DJMA correspond au nombre de véhicules circulant sur la chaussée pour une période d'une (1) journée. Ce paramètre traduit le volume de circulation dans toutes les voies pour la chaussée concernée.

- **Équivalent charge axiale simple (ÉCAS) :**

L'ÉCAS correspond au nombre de passages d'un essieu normalisé de 80 kN (8,16 tonnes). Ce paramètre traduit l'intensité de la circulation pour la chaussée concernée. Généralement, l'ÉCAS est exprimé en millions pour toute la période de conception de la chaussée, mais dans certains cas, l'ÉCAS peut être exprimé en ÉCAS annuel.

Selon le type de véhicule ainsi que son chargement qui circule sur la chaussée, un (1) seul passage de véhicule peut correspondre à une valeur inférieure ou supérieure à un (1) ÉCAS. Le coefficient d'agressivité (CA) représente le nombre d'ÉCAS pour chaque type de configuration de camion. Par exemple, le passage d'un camion de type 10 roues à pleine charge représente un CA de 2,59 ÉCAS, alors que le passage de ce même camion, mais à vide (sans chargement) représente un CA de 0,27 ÉCAS [6]. La configuration des essieux a un impact considérable sur la valeur de CA et donc, d'ÉCAS, attribuable au passage d'un type de véhicule lourd. À partir d'un relevé de comptage du nombre et du type de véhicules qui circulent sur la chaussée, il est possible d'établir un coefficient d'agressivité moyen (CAM) qui représente l'ÉCAS moyen par camion. Pour plus de détails sur le calcul de la valeur d'ÉCAS et des CA en fonction de la configuration des essieux, le lecteur est invité à consulter le Guide de l'utilisateur du logiciel Chaussée 2.

Certains logiciels de dimensionnement mécaniste empirique permettent de personnaliser les paramètres liés au trafic, notamment le poids par essieu, la configuration des essieux, la vitesse de circulation du trafic, la pression et la dimension des pneus, etc. Ces paramètres permettent d'affiner la conception de chaussée pour des cas spécifiques, mais ne seront pas traités dans le présent guide.

3.2.2_ CONDITIONS CLIMATIQUES

Les conditions climatiques ont un impact considérable par rapport au dimensionnement de chaussée. Les enrobés bitumineux étant des matériaux viscoélastiques, il est important de considérer que leurs propriétés sont fortement influencées par les variations de température. La rigidité d'un enrobé bitumineux varie de façon considérable selon la température, par exemple, le module de rigidité d'un enrobé de type ESG-10 avec bitume PG 58S-28 peut varier de 28 000 MPa (-25°C , 1 Hz) à 740 MPa (25°C , 1 Hz). Cette variation de rigidité a un impact significatif sur le comportement de la chaussée. L'enrobé bitumineux étant moins rigide à haute température, le transfert de charge vers les couches sous-jacentes en sera affecté ce qui peut se traduire par une amplitude des déformations en bas de couche augmentée plus importante qu'à basse température. Certains logiciels de dimensionnement mécaniste empirique permettent de tenir compte de cette variation de rigidité des enrobés au fil des saisons. Toutefois, cela nécessite une caractérisation exhaustive des propriétés des enrobés.

Soulignons également que les conditions climatiques ont un effet à long terme sur la durabilité des enrobés bitumineux. Les températures froides combinées aux températures chaudes et des effets des rayons UV ont tous un impact sur les propriétés des enrobés bitumineux de sorte que l'enrobé subira un vieillissement et donc une diminution de ces propriétés mécaniques par le simple effet de l'exposition aux conditions climatiques.

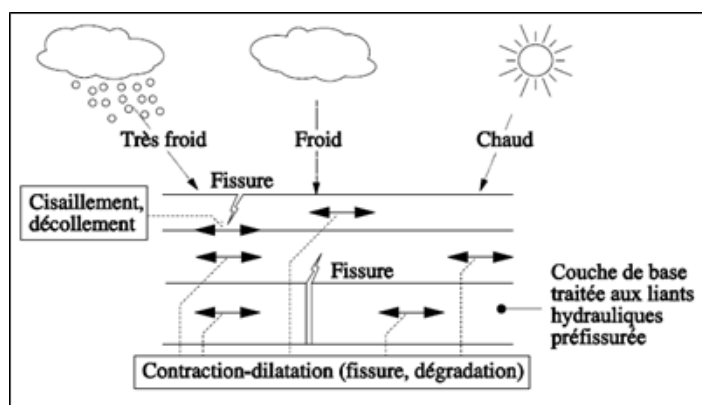


Figure 4 - Schématisations de l'effet des conditions climatiques sur les enrobés bitumineux (Tirée de [5])

En plus de l'effet considérable sur les propriétés et la durabilité des enrobés bitumineux, les conditions climatiques ont également un effet lié à la pénétration du front de gel dans la structure de chaussée en période hivernale. La profondeur de pénétration du front de gel varie selon la région considérée, le tableau suivant présente quelques exemples de profondeur de gel pour l'hiver 2022. La majorité des logiciels de dimensionnement de chaussée, que ce soit empirique ou mécaniste empirique, permet d'effectuer une conception de structure de chaussée en tenant compte de cet aspect.

Tableau 1 - Exemple de données de profondeur de gel relevé par le biais des stations météorologiques [7]

EMPLACEMENT	PROFONDEUR DE GEL (m)
Sainte-thérèse	1,90
Saint-Jean-sur-Richelieu	1,34
Saint-Sauveur	1,66
Lévis	1,86
Petite-Rivière-Saint-François	2,73
Alma	2,00
Gaspé	2,01
Matagami	2,33
Rouyn-Noranda	2,70
Manic-5	3,00 (valeur maximale atteinte)

3.2.3_ SOL D'INFRASTRUCTURE ET CONDITION DE L'EXISTANT

Dans une optique de minimiser les risques de contre-performances et d'apparitions prématurées de désordres sur une structure de chaussée neuve ou réhabilitée, la prémisse, sur laquelle se base la conception, doit être représentative de la situation de terrain et basée sur des données précises et récentes. La majorité des travaux routiers au Québec sont des travaux de réhabilitation d'une chaussée existante endommagée. La réalisation d'une étude de reconnaissance des conditions de l'existant est très importante au préalable de la conception.

Dans la pratique, une campagne de forage géotechnique permet d'obtenir l'information relative au type de sol en place et ses caractéristiques. Ce genre d'étude étant coûteuse, il arrive bien souvent que cette étape soit négligée. Or, dans l'optique d'effectuer une conception juste et des choix éclairés, cette information est essentielle. Une campagne de forage ciblée en fonction des objectifs (ex : forage sur profondeur limité) peut révéler de l'information suffisante pour orienter la conception tout en réduisant les coûts. Le cas échéant, le concepteur peut au minimum guider son choix à l'aide d'outils disponibles sur le web comme le répertoire d'études pédologiques accessibles gratuitement sur le site web de l'Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA).

La capacité structurale de la chaussée existante est rarement évaluée et prise en compte dans les études géotechniques d'avant-projet. Or, le rôle de support de la structure de chaussée existante est considérable vis-à-vis de la performance de l'intervention de réhabilitation et de la chaussée dans le temps. Différentes techniques existent pour évaluer cet aspect. Par exemple, l'essai de plaque est un essai simple à réaliser, et qui consiste à appliquer une charge sur le sol ou le matériau à évaluer afin de mesurer la déflexion obtenue à un point de mesure déporté de la zone d'application de la charge [8]. La mesure de la déflexion se fait à l'aide de la poutre de Benkelman. Cet essai peut se faire en tant que mesure quantitative (vérifier le module de la couche en place versus les données de conception en contexte mécaniste empirique) en cours de réalisation de travaux, ou même en tant que mesure qualitative (appréciation de l'homogénéité de la capacité de support) sur le revêtement existant.

L'auscultation de la structure de chaussée en place peut également se faire à partir d'un déflectomètre à masse tombante (FWD). Le FWD est un appareil monté sur une remorque mesurant la rigidité d'une structure de chaussée et les couches la composant (Figure 5). Le principe de l'essai consiste à laisser tomber une charge sur la surface de la chaussée et de mesurer la déformation obtenue. Cet appareil permet de simuler l'effet du passage d'un véhicule lourd et de mesurer la réaction de la chaussée par le biais d'un bassin de déflexion à l'aide de plusieurs capteurs [9]. Une fois les essais réalisés, le module de chacune des couches de la structure de chaussée peut être calculé par rétrocalcul ou par le biais d'analyses complémentaires [10].



Figure 5 - Déflectomètre à masse tombante (FWD)

Ces deux techniques permettent d'apprécier la capacité de support de la structure de chaussée existante. De cette façon, il est possible de vérifier, s'il y a lieu, de renforcer la structure de chaussée pour supporter le trafic envisagé. Le choix de la technique de réhabilitation pourra ainsi se faire en tenant compte de cet aspect. Si la structure de chaussée en place est encore en bon état, la conception des travaux peut se faire uniquement dans le but de régénérer les caractéristiques de surface (confort, sécurité) de la couche de roulement. Le cas contraire, une technique de réhabilitation permettant de bonifier la capacité portante de la chaussée devrait être envisagée. Au final, bien que la réalisation de ce genre d'étude d'auscultation représente un coût additionnel, cela permet d'effectuer une conception juste et éclairée en tenant compte des conditions réelles de l'existant, facilitant ainsi l'atteinte des objectifs de performance et de durabilité pour la chaussée.

3.2.4_ NOTION DE RISQUE ET DURÉE DE VIE DE CONCEPTION

La notion de risque d'un dimensionnement de chaussée correspond à la probabilité que les performances de la chaussée soient acceptables vis-à-vis des effets du trafic et des conditions climatiques, et ce, sur la durée de vie de conception [11]. En pratique, un risque de 30% pour une durée de vie de 15 ans signifie qu'il y a 30% de risque que la chaussée se dégrade de façon plus importante que prévu et nécessite une intervention importante avant 15 ans. La notion de fiabilité est également couramment utilisée, et représente l'inverse du risque ($100\% - \text{niveau de risque}$). Un risque de 30% est donc associé à un niveau de fiabilité de 70%. La majorité des logiciels de dimensionnement de chaussée considère des valeurs de risques par défaut selon le type de route et le DJMA considéré.

Pour illustrer l'effet du niveau de risque associé à un type de route et une classe de DJMA donné sur la conception d'une chaussée, les différentes valeurs de paramètres W18 (ÉCAS admissible) ont été calculées avec le logiciel Chaussée 2 pour une structure de chaussée donnée. Le tableau suivant montre que le fait de choisir un type de route et une classe de DJMA donné influence grandement les paramètres de conception. Par exemple, une couche d'enrobé de 80 mm d'épaisseur d'une chaussée locale avec DJMA inférieur à 1000 (niveau de risque de 34% associé à ce cas de figure) pourra supporter un ÉCAS de 7,263 millions, alors que cette même couche d'enrobé pour une chaussée régionale avec DJMA supérieur à 3000 pourra supporter un ÉCAS de 4,674 millions (niveau de risque de 20%). Il incombe donc au concepteur de sélectionner les paramètres adéquats pour effectuer une conception adaptée aux objectifs.

Tableau 2 – Valeurs de paramètre W_{18} calculées à partir du logiciel Chaussée 2 pour une structure de chaussée donnée selon le DJMA et le type de route considéré

	Valeurs de W_{18}							
	Locale		Collectrice			Régionale		
DJMA	< 1000	> 1000	< 2000	2000 - 3000	> 3000	< 2000	2000 - 3000	> 3000
EB (80mm)	7,263	6,491	6,491	5,557	4,674	6,491	5,557	4,674
Fondation (200mm)	9,618	8,596	8,596	7,359	6,190	8,596	7,359	6,190
Sous-fondation (400mm)	8,799	7,864	7,864	6,732	5,662	7,864	6,732	5,662

De manière générale, plus le niveau de risque est faible, moins il y a de chance que la structure de chaussée subisse des dégradations importantes avant l'atteinte de la durée de vie de conception. En pratique, un niveau de risque faible se traduit, entre autres, et pour un même niveau de trafic considéré, par des épaisseurs de matériaux plus élevées en comparaison avec un niveau de risque plus élevé. Le concepteur doit donc être conscient du fait que le niveau de risque sélectionné comme critère de conception se répercutera sur le choix des épaisseurs de matériaux composant la structure de chaussée.

La durée de vie de conception correspond à la période écoulée entre l'entrée en fonction de la structure de chaussée (ouverture à la circulation après construction ou réhabilitation) et lorsque la chaussée est détériorée à un point tel qu'une reconstruction ou réhabilitation majeure est nécessaire [12]. Il est important de souligner que lorsqu'une chaussée atteint la durée de vie de conception, cela ne signifie pas qu'aucune dégradation n'est présente sur la chaussée. Il est donc normal d'observer l'apparition de dégradation durant le cycle de vie d'une chaussée, mais le niveau de sévérité de ces dégradations ne devrait pas en pratique nécessiter d'importants travaux d'entretien ou de réhabilitation. Le concepteur peut choisir une valeur de risque différente des valeurs par défaut, le niveau de risque peut être adapté selon les besoins du client.

3.3_ ENROBÉS BITUMINEUX

Au Québec, il existe plusieurs types d'enrobés bitumineux pouvant répondre à diverses applications. La majorité des enrobés, produits par les différents fournisseurs, sont élaborés à partir de la méthode du Laboratoire des Chaussées (LC) du MTQ. Notamment, on retrouve les enrobés les plus répandus de type ESG-10, EC-10, ESG-14 et GB-20. Le suffixe réfère au type de squelette granulaire (GB : grave-bitume, ESG : enrobé semi-grenu, etc.), alors que le nombre qui suit réfère à la grosseur nominale maximale (GNM) des granulats qui composent le squelette granulaire. À titre d'exemple, le GNM pour un enrobé de type ESG-10 est de 10 mm, ce qui signifie qu'au moins 90 % des granulats qui composent cet enrobé ont un diamètre égal ou inférieur à 10 mm.

Le MTQ prescrit des spécifications relatives à ces types d'enrobés dans la norme 4202 (Enrobés à chaud formulés selon la méthode de formulation du laboratoire des chaussées). Parmi les spécifications, on retrouve les éléments suivants : granularité du combiné granulaire (fuseau granulométrique et zone de restriction), volume de bitume effectif (bitume non absorbé par les granulats), indice des vides, résistance à l'orniérage et tenue à l'eau. Ces spécifications sont liées à des critères de mise en œuvre (aptitude au compactage à la PCG), de stabilité (résistance à l'orniérage) et de durabilité (tenue à l'eau).

En parallèle, on retrouve également les enrobés de type EB qui sont couverts par la norme 4201. Cette norme fut retirée en 2007 pour laisser place aux nouveaux enrobés LC. Les EB couverts par la norme 4201 sont formulés selon les principes de la méthode Marshall, visant notamment l'obtention d'une masse de bitume maximale pour des propriétés données. Même si cette norme est retirée depuis plusieurs années, ces types d'EB sont encore très répandus dans l'industrie.

3.3.1_ CHOIX DU BITUME

La classification des bitumes, que l'on retrouve au Québec, se fait sur la base de la méthode Performance Grade (PG), qui dicte des paramètres à évaluer pour définir la plage de température de performance d'un bitume. L'évaluation de la température élevée (Te) se fait à partir d'un essai de cisaillement (DSR), alors que l'évaluation de la température basse se fait à partir d'un essai de flexion de poutre (BBR). Depuis 2019, l'essai MSCR a été ajouté au protocole de caractérisation des bitumes. Cet essai vise à mieux évaluer l'aptitude des bitumes à résister aux déformations permanentes suite à des sollicitations répétées [13]. Au Québec, le MTQ produit une carte et un tableau permettant de sélectionner un grade de bitume en fonction de la localisation du projet ainsi que du trafic envisagé. Une copie de cette carte et de ce tableau est présentée à l'annexe 3.

3.3.2_ GRANULATS ET CARACTÉRISTIQUES

L'utilisation de granulats de qualité est essentielle afin d'obtenir la durabilité souhaitée. À cet effet, les granulats produits par les carrières sont classés suivant une série d'essais visant à évaluer différents paramètres liés aux caractéristiques d'origine de la roche (intrinsèque) et au mode de fabrication. La norme BNQ 2560-114 définit les valeurs seuils pour chacun des paramètres à évaluer. Le tableau de choix des composants du MTQ propose des catégories de granulats en fonction de l'emplacement de la route et du niveau de trafic considéré. Une copie de ce tableau est présentée à l'annexe 3.

3.3.3_ UTILISATION DE GRANULATS BITUMINEUX RECYCLÉS (GBR)

Le recyclage des matériaux provenant du revêtement en enrobé bitumineux des chaussées est une technique utilisée avec succès dans plusieurs pays. Les granulats bitumineux recyclés (GBR) proviennent des travaux de planage ou de démolition de ces chaussées et sont composés de granulats et de bitume. Le GBR présente un potentiel de réutilisation très intéressant et une alternative aux matériaux dits nobles ou vierges [14]–[16].

Les avantages environnementaux liés à l'utilisation des GBR dans les enrobés sont multiples :

- 1) économie de matières naturelles (nobles ou vierges),
- 2) réduction de la production de déchets de construction,
- 3) réduction des gaz à effet de serre (GES) émis par les travaux, et
- 4) réutilisation du bitume présent dans les GBR, ce qui engendre une économie du bitume d'ajout (ou neuf).

De plus, l'utilisation des GBR dans les EB présente des avantages techniques, les plus notables étant une amélioration de la résistance à l'orniérage, une augmentation de la rigidité, une amélioration de la résistance au désenrobage et de la tenue à l'eau [17]. D'un autre côté, l'utilisation du GBR dans les EB peut engendrer une réduction de la maniabilité et de la ductilité étant donné la présence de bitume vieilli [16].

Les propriétés du bitume des GBR sont différentes de celles du bitume neuf. Le phénomène d'oxydation du bitume est responsable de cette différence au niveau des propriétés, phénomène qui provient à la fois de la première fabrication en centrale et de l'exploitation de la chaussée.

Ces effets négatifs peuvent néanmoins être atténués, voir éliminés en effectuant une formulation optimisée. Au Québec, les normes provinciales autorisent l'ajout de GBR jusqu'à 20 % sans changer de bitume. Même à ce seuil, la présence de GBR n'a pas d'effet négatif sur la durabilité à long terme. Pour des taux supérieurs à 20 %, la caractérisation du GBR est un élément clé pour obtenir un enrobé durable. La formulation de l'enrobé est donc adaptée en conséquence.

4.0 OUTILS DE DIMENSIONNEMENT

4.1_ LOGICIEL CHAUSSÉE 2 (AASHTO 1993, MÉTHODE EMPIRIQUE DES NOMBRES STRUCTURAUX)

Le logiciel Chaussée 2 a été développé par le ministère des Transports du Québec (MTQ) et repose sur une approche empirique. Ce logiciel s'appuie sur la méthode empirique des nombres structuraux de l'American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) 1993 pour le volet structural du dimensionnement de chaussée afin de guider le concepteur dans la sélection des types de matériaux et des épaisseurs requises afin de supporter le trafic prévu. En complément, le logiciel comprend deux (2) modules complémentaires afin de vérifier la performance de la structure de chaussée envisagée vis-à-vis des effets du gel.

4.1.1_ PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT : MÉTHODE EMPIRIQUE DES NOMBRES STRUCTURAUX

Le principe de fonctionnement derrière la méthode empirique des nombres structuraux du logiciel Chaussée 2 consiste à résoudre l'équation suivante :

$$\log W_{18} = Z_R \cdot S_0 + 9,36 - \log(SN + 1) - 0,20 + \frac{\log \left[\frac{\Delta PSI}{4,2 - 1,5} \right]}{0,40 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5,19}}} + 2,32 \log (145,04 Mr) - 8,07$$

Où les paramètres sont les suivants :

- W_{18} correspond au nombre admissible de passages d'essieu simple à pneus jumelés de 8 165 kg (18 000 lb);
- Z_R : déviation normale en fonction du niveau de fiabilité;
- S_0 : erreur standard de la prédiction (0,45 par défaut);
- SN : nombre structural global de la structure de chaussée envisagée;
- ΔPSI : différence de valeur PSI entre l'état initial de la chaussée, et la fin de la vie utile;
- Mr : module résilient du sol d'infrastructure.

Lorsque le concepteur sélectionne les épaisseurs et types de matériaux pour une structure de chaussée envisagée, le logiciel considère des valeurs par défaut provenant de la base de données pour chacun des paramètres énumérés précédemment hormis le paramètre W_{18} , une valeur calculée. Les valeurs de delta PSI et de fiabilité, utilisées par le logiciel, varient selon le type de route et la classe de trafic (DJMA projeté) sélectionnés par le concepteur. Une table descriptive présentant ces différentes valeurs est présentée en annexe. Le concepteur peut également entrer les valeurs de son choix pour chacun des paramètres énumérés précédemment.

En fonction du trafic de conception considéré (DJMA et ÉCAS), le concepteur sélectionne des types de matériaux et les épaisseurs de chacune des couches de la structure de chaussée envisagée de façon que le facteur W_{18} calculé pour chacune des couches soit supérieur à l'ÉCAS de conception. En d'autres termes, le concepteur cherche à trouver les épaisseurs minimales pour chacune des couches de la structure de chaussée afin d'obtenir des valeurs W_{18} supérieures à l'ÉCAS de conception. Il est important de savoir que le fait d'augmenter ou de réduire l'épaisseur d'une (1) couche de la structure de chaussée aura un impact sur toutes les valeurs des facteurs W_{18} des autres couches de la structure de chaussée.

Comme il fut mentionné précédemment, le logiciel attribue un nombre structural global pour la structure de chaussée. Il est important de noter que cette valeur de nombre structural global est influencée par l'épaisseur et le type de chacune des couches de matériaux de la structure de chaussée. À titre indicatif, le nombre structural pour les enrobés bitumineux est établi de la façon suivante :

$$SN = a \times D$$

Où le paramètre « a » correspond au coefficient structural des enrobés bitumineux (0,43 à 0,49) et le paramètre « D » à l'épaisseur totale de la couche d'enrobés bitumineux. Dans le cas des matériaux granulaires, le nombre structural est défini comme :

$$SN = a \times m \times D$$

Où le paramètre « a » correspond au coefficient structural selon le type de matériau sélectionné, « m » le coefficient de drainage pour les couches de matériaux non liés, et le paramètre « D » l'épaisseur totale de la couche de matériau. Le coefficient de drainage tient compte de la granulométrie du matériau granulaire envisagé. Par exemple, un matériau granulaire avec une granulométrie étalée et une proportion optimale de particules fines (diamètre inférieur à 80 microns) aura une plus faible capacité de drainage qu'un matériau granulaire avec une granulométrie uniforme et faible teneur en particules fines [19]. Cela se répercutera sur la capacité portante du matériau granulaire puisqu'il est admis que la teneur en particules fines augmente la capacité portante d'un matériau granulaire, mais peut augmenter la rétention d'eau et donc le potentiel de formation de lentilles de glace [20]. Les valeurs de ces divers coefficients sont attribuées par défaut en fonction du choix du type de matériau par le concepteur.

4.1.2_ PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT : MODULE DE VÉRIFICATION DES EFFETS DU GEL

En parallèle de la validation des capacités structurales de la structure de chaussée, le logiciel Chaussée 2 propose deux (2) modules de vérification des effets du gel: 1) Protection partielle (Gel 1994), 2) Protection à soulèvement contrôlé (Gel). Le logiciel propose deux (2) modules qui sont complémentaires afin de vérifier les effets du gel sur la structure de chaussée envisagée en fonction de divers critères préétablis. À noter que les deux (2) modules devraient être utilisés conjointement lors de la conception d'une chaussée.

a. Module de protection partielle (Gel 1994)

Le module de vérification Protection partielle Gel 1994 du logiciel Chaussée 2 est basé sur une approche empirique. Selon cette approche, une épaisseur minimale de la structure de chaussée est proposée en tenant compte de l'indice de gel normal (IGn) de la région considérée et de divers facteurs correction dépendant du type de route (FR) et du sol d'infrastructure en place (FS). En fonction de la station météorologique sélectionnée par le concepteur, une valeur d'indice de gel normal sera sélectionnée parmi la base de données du logiciel. La figure suivante présente une capture d'écran du module Gel 1994 tirée de Chaussée 2.

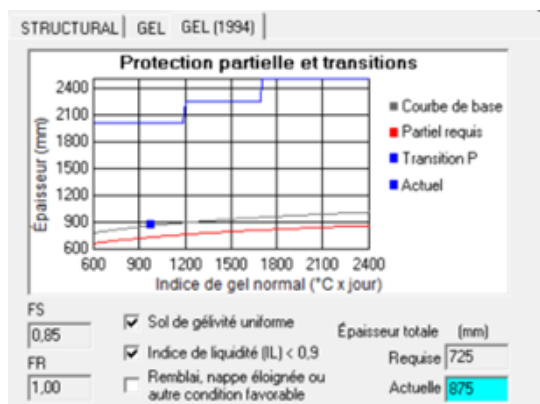


Figure 6 - Exemple du module Gel 1994 - Chaussée 2

La Figure 7 illustre la courbe de base représentant l'épaisseur de structure de chaussée requise en fonction de l'indice de gel normal afin d'obtenir une protection dite partielle. La protection partielle ainsi obtenue constitue en quelque sorte un compromis permettant d'obtenir une performance acceptable de la structure de chaussée [4]. Il est important de souligner que, pour ce module de vérification des effets du gel, l'épaisseur des matériaux de la structure de chaussée (excluant le sol d'infrastructure) sera l'unique paramètre considéré dans l'évaluation. Ainsi, le concepteur devra sélectionner des épaisseurs de matériaux permettant d'obtenir une épaisseur totale de la structure de chaussée (axe des Y) afin de se situer au-dessus de la courbe de protection partielle.

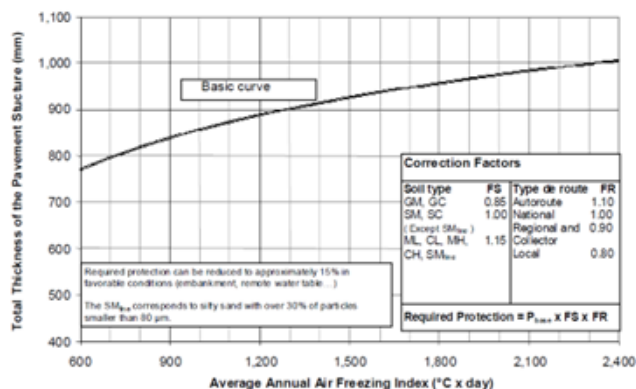


Figure 7 - Courbe de protection partielle (Tirée de [4])

La position de la courbe de protection partielle (Figure 7) varie selon les valeurs de facteurs de correction tenant compte du type de route et du sol d'infrastructure, ainsi que la sélection ou non de l'option de conditions favorables proposée dans le logiciel Chaussée 2. En effet, le concepteur peut choisir l'option de cocher la case indiquant : Remblai, nappe éloignée ou autre condition favorable, soit des conditions dites favorables. Le fait de sélectionner cette option a pour effet de diminuer la protection au gel de 15 %. Or, le concepteur doit faire preuve de prudence s'il choisit de sélectionner cette option puisque cela nécessite d'avoir une connaissance approfondie des conditions géotechniques et hydriques du site considéré.

Comme le type ou la granulométrie des matériaux de fondation ne sont pas des paramètres considérés dans le cas de la protection dite partielle, il est fortement conseillé d'utiliser le présent module en complémentarité avec le module de calcul du soulèvement. En effet, le critère de protection partielle présente une bonne fiabilité dans les sols de gélivité uniforme et avec une susceptibilité au gel modéré [4]. Dans le cas de sols présentant une susceptibilité élevée au gel, le concepteur doit impérativement baser sa conception sur le module de calcul du soulèvement.

Par ailleurs, il faut souligner que, dans le cas où des sols d'infrastructures avec des susceptibilités au gel variable d'un endroit à l'autre sont présents sur le site, des zones de transition devraient être aménagées afin d'éviter les soulèvements différentiels. À cet effet, le module de protection partielle propose une courbe intitulée Transition P. Il s'agit de cas complexes qui ne seront pas couverts par le présent guide.

b. Protection à soulèvement contrôlé

Le module de protection à soulèvement contrôlé (GEL) permet de calculer le soulèvement obtenu pour la structure de chaussée envisagée, en considérant la saturation des couches de sol ainsi que le potentiel de ségrégation du sol d'infrastructure. La valeur obtenue de soulèvement représente la somme du soulèvement causé par l'augmentation du volume de l'eau interstitielle lors du changement de phase (formation de glace) ainsi que le soulèvement causé par la formation de lentilles de glace [20]. Le soulèvement ainsi obtenu peut-être comparé aux critères de conception au choix du concepteur ou bien les valeurs seuils par défaut en fonction du type de route considérées par le logiciel. La figure suivante présente une capture d'écran du module GEL tirée de Chaussée 2.

ρ_d (t/m³)	Eau (%)	SPo (mm²/KH)	a (MPa⁻¹)	K_u (W/mK)	Kf	Sr (%)	Li (W/h/m²)
2.35	0.0	0.0		1.48	1.48	0	1250
2.2	4.0	0.0		1.77	1.89	52	7897
1.92	8.0	0.0		2.10	2.49	56	14018
1.8	14.0	2.0	15.0	1.57	2.14	79	21519

☐ Graphe Z (m) 1.931 h (m) 0.025

Figure 8 - Exemple du module GEL - Chaussée 2

Le calcul du soulèvement au gel obtenu se fait à partir du modèle mathématique SSR. Plusieurs paramètres liés aux matériaux en place et/ou envisagés dans la structure de chaussée, tels que le potentiel de ségrégation (SPo), la conductivité thermique, la saturation en eau et la porosité, sont considérés dans le calcul du soulèvement total.

Ce module étant très complet, le concepteur a la possibilité d'utiliser les valeurs par défaut pour chaque type de matériau de fondation, sous-fondation et sol d'infrastructure, ou bien d'entrer ses propres valeurs. Les paramètres suivants peuvent faire l'objet d'une personnalisation : masse volumique sèche (ρ_d) et teneur en eau (eau %) (pour les matériaux de fondation et le sol d'infrastructure), potentiel de ségrégation (SPo) et coefficient de surcharge (a, uniquement pour les sols d'infrastructure). Ces données peuvent être évaluées à partir d'essais de laboratoire (exception du coefficient de surcharge) et permettent d'affiner la conception en fonction des conditions réelles de terrain.

4.1.3_ INTRANTS REQUIS

Les intrants minimums requis pour effectuer une conception de structure de chaussée selon le logiciel Chaussée 2 se divisent en trois (3) volets : 1) Objectifs, 2) Climat, et 3) Couches de matériaux.

Le volet **Objectifs** représente les objectifs de conception et permet au concepteur de sélectionner un type de route et une classe de trafic selon le DJMA projeté (Figure 9.a). La sélection de ces deux (2) paramètres est très importante, car elle dicte le niveau de fiabilité ainsi que le delta PSI qui seront utilisés dans les calculs du trafic admissible (paramètre W18) pour chacune des couches. Le tableau présenté à l'annexe 1 présente les différentes valeurs de niveau de fiabilité et de delta PSI utilisé par le logiciel Chaussée 2 en fonction du type de route et de la classe de trafic sélectionné. Il est possible pour le concepteur d'utiliser les valeurs par défaut ou d'entrer ses propres données en cliquant sur Afficher paramètres dans le module Structural (Figure 9).

Objectifs		
Type de route	Régionale	
Classe de trafic (DJMA projeté)	entre 2000 et 3000	
Années	ÉCAS (millions)	<input type="checkbox"/> Outil ÉCAS
25	0.0	
BB reporté à l'an prochain : 0 mm		

Erreur standard et fiabilité		
So	R (%)	Zr
0.45	75.0	-0.674

Indice de viabilité		
PSI initial	PSI final	Δ PSI
4.0	2.0	2.0

Figure 09 - a) : Illustration du volet Objectifs - Chaussée 2, **b)** Paramètres liés au niveau de fiabilité et au delta PSI sélectionné par défaut en fonction des objectifs - Chaussée 2

Le volet **Objectifs** permet également de sélectionner la durée de vie projetée ainsi que le nombre d'ÉCAS considéré selon deux (2) approches. Par défaut, le logiciel prend en considération des durées de vie de 25 ou 30 ans selon le type de route et la classe de trafic sélectionné, mais le concepteur peut sélectionner une durée de vie selon ses propres exigences. Considérant le nombre d'ÉCAS, la première approche consiste à utiliser l'outil ÉCAS du logiciel qui calcule l'ÉCAS en fonction de divers paramètres entrés par le concepteur. Pour plus d'information sur l'outil ÉCAS, le lecteur est invité à consulter la section 7 du *Guide de l'utilisateur* du logiciel Chaussée 2 [6].

En ce qui concerne la deuxième approche, le concepteur entre ses propres valeurs de durée de vie et d'ÉCAS. À cet effet, la valeur d'ÉCAS entrée doit être pour la durée de vie de conception et non une valeur d'ÉCAS annuel. Fait à noter pour la deuxième approche est que le nombre d'années considéré n'aura pas d'impact sur le calcul structural, mais plutôt sur la vérification de la performance au gel. En effet, plus la durée de vie considérée est élevée, plus la valeur du soulèvement (h) sera élevée.

Finalement, il arrive parfois pour des raisons techniques ou logistiques que la mise en place de l'entièreté de l'épaisseur prévue des enrobés ne se fasse pas dans la même année. Dans ce cas, il est important que le concepteur prenne en considération cet aspect dans la conception, car cela signifie que la structure de chaussée devra supporter le trafic prévu dans la conception, mais avec des épaisseurs d'enrobé bitumineux réduites. Le logiciel permet au concepteur de sélectionner une épaisseur d'enrobé bitumineux dont la mise en place se fera l'année suivant les travaux. En fonction des résultats obtenus, le concepteur pourra ainsi guider sa réflexion afin de choisir des mesures de compensation.

Le deuxième volet d'intrant requis pour la conception selon le logiciel chaussé est le volet **Climat**. Le concepteur doit sélectionner une station météorologique de la base de données à proximité de la région dans laquelle la chaussée se situe (Figure 10). Un (1) seul paramètre peut faire l'objet d'une sélection par le concepteur, soit la valeur de période de récurrence (PR) qui représente le niveau de confiance associé à la valeur de l'indice de gel de conception (IG). Plus la période de récurrence est élevée, plus le niveau de confiance associé au critère de vérification des effets du gel sera sévère. Pour la province de Québec, la période de récurrence pour un hiver intense est fixée à la moitié de la période de conception [21]. Ainsi, par défaut, la période de récurrence sélectionnée par le logiciel correspond à 0,5 fois la durée de vie de conception. Le concepteur peut augmenter ou diminuer cette période de récurrence.

The screenshot shows a software window titled "Climat". Inside, there is a section "Station météorologique" with a text box containing "Saint-Hubert a" and a "Choisir" button. Below this is a table with columns: "Zone", "T_{BB}", "T_{ma}", "IG_n", and "σ_{IG}". The "Zone" column has a dropdown menu showing "Sud". The "T_{BB}" column has the value "20,5". The "T_{ma}" column has the value "5,9". The "IG_n" column has the value "974". The "σ_{IG}" column has the value "213" in red. Below the table is a "Simulation" section with a dropdown menu showing "Climat". To the right of the dropdown is a "PR" column with a value of "12" in red, and a "IG" column with a value of "1269". At the bottom left is a "n" column with a value of "1,0". At the bottom right is a "IG_s" column with a value of "1269".

Zone	T _{BB}	T _{ma}	IG _n	σ _{IG}
Sud	20,5	5,9	974	213

Simulation

Climat

PR: 12

IG: 1269

n: 1,0

IG_s: 1269

Figure 10 - Illustration du volet Climat - Chaussée 2

Finalement, le troisième volet d'intrant requis pour la conception **Couches de matériaux** permet au concepteur de sélectionner des types de matériau parmi la base de données, l'épaisseur de chacune des couches, de même que le sol d'infrastructure en place (Figure 11). La sélection du type de sol d'infrastructure en place a une importance capitale vis-à-vis du calcul structural et de la vérification des effets du gel. Les cartes disponibles sur ce site web permettent d'identifier, de manière générale, la nature des sols d'infrastructures en place si les données géotechniques provenant de forages ne sont pas disponibles.

	Matériau	H (mm)
1	BB	150
2	MG 20	225
3	MG 112 (fuseau entier)	500
4		
5		
6		
7		
8	GC, GM	
		Total = 875

Figure 11 - Illustration du volet Couches de matériaux - Chaussée 2

4.2_ LOGICIEL MÉCANISTE EMPIRIQUE AASHTOWare PAVEMENT ME

Le guide de dimensionnement de chaussée MEPDG (*Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide*) a été publié en 2004. Cette méthode de dimensionnement se veut une amélioration de la méthode AASHTO 1993, une méthode de dimensionnement de chaussée empirique. En incorporant l'aspect mécaniste, la méthode MEPDG permet de tenir compte du climat et du trafic comme variable de dimensionnement. Fait à noter : ce logiciel n'utilise pas l'ÉCAS comme donnée de conception.

Selon les paramètres de dimensionnement considérés, la « réponse » de la chaussée (contrainte, déformation et déflexion) est calculée par le biais de modèles mathématiques de comportement des matériaux (volet mécaniste). Cette « réponse » de la chaussée est alors traduite en endommagement pour les matériaux de la structure de chaussée, l'accumulation de l'endommagement est alors considérée en fonction de la période d'analyse (ex : mensuel, bimensuel, hebdomadaire, etc.). Cette accumulation d'endommagement pour les matériaux de chaussée est ensuite reliée à des désordres observables sur la chaussée (volet empirique) [12].

4.2.1_ PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

Le logiciel AASHTOWare Pavement ME Design permet d'effectuer la conception de chaussée selon le guide MEPDG. Ce logiciel permet de prédire l'évolution de certains indicateurs de performance des chaussées (ex : IRI, taux de fissuration, profondeur des ornières) dans le temps. La sélection de l'indicateur de performance à suivre et la valeur seuil permettant d'établir qu'une intervention est requise sont au choix du concepteur, de même que le niveau de confiance. Ainsi, la particularité de cette méthode de dimensionnement repose dans le choix des indicateurs de performance à considérer pour effectuer la conception de chaussée.

Les principales étapes de la méthode MEPDG sont les suivantes :

A. Choix des indicateurs de performance et des valeurs seuils :

Plusieurs exemples d'indicateurs de performances et de valeurs seuils recommandées sont présentés dans le *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide - A Manual of Practice*. Pour les chaussées avec revêtement bitumineux, les indicateurs de performance suggérés sont :

- 1) fissuration de fatigue (fatigue cracking),
- 2) profondeur des ornières (permanent deformation),
- 3) fissuration thermique (thermal cracking), et
- 4) IRI [12].

B. Choix du niveau de confiance

Le niveau de confiance correspond à la probabilité que l'évolution d'un indicateur de performance soit inférieure à la valeur seuil préétablie suivant la durée de vie considérée. Typiquement, le niveau de confiance pour la conception est choisi selon le type de route (ex : nationale, collectrice) et le niveau urbain ou rural.

C. Sélection des paramètres de conception

Les paramètres de conception considérés sont regroupés en six (6) catégories :

- 1) informations générales sur le projet,
- 2) indicateurs de performances, valeurs seuil et niveau de confiance,
- 3) trafic,
- 4) climat,
- 5) nombre et épaisseur des couches,
- 6) propriétés des matériaux.

L'approche MEPDG considère trois (3) niveaux hiérarchiques pour la sélection des valeurs liés aux propriétés des matériaux. Le niveau 1 correspond aux mesures réelles effectuées sur site et donc, spécifique au projet. Le niveau 2 correspond à des paramètres de conception établis à partir de corrélation ou de régression linéaire à partir de données provenant d'autres sites ou de paramètres plus faciles à mesurer. Le niveau 3 correspond à des paramètres de conception établis à partir de valeurs par défaut ou à partir d'estimation.

D. Vérification des paramètres de conception par le logiciel AASHTOWare

L'approche MEPDG considère trois (3) niveaux hiérarchiques pour la sélection des valeurs liés aux propriétés des matériaux. Le niveau 1 correspond aux mesures réelles effectuées sur site et donc, spécifique au projet. Le niveau 2 correspond à des paramètres de conception établis à partir de corrélation ou de régression linéaire à partir de données provenant d'autres sites ou de paramètres plus faciles à mesurer. Le niveau 3 correspond à des paramètres de conception établis à partir de valeurs par défaut ou à partir d'estimation.

E. Révision des paramètres de conception (si nécessaire)

Advenant le fait qu'après vérification, il s'avère que les paramètres de conception ne permettent pas de se conformer aux exigences de conception, le concepteur révisé alors les valeurs considérées jusqu'à l'obtention d'une structure de chaussée acceptable.

4.2.2_ INTRANTS REQUIS

Le logiciel AASHTOWare Pavement ME nécessite d'entrer les données de conception pour cinq (5) modules :

- 1) information générale du projet ;
- 2) indicateurs de performance ;
- 3) distribution et paramètres du trafic ;
- 4) données climatiques ;
- 5) sélection des couches et des matériaux.

Lors de la création d'une nouvelle conception de chaussée, une fenêtre d'information générale du projet (General Information) s'ouvre (Figure 12). Cette fenêtre permet de sélectionner le type de projet (nouvelle construction, reconstruction, resurfaçage), de même que le type de chaussée (revêtue d'enrobé bitumineux, chaussée de béton). La fenêtre d'information générale du projet permet également de sélectionner la durée de vie de conception, de même que les informations liées à la date de construction de la fondation de chaussée, de la mise en place du revêtement ainsi que l'ouverture au trafic.

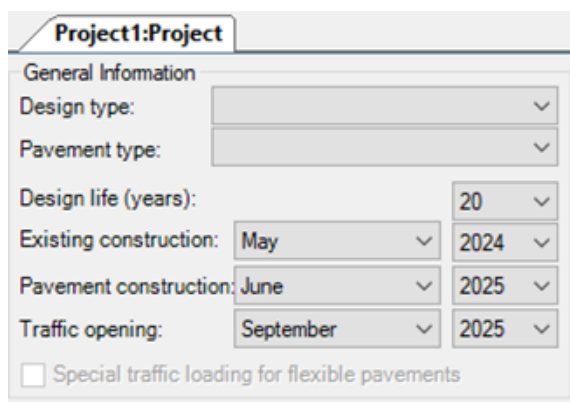


Figure 12 - Fenêtre d'information générale du projet - PavementME

Par défaut, lorsque le concepteur sélectionne une chaussée revêtue d'enrobé, le logiciel prend une série de valeurs limite (Threshold values, limit) en fonction de la classification de la route (Figure 13). Les indicateurs de performance (Performance criteria) du logiciel sont les suivants :

- 1) IRI initial et final,
- 2) Fissuration par fatigue de type top-down et bottom-up,
- 3) Fissuration thermique, et
- 4) Orniérage.

Le concepteur est libre d'exclure certains des indicateurs de performance ainsi que d'entrer ses propres valeurs limite. Également, le concepteur peut entrer le niveau de son choix, et ce, pour chacun des indicateurs de performance.

Performance Criteria	Limit	Reliability	Report Visibility
Initial IRI (m/km)	1		<input checked="" type="checkbox"/>
Terminal IRI (m/km)	2.7	90	<input checked="" type="checkbox"/>
AC top-down fatigue cracking (percent)	25	90	<input checked="" type="checkbox"/>
AC bottom-up fatigue cracking (percent)	25	90	<input checked="" type="checkbox"/>
AC thermal cracking (m/km)	189.4	90	<input checked="" type="checkbox"/>
Permanent deformation - total pavement (mm)	19	90	<input checked="" type="checkbox"/>
Permanent deformation - AC only (mm)	6	90	<input checked="" type="checkbox"/>

Figure 13 - Fenêtre permettant de sélectionner les indicateurs de performance et les valeurs limites - PavementME

En ce qui concerne le module des paramètres du trafic (*Traffic Inputs*), il faut rappeler que la conception de chaussée selon ce logiciel ne se fait pas sur la base de l'ÉCAS, mais plutôt sur des types d'essieux prédéfinis pour chaque classe de véhicule considérée. De plus, la conception mécaniste empirique selon la méthode MEPDG se fait en considérant uniquement les véhicules de classe 4 et des classes supérieures du système de classification de la Federal Highway Administration (FHWA). Pour plus de détails sur les différentes classes FHWA, le lecteur est invité à consulter l'annexe 2. Ainsi, lorsque le concepteur entre les données liées au trafic de conception, celui-ci doit définir la distribution du trafic et le taux d'accroissement selon les différentes classes FHWA (Figure 14). D'autres paramètres liés au trafic doivent être définis par le concepteur, notamment : nombre de camions par voie, nombre de camion par direction, vitesse de circulation et nombre moyen de passages de camion calculé sur une base annuelle (Figure 15).

Trois (3) niveaux hiérarchiques d'entrée des valeurs liés au trafic sont disponibles pour le concepteur. Le niveau 1 requiert un comptage préalable du trafic sur le tronçon concerné, alors que le niveau 3 considère un trafic type en fonction de la classification de la route.

Vehicle Class Distribution and Growth				Load Default Distribution
Vehicle Class	Distribution (%)	Growth Rate (%)	Growth Function	
Class 4	3.3	3	Linear	<input checked="" type="checkbox"/>
Class 5	34	3	Linear	<input type="checkbox"/>
Class 6	11.7	3	Linear	<input type="checkbox"/>
Class 7	1.6	3	Linear	<input type="checkbox"/>
Class 8	9.9	3	Linear	<input type="checkbox"/>
Class 9	36.2	3	Linear	<input type="checkbox"/>
Class 10	1	3	Linear	<input type="checkbox"/>
Class 11	1.8	3	Linear	<input type="checkbox"/>
Class 12	0.2	3	Linear	<input type="checkbox"/>
Class 13	0.3	3	Linear	<input type="checkbox"/>
Total	100			

Figure 14 - Fenêtre d'entrée de la distribution du trafic - PavementME

▼ AADTT		
Two-way AADTT	<input checked="" type="checkbox"/>	4000
Number of lanes	<input checked="" type="checkbox"/>	2
Percent trucks in design	<input checked="" type="checkbox"/>	50
Percent trucks in design	<input checked="" type="checkbox"/>	95
Operational speed (kph)	<input checked="" type="checkbox"/>	100

Figure 15 - Fenêtre d'entrée des paramètres liés au trafic - PavementME

Le module Climat (Figure 16) permet de définir les paramètres climatiques, deux (2) choix s'offrent au concepteur :

- 1) sélection d'une station météorologique parmi les stations disponibles dans la base de données, ou
- 2) interpolation des données météorologiques à partir de stations à proximité en tenant compte de la latitude, longitude et de l'élévation.

Fait à noter : le logiciel tient compte d'un paramètre lié à la profondeur de la nappe phréatique (paramètre qui influence le niveau de saturation des matériaux), le lecteur doit entrer cette valeur par lui-même ou bien prend la valeur par défaut.

▼ Project Climate		
Elevation	<input checked="" type="checkbox"/>	0
Climate station	<input checked="" type="checkbox"/>	Not Set
Latitude (decimal degrees)	<input checked="" type="checkbox"/>	45.5
Longitude (decimal degrees)	<input checked="" type="checkbox"/>	-73.56
Depth of water table (m)	<input checked="" type="checkbox"/>	Annual(10)
▼ Identifiers		

Figure 16 - Fenêtre de sélection des paramètres climatiques - PavementME

Finalement, le dernier module concerne la sélection des différents matériaux et des caractéristiques de ceux-ci composant les couches de la structure de chaussée. Pour chaque matériau, il est possible de choisir parmi les trois (3) niveaux hiérarchiques. Une multitude de possibilités de configuration différentes sont possibles, un échantillon de ceux-ci sera abordé dans le présent guide. En plus de l'épaisseur de la couche, il est possible de modifier ou choisir parmi la base de données, notamment les caractéristiques suivantes pour chacun des types de matériaux :

- Matériaux granulaires non traités (Figure 17 & Figure 18) : coefficient de poisson, module résilient (réel ou bien calculé à partir d'essai de CBR ou de pénétromètre), granulométrie, limite de liquidité, indice de plasticité, teneur en eau optimale, masse volumique sèche maximale, densité, conductivité hydraulique ;

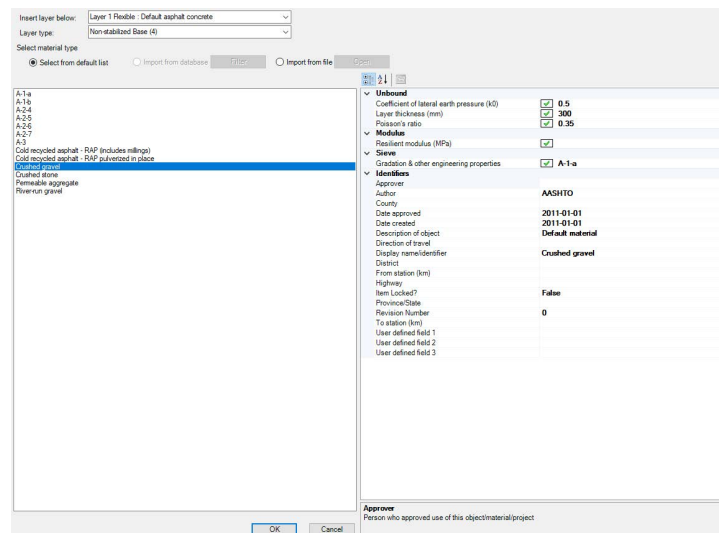


Figure 17 - Fenêtre de sélection des matériaux granulaires non traités et des caractéristiques - PavementME

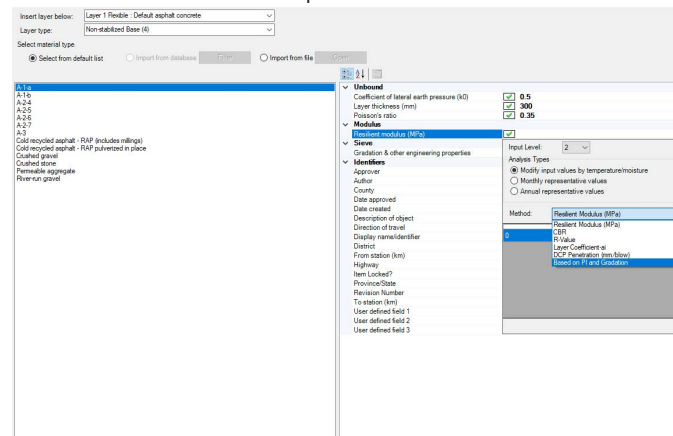


Figure 18 - Module de calcul du module résilient pour les matériaux granulaires non traités - PavementME

- Matériaux granulaires traités de manière chimique (chaux, ciment ou cendres volantes, Figure 19) : module résilient, module d'élasticité, résistance en flexion, coefficient de poisson, masse volumique, conductivité thermique ;

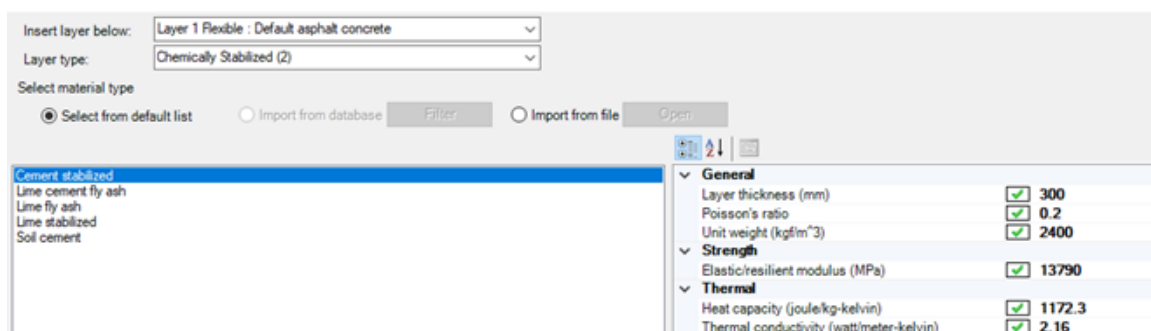


Figure 19 - Fenêtre de sélection des matériaux granulaires traités et des caractéristiques - PavementME

- Enrobé bitumineux (Figure 20) : module dynamique, coefficient de poisson, conductivité thermique, coefficient de contraction thermique, teneur en vide, teneur en bitume, granulométrie, vides comblés par du bitume, densité des granulats ;

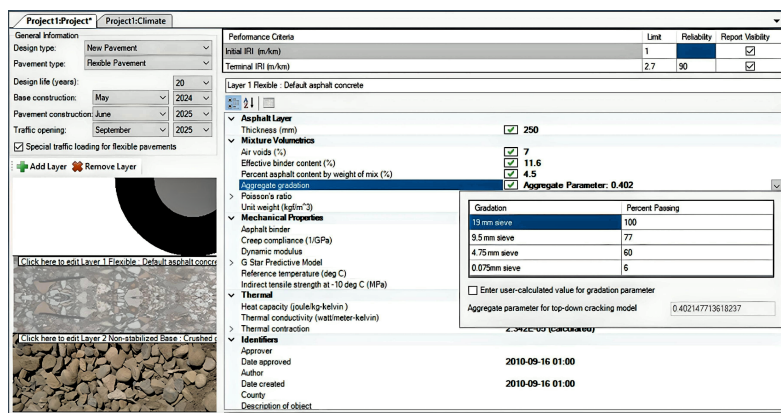


Figure 20 - Fenêtre de sélection des enrobés bitumineux et des caractéristiques - PavementME

- Bitume (Figure 21) : grade de performance PG, module complexe en cisaillement G^* et angle de phase, pénétration, température bille-anneau, viscosité brookfield

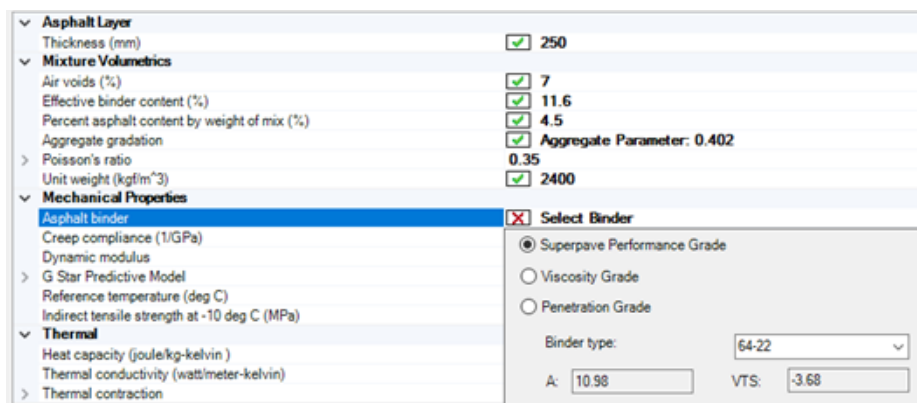


Figure 21 - Fenêtre de sélection des caractéristiques liées au bitume - PavementME

4.3_ LOGICIEL MÉCANISTE EMPIRIQUE i3C-ME

Le logiciel de dimensionnement de chaussée i3C-ME est une méthode de conception de chaussée souple basée sur les méthodes mécaniste empirique. Ce logiciel de dimensionnement a été développé par les chercheurs de l'Université Laval dans le cadre des travaux de la Chaire de recherche i3C afin d'offrir un outil de conception adapté aux conditions d'exploitation propres au Québec [22].

Le logiciel est composé de sept (7) modules :

- 1) information générale du projet ;
- 2) objectifs de conception ;
- 3) définition de la charge ;
- 4) détermination des données climatiques ;
- 5) définition de la structure de chaussée ;
- 6) choix des modèles de performance ;
- 7) calcul des effets du gel.

Chacun des modules permet au concepteur d'entrer les informations relatives au projet de conception de chaussée.

4.3.1_ PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT : CUMUL DE L'ENDOMMAGEMENT PAR FATIGUE ET DE L'ORNIÉRAGE STRUCTURAL

Le principe de fonctionnement derrière le logiciel mécaniste-empirique i3C-ME repose sur le calcul de la durée de vie utile de la chaussée vis-à-vis du cumul des dommages. Le cumul des dommages se fait via l'utilisation de fonctions de transfert empirique (loi ou modèle d'endommagement) qui considèrent :

- 1) la fatigue des matériaux bitumineux ;
- 2) l'orniérage structural de la structure de chaussée.

Le calcul de l'endommagement des enrobés bitumineux et de l'accumulation de l'orniérage structural se fait en fonction de plusieurs paramètres, notamment de la valeur d'ÉCAS entrée, des caractéristiques des matériaux sélectionnés, et des modèles d'endommagement sélectionnés.

Fait important à noter : les calculs d'endommagement peuvent se faire en divisant l'année en cinq **(5)** saisons distinctes :

- 1) été,
- 2) automne,
- 3) hiver,
- 4) début du dégel, et
- 5) fin du dégel.

L'impact de chaque saison sur le comportement d'une chaussée étant fortement variable (par exemple : capacité portante fortement réduite en période de dégel), le fait de diviser les calculs d'endommagement en fonction des saisons permet d'affiner la conception.

A. Endommagement par fatigue des enrobés bitumineux

Tout au long de sa vie utile, une chaussée est soumise au passage des véhicules. Les sollicitations induites par les véhicules créent des efforts de flexion et de compression dans les couches d'enrobé bitumineux. Ces efforts ne provoquent pas la rupture immédiate des enrobés, c'est l'accumulation des dommages engendrés par ces efforts qui entraîne la rupture des enrobés. Le phénomène de fatigue est ainsi caractérisé par la répétition des cycles de flexion et de compression due aux passages répétés des véhicules [5]. Lors de la caractérisation de la résistance en fatigue d'un enrobé bitumineux, on cherche à déterminer la droite de fatigue, aussi nommée droite de Wöhler, qui permet de décrire la durée de vie en fonction de l'amplitude de sollicitation imposée. En d'autres mots, la résistance en fatigue d'un enrobé bitumineux dépend de l'amplitude de la déformation.

Le logiciel i3C-ME inclut six (6) modèles de comportement en fatigue pour les enrobés couramment utilisés dans l'industrie. Le lecteur est invité à consulter la section 6 du Guide de l'utilisateur i3C-ME pour plus de détails sur les différents modèles de fatigue disponibles [22]. Le principe derrière ces différents modèles reste le même, soit de calculer le nombre total de passages admissibles d'essieux (N.) que peut supporter l'enrobé en fonction d'une amplitude de déformation donnée. Lors de la conception d'une structure de chaussée, l'ÉCAS est fixé et représente le nombre total de passages sur la chaussée qui est envisagé. Ainsi, selon le modèle de fatigue sélectionné et les caractéristiques des enrobés, les calculs effectués par le logiciel permettront de vérifier si les épaisseurs des couches d'enrobés bitumineux envisagées résisteront au trafic de conception (nombre de passage admissible, N).

B. Accumulation de l'orniérage structural

L'orniérage structural représente l'accumulation des déformations permanentes observées au sein de la structure de chaussée entière. Lors de la vérification de la structure de chaussée envisagée par rapport à l'orniérage structural, la déformation calculée représente la déformation verticale en bas de la couche de sous-fondation (ou bien au sommet du sol d'infrastructure). Le logiciel i3C-ME inclut cinq (5) modèles de calcul de l'orniérage structural qui ont tous en commun la forme suivante [22] :

$$N_R = C_R \times K_{R1} \times \varepsilon_V^{K_{R2}}$$

Où :

N_R = nombre de cycle de chargement d'un essieu de référence menant à la rupture par déformation permanente (orniérage structural) ;

C_R = facteur de correction variant entre 1 et 1,39 selon le modèle ;

ε_V = déformation verticale en bas de la couche de sous-fondation ;

K_{R1} , K_{R2} = paramètres de conception.

Le lecteur est invité à consulter la section 6 du Guide de l'utilisateur i3C-ME pour plus de détails sur les différents modèles de calcul de l'orniérage structural disponibles [22]. Selon le modèle sélectionné, une valeur maximale d'orniérage structural (qui correspond à la déformation verticale en bas de la couche de sous-fondation) est attribuée, et le nombre de cycles de chargement d'un essieu de référence est calculé. Par la suite, le concepteur sera ainsi en mesure de vérifier si la structure de chaussée envisagée (types de matériaux et épaisseurs des couches) permet de supporter l'ÉCAS de conception sur la durée de vie envisagée une fois les calculs de conception effectués par le logiciel.

4.3.2_ INTRANTS REQUIS

Le logiciel i3C-ME est organisé par module, avec des indicateurs de couleur, qui permettent de valider l'information entrée dans chacun des modules. Le module 1 (*Information générale*) concerne les informations générales et le descriptif du projet de conception. La figure suivante illustre le tableau de bord du logiciel i3C-ME.



Figure 22 - Tableau de bord du logiciel - i3C-ME

Le module 2 (*Objectifs de conception*) permet d'entrer les paramètres liés aux objectifs de conception, notamment le type de route et la durée de vie de conception. Comme la conception se fait sur la base du nombre d'ÉCAS, ce module permet soit de saisir la valeur d'ÉCAS souhaitée ou bien d'utiliser un outil de calcul afin d'estimer l'ÉCAS tenant compte de plusieurs paramètres.

Le module 3 intitulé *Définition de la charge*, permet de configurer : 1) les paramètres du pneu de conception (Figure 23), et 2) les caractéristiques de l'essieu de conception (Figure 23). Dans les deux cas, il est possible d'entrer la configuration de son propre choix, ou bien d'accéder à des valeurs par défaut tirées de la base de données. Par ailleurs, il est important de noter que le type de pneu des véhicules, de même que la configuration de l'essai auront un impact sur la distribution des contraintes au sein des diverses couches de la structure de chaussée.

Figure 23 - Illustration du module du logiciel i3C-ME permettant de modifier les paramètres des pneus et les caractéristiques de l'essieu

Également, le module 3 permet de sélectionner la vitesse de la charge (ex: vitesse des véhicules) de son choix ou bien la valeur par défaut (Figure 23). Il est important de noter que la vitesse de charge se traduit par la fréquence de sollicitation induite par les véhicules sur les matériaux de chaussées. Pour une conception de chaussée en milieu urbain, la vitesse de charge est généralement plus faible qu'en milieu autoroutier, ce qui se traduit par une fréquence de sollicitation plus faible pour les chaussées urbaines en comparaison avec les chaussées autoroutières où la vitesse de charge est plus élevée. Ce paramètre a un effet significatif sur le comportement des enrobés bitumineux considérant que ces matériaux présentent un comportement viscoélastique linéaire. En effet, pour un temps de chargement plus long (vitesse de charge faible, milieu urbain), les enrobés bitumineux sont généralement plus déformables en comparaison avec un temps de chargement plus court (vitesse de charge rapide, milieu autoroutier). La vitesse de charge a donc un impact au niveau des déformations obtenues dans les diverses couches de la chaussée.

Le module 4 (*Données climatiques*, Figure 24) permet de sélectionner les paramètres climatiques, soit en choisissant un climat associé à une ville/ municipalité parmi la base de données, ou bien en utilisant le mode d'entrée manuelle des températures. Fait intéressant, la durée de chacune de ces saisons ainsi que la température à considérer peut-être sélectionnée par le concepteur dans le mode d'entrée manuelle des températures et enregistré dans la base de données pour utilisation future.

Entrée manuelle des températures | Sélectionner un climat parmi la base de données

L'analyse de l'endommagement est effectuée pour une année constituée de 5 saisons, cependant, l'utilisateur peut choisir moins de saisons par an.

1- Entrer la durée respective de chaque saison
2- Entrer les températures du revêtement

Saison	Durée de la saison (en jours)	Température du revêtement	
		<input type="radio"/> Entrée directe T° de l'enrobé (°C)	<input type="radio"/> Calculée à partir des températures de l'air T° de l'air (°C)
Automne	0		
Hiver	0		
Début du printemps	0		
Fin du printemps	0		
Eté	0		
Total			

☐ Enregistrer les conditions climatiques dans la base de données

Figure 24 – Illustration du module permettant l'entrée manuelle des températures et de la durée de chacune des saisons – i3C-ME

Le module 5 intitulé *Structure de la chaussée* permet d'entrer les paramètres liés à la structure de chaussée envisagée (type de matériau, épaisseur, coefficient de poisson et interface collé ou non collé). Similaire à l'outil AASTHOWare, trois (3) niveaux de précision sont disponibles :

- 1) niveau 1 – résultats d'essais de laboratoire,
- 2) niveau 2 – estimation à partir de données physiques,
- 3) niveau 3 – valeur par défaut selon le type de matériau [22].

Pour les enrobés bitumineux, trois (3) types d'enrobés sont inclus dans la base de données du logiciel (ESG-10, ESG-14 et GB-20) ainsi que cinq (5) types de bitume. À noter que les grades de bitume intégrés dans la base de données sont issus du mode de classification *Performance Grade* (PG) et n'incluent pas la classification selon l'essai MSCR (classification en vigueur depuis 2019 au Québec). En ce qui concerne les matériaux granulaires, différentes classes sont incluses dans la base de données du logiciel, notamment les matériaux de type MG-20, MG-56 et MG-112, mais également les matériaux de type MR-1 à MR-5. Enfin, pour les sols d'infrastructures, les types de sols qui sont inclus dans la base de données sont les types de sols issus du système de classification *Unified Soil Classification System* (USCS). Pour plus d'information sur les différents types de matériau, de même que sur les particularités liées au niveau de précision pour chaque classe de matériau (enrobé, matériaux granulaires, sols), le lecteur est invité à lire la section 5 du *Guide de l'utilisateur i3C-ME* [22].

Le module 5 permet également d'intégrer à la structure de chaussée ce qui est intitulé *Autre couche* dans le logiciel. Les trois (3) types de couches pouvant être intégrés dans la structure de chaussée sont :

- 1) couche isolante,
- 2) couche drainante, et
- 3) couche de renforcement.

Ces éléments ne seront pas couverts dans le présent guide, le lecteur est invité à lire la section 5 du *Guide de l'utilisateur i3C-ME* pour plus de détails [22]. Le module 5 permet également de consulter les *Facteurs saisonniers* (Figure 25) pour les différents types de matériaux granulaires et de sols d'infrastructure. Les facteurs saisonniers sont des paramètres qui permettent de tenir compte de la variation du module (ex : capacité portante) des matériaux en fonction des saisons. Par exemple, pour un matériau de type MG-20, le facteur saisonnier est d'une valeur de 1 en période estivale, alors que la valeur est de 2,52 en période hivernale. Cela signifie qu'en hiver, la rigidité du matériau de type MG-20 est 2,52 fois plus élevée qu'en période estivale, la capacité portante de ce matériau est donc plus élevée en hiver qu'en été. À titre indicatif, les valeurs de facteur saisonnier pour un MG-20 en début de dégel et fin de dégel sont de 0,35 et 0,82, respectivement. Cela signifie que le module d'un MG-20 chute drastiquement en période de dégel comparativement aux autres saisons. L'effet de la période de dégel est majeur sur la rigidité, et par le fait même, sur la capacité portante des matériaux de chaussée. Par ailleurs, il est possible d'ajouter des valeurs de facteurs saisonniers de son choix dans la base de données.

Base de données des facteurs saisonniers

Classe du matériau	Facteur saisonnier Automne	Facteur saisonnier Hiver	Facteur saisonnier Début du dégel	Facteur saisonnier Fin du dégel	Facteur saisonnier Été
Defaut Granulaire	1,17	2,52	0,35	0,82	1
MG 20	1,18	2,52	0,35	0,82	1
MG 56	1,18	5,15	0,35	0,82	1
MG 112	1,18	5,15	0,35	0,82	1
SP-SM	1,18	5,15	5,15	0,82	1
SM	1,17	7,56	7,56	0,82	1
SC	1,17	7,61	7,61	0,83	1
ML	1,16	8,92	8,92	0,81	1
MH	1,18	18,82	18,82	0,82	1
CL	1,16	8,68	8,68	0,82	1

Commentaires

- Les facteurs saisonniers sont calculés par rapport au module d'été du matériau. Le facteur d'été est donc égal à 1 pour tous les matériaux.
- Les facteurs saisonniers pour l'hiver sont donnés à titre d'information. Une valeur fixe de module est utilisée pour la saison hivernale en fonction du matériau : Module de 800 MPa pour la fondation et la sous fondation et module de 500 MPa pour les sols.
- Au début du dégel, la fondation n'est plus considérée gelée contrairement aux sols.
- A la fin du dégel, la fondation et les sols sont considérés dégelés.

Figure 25 - Illustration de la base de données des facteurs saisonniers du module 5-i3C-ME

Le module 6 (*Modèles d'endommagement*) permet de sélectionner les modèles d'endommagement disponibles parmi la base de données ou bien d'y inscrire les paramètres liés à un modèle d'endommagement de son choix. Six (6) modèles d'endommagement sont disponibles dans la base de données pour la modélisation de la fatigue, cinq (5) modèles d'endommagement pour la modélisation de la déformation permanente. Également, un modèle de prédiction de l'IRI est inclus dans le logiciel pour tenir compte, notamment, de l'effet du gel sur les sols d'infrastructure [22]. Pour plus de détails sur les différents modèles inclus dans le logiciel, le lecteur est invité à consulter la section 6 du *Guide de l'utilisateur i3C-ME* [22].

Finalement, le dernier module (7) du logiciel i3C-ME s'intitule *Vérification au gel*. L'objectif de ce module de gel est, pour une structure de chaussée donnée, de calculer la profondeur de gel et le soulèvement y étant associé. Le modèle mathématique permettant d'effectuer ces calculs est basé sur les travaux de Saarelainen, soit le modèle SSR, le même que ceux utilisés dans le logiciel Chaussée 2 [22]. Le soulèvement calculé est obtenu en considérant les soulèvements dus à la formation de lentilles de glaces et dus à l'augmentation du volume de l'eau lorsque celle-ci se transforme en glace. Le paramètre clé lié à ce calcul est l'indice de potentiel de ségrégation (SP) qui représente la susceptibilité d'un sol par rapport au gel. Ce paramètre peut être mesuré en laboratoire, ou bien estimé à l'aide de relations mathématiques. À noter que le module de calcul des effets du gel du logiciel i3C-ME donne une plus grande marge de manœuvre au concepteur par rapport au choix des paramètres des conditions climatiques en comparaison avec le module inclus dans le logiciel Chaussée 2.

4.4_ AVANTAGES ET CONTRAINTES DES MÉTHODES ET LOGICIELS DE DIMENSIONNEMENT PRÉSENTÉS

Les trois (3) logiciels de dimensionnement de chaussées présentés dans ce rapport possèdent chacun des avantages et inconvénients qui leur sont propres. Quelques exemples d'avantages et de contraintes sont présentés dans cette section. De manière générale, le logiciel de dimensionnement empirique Chaussée 2 présente les avantages suivants :

- Simplicité d'utilisation : le logiciel Chaussée 2 est plus simple à utiliser que les logiciels mécanistes empirique, ce qui le rend accessible à un plus grand public ;
- Prix : le logiciel Chaussée 2 est gratuit et accessible à tous ;
- Précision : bien que les logiciels de dimensionnement empirique ne soient pas aussi précis que les logiciels de dimensionnement mécaniste empirique, il est tout de même possible d'obtenir un niveau de précision élevé lorsque le concepteur dispose de nombreuses données historiques sur les performances de chaussées similaires. Il est alors possible de comparer la structure de chaussée obtenue à la suite de la conception avec les performances d'une chaussée existante de référence ;
- Fiabilité des modules de vérifications des effets du gel : les deux (2) modules proposés sont complémentaires et permettent une vérification approfondie des effets du gel sur la structure de chaussée.

En contrepartie, le logiciel Chaussée 2 présente quelques contraintes :

- Volet structural incomplet vis-à-vis des propriétés des enrobés bitumineux. Le logiciel considère uniquement trois (3) valeurs de coefficients structuraux pour les enrobés. De plus, les trois (3) types d'enrobés bitumineux proposés (BB, BB HRO, BB HRO et BAF) n'ont pas de lien direct de concordance avec les types d'enrobés utilisés dans l'industrie. De plus, le logiciel ne permet pas de tenir compte des variations des propriétés viscoélastiques en fonction de la vitesse du trafic et de la température;
- Les modules de vérification des effets du gel ne permettent pas d'évaluer les gains ou les pertes en termes de durée de vie par rapport à l'obtention d'une valeur de soulèvement inférieure, égale ou supérieure aux valeurs de conception sélectionnées par le concepteur.

Concernant le logiciel AASHTOWare Pavement ME, les avantages majeurs de ce logiciel portent sur la panoplie d'indicateurs de performance dont il est possible de tenir compte lors de la conception ainsi que les nombreuses possibilités de configuration du type de trafic et des propriétés liées au matériau. Le logiciel est très complet en ce sens et permet d'affiner de manière très précise la conception.

Or, ce logiciel, complexe à utiliser, nécessite une connaissance approfondie des notions liées au comportement des chaussées et des matériaux, ce qui restreint son nombre d'utilisateurs. De plus, le prix d'une licence de ce logiciel est très élevé, il faut compter plusieurs milliers de dollars. Par ailleurs, l'interface d'utilisateur est moins intuitive que le logiciel i3C-ME.

Concernant le logiciel i3C-ME, celui-ci comporte plusieurs avantages notables :

- Prix : le logiciel i3C-ME est gratuit et accessible à tous ;
- Facteurs saisonniers : permet de tenir compte des variations de rigidité des matériaux et de capacité portante lors des saisons ;
- Adaptabilité : dans plusieurs modules, il est possible de sélectionner les valeurs d'un niveau de précision 1 à 3, ou bien même d'entrer ses propres caractéristiques ou informations liées aux modèles d'endommagement.

En contrepartie, l'une des contraintes concerne le volet Propriétés mécaniques du matériau associé aux enrobés bitumineux dont les possibilités de configuration sont limitées.

Le choix du logiciel et de la méthode de dimensionnement à utiliser reviennent au concepteur. Le niveau de précision souhaité ainsi que la quantité d'information disponible par rapport au projet permettent d'orienter le choix. Par ailleurs, l'avantage majeur des méthodes de dimensionnement mécaniste empirique réside dans le fait qu'il est possible de configurer de manière détaillée et précise certains paramètres de conception comme le trafic, le climat ou les propriétés mécaniques des matériaux. Toutefois, afin d'exploiter le plein potentiel de ces outils de dimensionnement, des données fiables et de qualité doivent être disponibles pour le concepteur.

4.5_ ÉLÉMENTS À PRENDRE EN CONSIDÉRATION DANS LA RÉFLEXION

Le niveau de risque associé au projet devrait être sélectionné de manière réaliste en tenant compte de l'état des lieux et des budgets disponibles. Prenons l'exemple d'une structure de chaussée fortement endommagée par les effets du trafic, nécessitant des travaux de réhabilitation et dont l'objectif est d'obtenir une durée de vie de 15 ans sans intervention d'entretien. Dans ce cas, la réalisation d'une simple intervention de planage-pavage ne permettrait pas d'atteindre les objectifs fixés. Le concepteur pourrait orienter son choix de la technique de réhabilitation vers une technique permettant d'offrir un gain en capacité portante, par exemple, le retraitement en place avec stabilisation. Le choix des objectifs de conception doit se faire en tenant compte non seulement du budget disponible, mais également de l'état de la structure de chaussée en place, de la durée de vie projetée, des possibilités d'intervention d'entretien et du niveau de service souhaité selon une période cible [23]. Il n'y a pas de solution unique adaptée à toutes les situations, d'où l'importance de disposer de données précises et récentes sur la chaussée existante.

Un autre élément, souvent négligé, est l'importance du drainage de la chaussée. À cet effet, le rôle du réseau de drainage est CNRC (2003) :

« *Le réseau de drainage d'une route a pour principale fonction d'éloigner les eaux pluviales de façon efficace et efficiente de la surface de la route et de la structure de chaussée [...]* ».

Par exemple, en milieu rural, le nettoyage (Figure 26.a) ou profilage (Figure 26.b) des fossés est parfois négligé dans les projets de réhabilitation. Bien que ces actions nécessitent un investissement parfois non négligeable, il importe de se questionner par rapport à l'état des fossés sur son réseau routier. D'autant plus qu'avec les changements climatiques, les événements météo extrêmes de type précipitations apporteront des quantités d'eau plus importantes sur une courte période. Un fossé en bon état, libre de végétation, permettra d'évacuer les eaux pluviales hors de la structure de chaussée, diminuant ainsi les risques de dégradations. Il importe d'intégrer à la réflexion cet élément lors de la conception d'un projet.



Figure 26. a) et b) - Exemple de cas où le nettoyage des fossés serait nécessaire ; Cas où le profilage de fossés serait nécessaire

En milieu urbanisé, il arrive que l'état du réseau de drainage dicte le type de réhabilitation approprié. Par exemple, dans le cas où le revêtement de chaussée est en fin de vie utile, mais que le réseau de drainage est dans un état acceptable pour encore quelques années d'utilisation, il pourrait être judicieux d'effectuer une intervention limitée de type planage-pavage. Ensuite, lorsque le réseau de drainage aura atteint la fin de sa vie utile et qu'il faudra procéder au remplacement de celui-ci, une réhabilitation de la chaussée de type reconstruction complète pourra être planifiée.

Le choix des matériaux est également un élément important à prendre en considération lors de la conception puisqu'ils constituent un élément clé dans la réussite d'un projet de construction/réhabilitation de chaussée. Plusieurs fournisseurs proposent des types d'enrobés bitumineux destinés à des usages spécifiques.

A noter : les enrobés à module élevé qui sont destinés aux chaussées où le trafic lourd est important, et les enrobés tièdes flexibles qui sont destinés à des interventions de type resurfaçage sur des chaussées à faible volume de circulation fortement dégradé. Également, l'enrobé bitumineux de type MUN-10, destiné aux rues des quartiers résidentiels, a été implanté dans les dernières années. Cet enrobé se veut une alternative aux enrobés ESG-10 ou EC-10 qui sont parfois utilisés dans les rues de quartiers résidentiels. Finalement, les enrobés incorporant des granulats bitumineux récupérés (GBR) sont à considérer lors du choix des enrobés pour un projet donné. La majorité des exigences font état de dosage en GBR allant jusqu'à 20%. Toutefois, certaines administrations tendent vers l'utilisation d'enrobé à dosage élevé en GBR (30%) pour diminuer l'empreinte environnementale associée aux travaux de réfection routière. Des travaux sont en cours au sein de l'industrie afin de favoriser l'utilisation des GBR à grande échelle et ainsi contribuer à diminuer l'empreinte environnementale de cette industrie.

Le choix du grade de bitume pour les enrobés bitumineux doit aussi se faire en fonction du type de trafic (type de circulation, DJMA, ÉCAS), mais également selon l'état de la structure de chaussée en place. Par exemple, l'utilisation d'un bitume fortement modifié aux polymères (ex : PG 64E-28) sur les routes rurales fortement dégradées peut engendrer des problématiques. Non seulement le volume de circulation ne justifie bien souvent pas l'utilisation d'un tel bitume, mais la structure de chaussée en place n'est souvent pas adaptée pour recevoir l'énergie de compactage nécessaire à l'obtention des critères de compaction pour des enrobés bitumineux avec de tels bitumes. En somme, une réflexion doit se faire lors de la conception afin d'optimiser le choix des matériaux.

L'étape de conception d'une chaussée est une étape d'une importance capitale dans un processus de planification, de construction ou de réfection routière. Il est essentiel que cette étape soit effectuée avec des données fiables, représentatives du terrain et selon des objectifs de conception réalistes et tenant compte des besoins du client.

Les différentes méthodes de dimensionnement telles que les méthodes empiriques ou mécaniste empirique ont chacune leurs avantages et leurs contraintes. La méthode empirique est basée sur l'expérience et les données de terrain. Elle est souvent utilisée pour les projets de chaussée à faible volume de trafic et à faible coût. Cependant, elle a des limites en termes de précision et de flexibilité. La méthode mécaniste empirique, quant à elle, est basée sur la mécanique des matériaux et la calibration de modèle effectuée selon des données expérimentales. Elle permet une analyse plus précise et plus détaillée des caractéristiques de la chaussée. Elle est souvent utilisée pour les projets de chaussée à haut volume de trafic et à coût élevé.

Il est important de sélectionner la méthode la plus adaptée non seulement aux besoins spécifiques du client et du projet, mais également adaptée aux données disponibles. De plus, les aspects liés aux coûts des travaux, le potentiel de maintenance et l'impact sur les usagers sont également importants à prendre en compte. L'objectif de ce guide est de fournir des outils aux acteurs du domaine municipal afin d'être en mesure de guider leur réflexion lors de la planification de travaux routiers.

6.0 RÉFÉRENCES































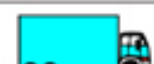



- 1 Bulletin de rendement des infrastructures canadiennes, « [Bulletin de rendement des infrastructures canadiennes de 2019 - Suivi de l'état des infrastructures publiques essentielles du Canada](#) », 2019. [En ligne].
- 2 Transports Québec, « *Dessin normalisé - Terminologie relative aux chaussées* ». 2020.
- 3 R. Haas, S. L. Tighe, G. Doré, et D. Hein, « *Mechanistic-Empirical Pavement Design : Evolution and Future Challenges* », présenté à Annual Conference of the Transportation Association of Canada, Saskatoon, Saskatchewan, 2007.
- 4 D. St-Laurent, « *Routine Mechanistic Pavement Design against Frost Heave* », in Cold Regions Engineering 2012, 2012, p. 144-154. doi: 10.1061/9780784412473.015.
- 5 H. Di Benedetto et J.-F. Corté, *Matériaux routiers bitumineux 2 : constitution et propriétés thermomécaniques des mélanges*. Hermès, 2005.
- 6 D. St-Laurent, « *Chaussée 2 : Logiciel de dimensionnement des chaussées souples - Guide de l'utilisateur* ». 2019.
- 7 Transports Québec, « [Données de profondeur de gel et de dégel dans les chaussées des routes](#) ». 2022. [En ligne].
- 8 É. Lachance-Tremblay, D. Bissonnette, et I. Chacaltana, « *Construction et entretien des infrastructures : Revoir nos façons de faire et faire place à l'innovation* », Via Bitume, vol. 15, no 2, 2020.
- 9 K. Deblois, J.-P. Bilodeau, et G. Doré, « *Use of falling weight deflectometer time history data for the analysis of seasonal variation in pavement response* », Can. J. Civ. Eng., vol. 37, no 9, p. 1224-1231, sept. 2010, doi: 10.1139/L10-069.
- 10 J.-P. Bilodeau et G. Doré, « *Direct estimation of vertical strain at the top of the subgrade soil from interpretation of falling weight deflectometer deflection basins* », Can. J. Civ. Eng., vol. 41, no 5, p. 403-408, mai 2014, doi: 10.1139/cjce-2013-0128.
- 11 American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), « [AASHTO Guide for Design of Pavement Structures \(4th Edition\)](#) », 1993, [En ligne].
- 12 American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), « [Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide - A Manual of Practice \(3rd Edition\)](#) », 2020, [En ligne].

- 13 G. Leclerc, « *Nouvelle classification des bitumes : incidence sur les choix des composants des enrobés* », vol. 24, no 2, 2019.
- 14 Santos Luís Guilherme de Picado, Baptista António Miguel da Costa, et Capitão Silvino Dias, « *Assessment of the Use of Hot-Mix Recycled Asphalt Concrete in Plant* », *Journal of Transportation Engineering*, vol. 136, no 12, p. 1159-1164, déc. 2010, doi: 10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000190.
- 15 V. Antunes, A. C. Freire, et J. Neves, « *A review on the effect of RAP recycling on bituminous mixtures properties and the viability of multi-recycling* », *Construction and Building Materials*, vol. 211, p. 453-469, juin 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.258.
- 16 A. E. Hidalgo, F. Moreno-Navarro, R. Tauste, et M. C. Rubio-Gámez, « *The Influence of Reclaimed Asphalt Pavement on the Mechanical Performance of Bituminous Mixtures. An Analysis at the Mortar Scale* », *Sustainability*, vol. 12, no 20, 2020, doi: 10.3390/su12208343.
- 17 Bitume Québec, « *Le recyclage des enrobés bitumineux* », *Techno-bitume* no 3, 2010.
- 18 É. Lachance-Tremblay, « [Caractérisation du grade PG des liants provenant du GBR : formulation des enrobés HR](#) », Québec, 5 décembre 2018. [En ligne].
- 19 P. A. Cardenas Gomez, « *Caractéristiques hydrauliques de matériaux granitiques concassés* », Mémoire de maîtrise, Université Laval, 2007.
- 20 O. Lalonde-Renaud, « *Influence de la rigidité du revêtement sur les prédictions de soulèvement au gel* », Mémoire de maîtrise, École de Technologie Supérieure, 2015.
- 21 O. Sylvestre, « *Influence du soulèvement au gel sur la durée de vie utile des chaussées* », Mémoire de maîtrise, Université Laval, 2017.
- 22 G. Doré, D. Grellet, C. Richard, J.-P. Bilodeau, E. L. Pérez-Gonzalez, et M. F. Baron H, « *Logiciel mécaniste-empirique de conception des chaussées souples : i3C-me - Guide de l'utilisateur* », Université Laval, 2019.
- 23 É. Lachance-Tremblay, « *La dégradation des chaussées - comment minimiser les risques* », *Via Bitume*, vol. 17, no 2, 2022.
- 24 FHWA, « [Appendix C. Vehicle types](#) ». 2014. [En ligne].
- 25 MTQ, « [Choix des composants – enrobés \(norme 4202\)](#) ». 2021. [En ligne].

ANNEXE 1_ VALEURS DES PARAMÈTRES DELTA PSI, fiabilité et soulèvement au gel du logiciel Chaussée 2 selon la classe de DJMA et le type de route

Type de route	Classe de trafic (DJMA projeté)	APSI	Fabilité (%)	Soulèvement au gel (mm)
Locale	< 1 000	2,0	66	70
	> 1 000	2,0	70	70
Collectrice et régionale	< 2 000	2,0	70	60
	2 000 - 3 000	2,0	75	60
	> 3 000	2,0	80	60
Nationale	< 5 000	2,0	80	55
	5 000 - 20 000	2,0	85	55
	> 20 000	1,75	90	50
Autoroute	< 20 000	1,75	90	50
	> 20 000	1,75	95	50

ANNEXE 2_ DESCRIPTIF DES DIFFÉRENTES CLASSES DE VÉHICULES SELON LA FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (24)

Class 1 Motorcycles		Class 7 Four or more axle, single unit	
Class 2 Passenger cars			
			
		Class 8 Four or less axle, single trailer	
			
Class 3 Four tire, single unit			
		Class 9 5-Axle tractor semitrailer	
			
Class 4 Buses		Class 10 Six or more axle, single trailer	
			
		Class 11 Five or less axle, multi trailer	
Class 5 Two axle, six tire, single unit		Class 12 Six axle, multi-trailer	
			
		Class 13 Seven or more axle, multi-trailer	
Class 6 Three axle, single unit			
			
			

ANNEXE 3_ TABLEAU DE CHOIX DES COMPOSANTS - Enrobé & des zones climatiques produits par Transport Québec (25)

Type de route	Débit de circulation		Couche de surface						Couche de base					
			Bitume			Catégorie gros granulats	Catégorie granulats fins	Essai exigé	Bitume			Catégorie gros granulats	Catégorie granulats fins	Essai exigé
	DJMA	ECAS annuel	Zone 1 PG	Zone 2 PG	Zone 3 PG				Zone 1 PG	Zone 2 PG	Zone 3 PG			
Autoroute	> 20 000	> 1 000 000	64E-28	64E-34	S.O.	1a	1	Orniéreur, CPP	64E-28	58E-34	S.O.	2c	1	Orniéreur
	< 20 000 > 5 000	< 1 000 000 > 500 000	64E-28	64E-34	S.O.	1a	1	Orniéreur, CPP	64E-28	58E-34	S.O.	3c	1	Orniéreur
	< 5 000	< 500 000	64E-28	64E-34	S.O.	2b	1	Orniéreur, CPP	64E-28	58E-34	S.O.	3c	2	Orniéreur
Nationale	> 20 000	> 500 000	64E-28	64E-34	52V-40 58H-34	1a	1	Orniéreur, CPP	64E-28	58E-34	52V-40	3c	1	
	< 20 000 > 5 000	< 500 000 > 300 000	64E-28	64E-34	52V-40 58H-34	2b	2	Orniéreur, CPP	64E-28	58E-34	52V-40	3c	2	Orniéreur
	< 5 000	< 300 000	64E-28	64E-34	52V-40 58H-34	3c	2		64E-28	58E-34	52V-40	3c	2	Orniéreur
Régionale et collectrice	> 20 000	> 300 000	64E-28	64E-34	52V-40 58H-34	2b	1	Orniéreur, CPP	64E-28	58E-34	52V-40	3c	2	Orniéreur
	< 20 000 > 5 000	< 300 000 > 150 000	64E-28	64E-34	52V-40 58H-34	3b	2	Orniéreur	64E-28	58E-34	52V-40	3c	2	Orniéreur
	< 5 000	< 150 000	64E-28	64E-34 58S-28	52V-40 58H-34	3c	2		58S-28	58E-34	52V-40	3c	2	Orniéreur

La reproduction de ce document par quelque procédé que ce soit et sa traduction, même partielles, sont interdites sans l'autorisation du CERIU.

ISBN : 978-2-9821305-6-2

Tous droits réservés.

© CERIU, Juin 2023



Centre d'expertise
et de recherche
en infrastructures
urbaines

999, boul. de maisonneuve ouest, bur. 1620
Montréal (Québec) H3A 3L4, case postale 25

514 848-9885

info@ceriu.qc.ca

www.ceriu.qc.ca