

Dimensionnement et renforcement des chaussées



Copyright © [Direction générale des autoroutes et routes – Service public de Wallonie \(SPW\)](#)

Sommaire

1. Le logiciel de dimensionnement DimMET.....	3
1.1. Dimensionnement structurel	3
1.2. Géométrie de la structure	4
2. Paramètres à prendre en compte pour le dimensionnement.....	5
2.1. Le trafic.....	5
2.1.1. Histogrammes de trafic	6
2.1.2. Prise en compte d'un facteur dynamique.....	9
2.1.3. Choix de la durée de vie souhaitée	9
2.2. Les caractéristiques du sol en place	9
2.3. Les propriétés des matériaux mis en oeuvre.....	11
2.3.1. Caractéristiques mécaniques du béton de ciment	12
2.3.2. Caractéristiques mécaniques de l'enrobé bitumineux.....	13
2.4. Le climat	18
2.4.1. Influence du gradient thermique sur les contraintes dans une dalle en béton de ciment.....	19
2.4.2. Influence de la température sur les contraintes dans un enrobé bitumineux ..	21
2.4.3 Dimensionnement au gel.....	22
3. Méthodes de dimensionnement.....	24
3.1. Conditions aux limites propres à toutes les structures	24
3.2. Structure rigide.....	25
3.2.1. Modèle de Westergaard	26
3.2.2. Modèle de Pasternak	27
3.2.3. Portance équivalente des couches non liées.....	28
3.2.4. Rigidité équivalente des couches liées.....	29
3.2.5. Contraintes dans la dalle	30
3.2.6. Loi de fatigue du béton	31
3.2.7. Coefficient de calage.....	32
3.3. Structures souple et semi-rigide.....	32
3.3.1 Modèle multicouche de Burmister.....	32
3.3.2. Loi de fatigue de l'enrobé bitumineux.....	33
3.3.3. Loi de déformation permanente (orniérage)	34
3.3.4. Rigidité équivalente de couches d'enrobés bitumineux.....	36
4. Calcul inverse.....	37
4.1. Le déflectomètre à masse tombante.....	38
4.2. Le Curviamètre	39
5. Méthodes de renforcement.....	42
5.1. Overlay en béton.....	42
5.2. Inlay en béton.....	45
5.3. Overlay en enrobé bitumineux.....	46
5.4. Inlay en enrobé bitumineux	49
6. Base de données.....	50
6.1. Connexion à la table <i>Paramètres</i> de la base de données	51

1. Le logiciel de dimensionnement DimMET



Le logiciel DimMET a été développé pour le dimensionnement des structures routières et l'évaluation de leur capacité portante. Le texte proposé dans cette aide dresse une synthèse du contexte théorique du dimensionnement d'une structure de chaussée. Si nécessaire, les considérations théoriques sont mises en relation avec les données d'entrée utilisées par le logiciel.

Les fondements théoriques du dimensionnement des chaussées et de leur évaluation sont donnés dans le livre de *Frans Van Cauwelaert Pavement Design and Evaluation (2004)*, édité par *Febelcem*.

(ISBN 2-9600430-0-6. Registration of copyright D/2004/0280/01)

1.1. Dimensionnement structurel

Le dimensionnement structurel consiste en la détermination du nombre et de l'épaisseur des différentes couches d'une structure routière.

L'objectif d'un dimensionnement est de garantir une durée de vie suffisante à la chaussée. Habituellement, les routes à revêtement bitumineux sont dimensionnées pour une durée de vie de 20 ans, celles à revêtement en béton de ciment pour 30 à 40 ans, de manière à ce qu'aucune réparation de type structurel ne doive être réalisée durant cette période.

L'utilisateur peut définir lui-même cette durée de service au moment de la définition du trafic.

1.2. Géométrie de la structure

L'objectif du dimensionnement est de définir le type et l'épaisseur des différentes couches de la structure routière.

Trois types de structures sont considérés:

Chaussée rigides = revêtement en béton de ciment sur fondation liée ou non.

Chaussées semi-rigides = revêtement bitumineux sur une fondation liée.

Chaussées souples = revêtement bitumineux sur une fondation en empierrement.



Les revêtements en béton de ciment sont constitués de dalles jointes (goujonnées ou non) ou comprennent une armature continue. Ils sont posés sur une fondation en béton maigre ou sur un empierrement. Dans la plupart des cas, une couche d'enrobé bitumineux est ajoutée au dessus de la fondation pour en augmenter l'uni et assurer son imperméabilité.

Les revêtements bitumineux sont généralement composés de plusieurs couches élémentaires: la couche de roulement qui confère au revêtement ses caractéristiques de surface telles que rugosité, drainabilité et réduction de bruit, et la sous-couche (elle-même pouvant être composée de plusieurs couches élémentaires) destinée à répartir les contraintes sur la fondation.

La fondation et la sous-fondation servent à répartir les contraintes sur le fond de coffre. La sous-fondation protège également la structure des effets de l'eau et du gel.

2. Paramètres à prendre en compte pour le dimensionnement

Les paramètres nécessaires au dimensionnement sont les suivants:

- Le trafic et notamment les différents *histogrammes de trafic*;
- Les caractéristiques du sol en place;
- Les propriétés des matériaux mis en œuvre, en l'occurrence, les *caractéristiques mécaniques du béton* et les *caractéristiques mécaniques de l'enrobé bitumineux*;
- Le climat et notamment l'*influence du gradient thermique sur les contraintes dans une dalle en béton de ciment*, l'*influence de la température sur les caractéristiques des enrobés bitumineux* et le *dimensionnement de la structure au gel*.

2.1. Le trafic

Sauf dans le cas de trafics particuliers connus avec précision (voies de bus, voies industrielles, etc.), le trafic est caractérisé par un histogramme des charges résultant d'une répartition statistique des charges passant à un endroit donné sur une période de temps donnée ou de la moyenne de répartitions statistiques.

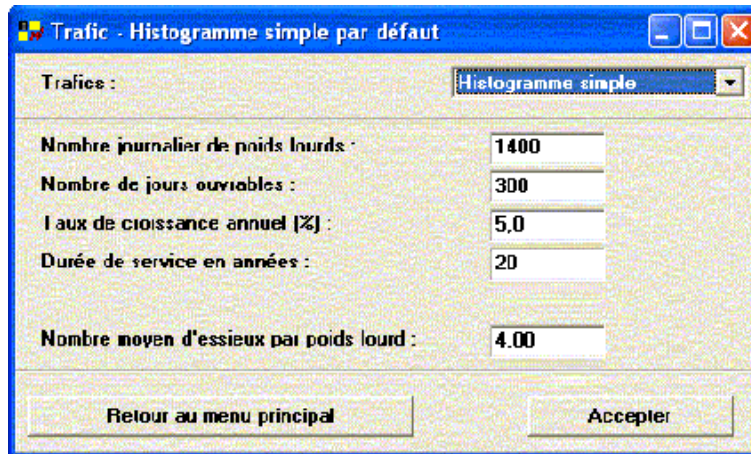
Le logiciel offre trois possibilités de définition de trafic:

- L'histogramme simple par défaut
- L'histogramme simple précisé
- L'histogramme WIM

2.1.1. Histogrammes de trafic

2.1.1.1 Histogramme simple par défaut:

Le trafic est caractérisé par le nombre journalier de poids lourds, le nombre de jours ouvrables par an, le taux d'accroissement annuel du trafic (%), la durée de service (années) et le nombre moyen d'essieux par poids lourd (égal à 4 par défaut). Cette définition élémentaire du trafic fait appel à un histogramme statistique des charges défini par défaut.



Trafic - Histogramme simple par défaut

Trafice : Histogramme simple

Nombre journalier de poids lourds : 1400

Nombre de jours ouvrables : 300

Taux de croissance annuel (%) : 5.0

Durée de service en années : 20

Nombre moyen d'essieux par poids lourd : 4.00

Retour au menu principal Accepter

2.1.1.2 Histogramme simple précisé:

L'histogramme des charges est défini par l'utilisateur. Il peut être sauvegardé pour des analyses ultérieures.

Trafic - Histogramme simple précisé

Trafic : Histogramme simple

Nombre journalier de poids lourds :

Nombre de jours ouvrables :

Taux de croissance annuel (%):

Durée de service en années :

Nombre moyen d'essieux par poids lourd :

Histogramme simple

Classe	Charge (kN)	Fréquence
1	5	0.70
2	15	9.73
3	25	15.35
4	35	20.71
5	45	18.86
6	55	10.68
7	65	5.45
8	75	3.60
9	85	3.59
10	95	2.65
11	105	3.33
12	115	2.22
13	125	1.56
14	135	0.89
15	145	0.32
16	155	0.18
17	165	0.09

2.1.1.3 Histogramme WIM:

Cet histogramme fait la distinction entre essieux simples, tandem ou tridem. Il est obtenu par pesage dynamique (Mesures WIM - Weight in motion). Le nombre moyen d'essieux par poids lourd est calculé à partir de l'histogramme détaillé.

La charge indiquée dans la deuxième colonne est celle du groupe d'essieux considéré. On en déduit la charge par essieu en divisant la charge indiquée par deux pour un tandem, et par 3 pour un tridem.

Histogramme WIM

Trafic : **Histogramme WIM 20 ans**

Nombre journalier de poids lourds : 1200

Nombre de jours ouvrables : 250

Taux de croissance annuel (%): 4,0

Durée de service en années : 20

Nombre de poids lourds observés : 24950 ☒ Connu

Nombre moyen d'essieux par poids lourd : 4,14

Histogramme WIM

Classe	Charge (kN)	Simple	Tandem	Tridem
1	10	1477	0	0
2	30	4690	30	0
3	50	21671	643	37
4	70	11700	1567	957
5	90	4104	1447	1948
6	110	5218	1307	1159
7	130	1976	920	864
8	150	178	568	708
9	170	7	459	726
10	190	0	311	1268
11	210	0	200	1912
12	230	0	97	1672
13	250	0	25	824
14	270	0	4	244
15	290	0	0	44
16	310	0	0	13
17	330	0	0	1

Sauver dans base de données

Retour au menu principal **Accepter**

2.1.2. Prise en compte d'un facteur dynamique

Pour les dalles en béton non goudonnées, un facteur dynamique égal à 1,2 doit de préférence être pris en compte. En ce qui concerne les dalles en béton goudonnées, un facteur dynamique égal à 1,1 est considéré. Ce facteur simule l'effet dynamique des véhicules au niveau des joints transversaux. Il se retrouve dans la fenêtre de dimensionnement.

Il n'y a pas lieu de tenir compte de ces effets dynamiques pour les revêtements en béton armé continu et les structures souples ou semi-rigides.

2.1.3. Choix de la durée de vie souhaitée

Dans chaque fenêtre d'histogramme de trafic, la durée de service souhaitée, exprimée en années, doit être précisée. La valeur adoptée par défaut est de 20 ans.

Exemple : Histogramme simple précisé

Trafic : Histogramme simple

Nombre journalier de poids lourds : 1400

Nombre de jours ouvrables : 300

Taux de croissance annuel (%) : 5,0

Durée de service en années : 20

Nombre moyen d'essieux par poids lourd : 4,00

Histogramme simple

Classe	Charge (kN)	Fréquence
1	5	0,70

2.2. Les caractéristiques du sol en place

L'utilisateur précise les caractéristiques du sol en place dans la fenêtre de dimensionnement.

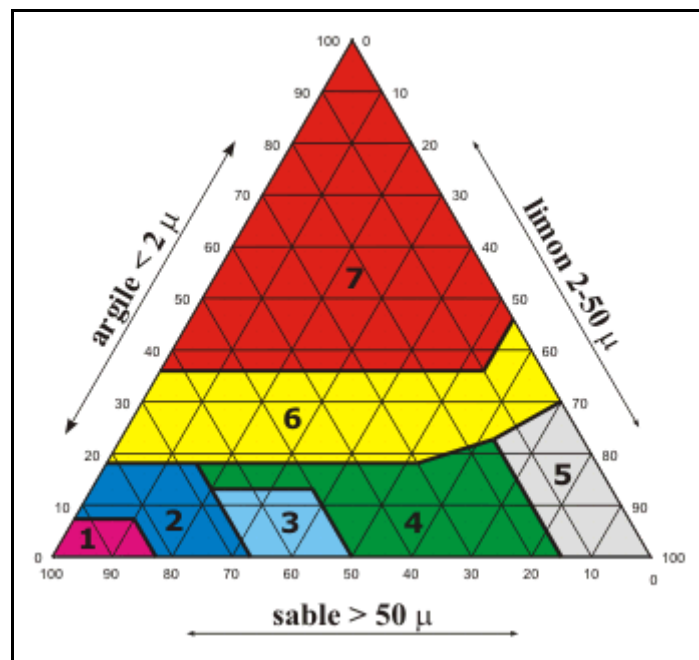
Dans le cas des chaussées rigides, le sol est caractérisé par son module de réaction k , exprimé en N/mm^3 , et le cas échéant, par son module de cisaillement G , exprimé en N/mm . L'utilisateur peut également le caractériser par sa nature.

Dans le cas des chaussées souples et semi-rigides, le sol est caractérisé par sa nature ou par son indice CBR. Lorsque l'indice CBR du sol est connu, le module de Young E_s est calculé via la relation $E_s=10*CBR$. En approximation, on peut choisir pour le type de sol l'indice CBR repris dans le tableau suivant.

Type de sol	CRR (%)
Argile	2 à 3
Limon	3 à 5
Sable mono granulaire Sable fin	5 à 8
Sable limoneux	5 à 8
Sable argileux	7 à 15
Sable	7 à 20

Il est également possible d'introduire le degré d'anisotropie du sol, qui est le rapport entre le module vertical et le module horizontal.

Par ailleurs, le triangle de Richardson établit un lien entre les dénominations routières et agronomes pour les sols :



Les zones du tableau correspondent aux sols suivants:

1. sable
2. sable limoneux
3. limon sableux léger
4. limon sableux
5. limon
6. argile
7. argile lourde

En utilisant la même numérotation des sols que pour le triangle de Richardson, le tableau suivant donne une indication sur l'évolution du module E_s du sol en fonction de sa drainabilité.

Sol	Drainabilité du sol			
	Bon drainage	Drainage modéré	Drainage faible	Pas de drainage
1 à 4	40	40	20	< 10
5, 6	40	20	10	< 10
7	20	< 10	< 10	< 10

2.3. Les propriétés des matériaux mis en oeuvre

Les hypothèses relatives aux matériaux sont les suivantes:

- Les matériaux ont un comportement linéaire élastique. Ils sont caractérisés par:
 - Un module de Young (module d'élasticité)
 - Un coefficient de Poisson
- Les matériaux sont considérés comme étant homogènes
- Les déformations restent petites

Le module d'élasticité du béton de ciment est calculé à partir de la résistance caractéristique à la compression sur cylindre.

Le module d'élasticité de l'enrobé bitumineux est calculé à partir des caractéristiques du bitume utilisé et celles de l'enrobé proprement dit, pour une température et une fréquence d'application de la charge données.

Le module d'élasticité des autres matériaux est constant et peut être retrouvé dans la base de données.

Le coefficient de Poisson est constant pour tous les matériaux et peut être retrouvé dans la base de données.

L'utilisateur peut modifier les caractéristiques des matériaux existants ou ajouter des nouveaux matériaux.

Les caractéristiques des matériaux retenus dans la fenêtre du dimensionnement de la structure considérée peuvent être visualisées en positionnant le curseur sur le nom du matériau.

2.3.1. Caractéristiques mécaniques du béton de ciment

Détermination du module dynamique du béton (E_c)

1. *Relation entre le module dynamique et le module statique et expression du module statique en fonction de la résistance caractéristique en compression:*

Le module dynamique E_c du béton peut être exprimé en fonction du module statique moyen E_{cm} par :

$$E_c = 1,05 \cdot E_{cm}$$

avec $E_{cm} = 22000 (0,1 \cdot f_{cm})^{0,3}$

où $f_{ck} = f_{cm} - 1,645 \left(\frac{cv}{100} \right) \cdot f_{cm}$

Dans le cas du béton utilisé pour les revêtements routiers, le coefficient de variation, noté cv , est de l'ordre de 10%.

On a $f_{cm} = \frac{f_{ck}}{0,8355}$

2. *Détermination de la résistance caractéristique en compression:* La détermination de la résistance caractéristique en compression du béton se fait, conformément au RW99, sur éprouvettes cylindriques de diamètre 113 mm et de hauteur 100 mm. La résistance à la compression obtenue est notée R'_{bk} . La relation suivante permet d'obtenir la résistance caractéristique à la compression f_{ck} sur cylindre normalisé de diamètre 300 mm et de hauteur 150 mm:

$$f_{ck} = 0,73 \cdot R'_{bk}$$

3. *Valeur de la résistance du béton à prendre en compte dans la loi de fatigue:* La résistance à prendre en compte dans la loi de fatigue du béton est la résistance moyenne à la traction par flexion, notée $f_{ctm,fl}$.

$$f_{ctm,fl} = 0,05 f_{cm} + 4$$

Notations utilisées

E_{cm}	E statique. C'est le E sécant du béton;
E_c	E dynamique. C'est le E tangent à l'origine pour un béton de masse volumique courante à 28 jours. Aussi noté $E_c(28)$;
f_{ck}	Résistance caractéristique en compression du béton sur cylindre à 28 jours;
f_{cm}	Résistance en compression moyenne du béton sur cylindre;
f_{ctm}	Résistance en traction moyenne du béton sur cylindre;
R'_{bk}	Résistance caractéristique en compression du béton sur carotte dans le RW99;
R'_{bm}	Résistance moyenne en compression du béton sur carotte dans le RW99;

2.3.2. Caractéristiques mécaniques de l'enrobé bitumineux

Le module d'élasticité de l'enrobé bitumineux varie en fonction de la température ambiante et de la fréquence d'application de la charge. Il est déterminé à partir du module de cisaillement du bitume, à partir du pourcentage de vide de l'enrobé et la teneur en bitume. En plus, il faut distinguer les enrobés bitumineux avec bitume classique (2.3.2.1) et les enrobés bitumineux avec bitume modifié.

2.3.2.1. Caractéristiques mécaniques de l'enrobé bitumineux avec bitume classique

2.3.2.1.1 Caractéristiques mécaniques du bitume classique

Le bitume, corps viscoélastique, n'est ni un solide élastique idéal (répondant à la loi de Hooke), ni un liquide visqueux idéal (newtonien). Il présente des propriétés combinées de l'un et l'autre en fonction du temps de charge à laquelle il est soumis.

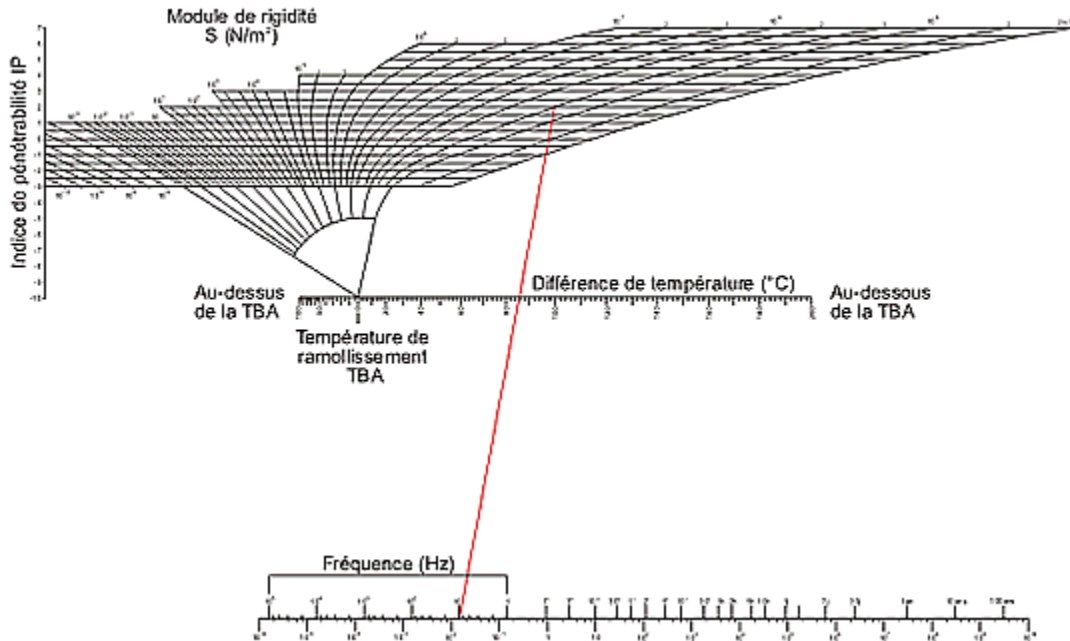
Pour une charge appliquée très rapidement et à basse température, le bitume se comporte comme un solide élastique : la déformation est proportionnelle à la charge appliquée et le retour à l'état initial est total si la charge est annulée rapidement. Si par contre, une contrainte est appliquée à haute température, le bitume se comporte comme un liquide visqueux et présente une déformation continue, le taux de déformation étant proportionnel à la charge appliquée; dans ce cas, il subsiste une déformation permanente. Pour les temps de charge et les températures intermédiaires, le bitume présente un caractère viscoélastique et son comportement est situé entre les deux extrêmes précédents.

Pour décrire ce comportement viscoélastique, une notion élargie du module d'Young, fonction du temps de charge, a été introduite par Van Der Poel sous le terme de *Module de rigidité*, noté S^* .

Le nomogramme de Van Der Poel permet d'évaluer ce module de rigidité sur base de la température anneau & bille et de la pénétration du bitume considéré, quels que soient la température et le temps de charge. Aux basses températures, tous les bitumes ont été

reconnus comme ayant un comportement élastique et leur module de rigidité est de l'ordre de 3000 MPa.

Nomogramme de Van der Poel



Procédure pour la détermination du module de rigidité:

Relier le point 10 Hz de l'échelle des temps de chargement au point 86 °C (75+11 °C) de l'échelle des différences de température.

Prolonger jusqu'à l'intersection de la ligne 2 des iso IP

Lire la valeur de la rigidité $S = 5.10^8$ N/m²

Exemple : TBA = 75 °C ; IP = +2 ; Température d'essai = -11 °C ; Fréquence de sollicitation = 10Hz

(Cette méthode n'est valable que pour les liants routiers, cependant, elle fournit une estimation suffisante du module de rigidité des bitumes modifiés pour le dimensionnement à la fatigue de l'enrobé bitumineux)

2.3.2.1.2. Caractéristiques mécaniques de l'enrobé bitumineux avec bitume classique

Si le module du bitume classique est connu, le pourcentage de vide de l'enrobé et la teneur en bitume sont donnés, on peut calculer le module d'élasticité de l'enrobé bitumineux. Pour cela, la relation suivante peut être utilisée [Francken L. and Vanelstraete A., "Complex moduli of bituminous materials - A rational method for the interpretation of test results, Proceedings of the RILEM Symposium on mechanical test for bituminous materials: recent improvements and future prospects", Lyon (France), 14-16 May 1997]:

$$|E^*|(T, f) = E_{\infty} \cdot R^*(T, f)$$

où

E_{∞} est le module purement élastique de l'enrobé, constant pour une composition donnée
 R^* est le module réduit décrivant la forme de la courbe maîtresse du mélange
 $(0 < R^* < 1)$

$$E_{\infty} = 14360 \left(\frac{V_a}{V_l} \right)^{0,55} \exp(-0,0584v)$$

$$\log(R^*) = \log(B^*) \left[1 - 1,35 F \left(\frac{V_a}{V_l} \right) G(B^*) \right]$$

$$G(B^*) = 1 + 0,11 \log(B^*)$$

$$F \left(\frac{V_a}{V_l} \right) = 1 - \exp \left(-0,13 \frac{V_a}{V_l} \right)$$

avec

B^* , le module du bitume classique (MPa).

V_a , le volume de granulats dans le mélange (en %).

V_l , le volume de liant dans le mélange (en %).

v , le pourcentage de vides résiduels du mélange $(0 < R^* < 1)$

Avec DimMET, les éléments suivants sont introduits, le pourcentage de vide, la teneur en bitume de l'enrobé, la température anneau & bille et la pénétration du bitume considéré.

Avec ces valeurs, le module d'élasticité de l'enrobé bitumineux est calculé en tenant compte de la température moyenne mensuelle de la Base de données – Climat (2.4.2).

Base de données - Matériaux

Type de matériaux : **Enrobés bitumineux** (sélectionné)

Ajouter Supprimer

Modifier Sélectionner un matériau pour accéder aux boutons

Copier

Couche d'usure

Dénomination	% Liant	% Vides	Pénétration (1/10mm)	Temp. A&B (°C)	Non classique
BB - 1B	5.90	4.00	60.00	50.00	
BB - 2C	7.90	4.00	42.00	54.00	
BB - 4C	6.30	4.00	60.00	50.00	

Couche de base

Dénomination	% Liant	% Vides	Pénétration (1/10mm)	Temp. A&B (°C)	Non classique
BB - 3A	4.50	5.00	60.00	50.00	
BB - 3B	4.70	5.00	60.00	50.00	

Quitter

2.3.2.2. Caractéristiques mécaniques de l'enrobé bitumineux avec bitume modifié

Un bitume modifié est composé d'un bitume routier intimement mélangé à un polymère (élastomère ou plastomère). Nous convenons de reprendre également sous cette appellation le bitume à indice de pénétration positif (produit bitumineux présentant une susceptibilité thermique réduite, obtenu par distillation, avec ou sans oxydation, de certains pétroles bruts ou par précipitation de la fraction asphaltique de ceux-ci).

Ces bitumes ne répondent pas aux propriétés classiques des bitumes routiers et notamment en ce qui concerne leur susceptibilité thermique (moindre que pour les bitumes routiers). Ils ne peuvent donc pas être caractérisés uniquement à partir de leur indice de pénétration et leur température de ramollissement anneau & bille. La prise en compte des propriétés rhéologiques, déterminées à l'aide d'essais complexes (principalement les *Bending Beam Rheometer* et *Dynamic Shear Rheometer*) s'avère indispensable.

Pour se rapprocher des caractéristiques mécaniques de l'enrobé bitumineux non classique, l'essai 2PB-TR déterminera le module d'élasticité à une certaine température et fréquence (norme EN12697-26). Avec DimMET, ces matériaux sont classés dans la Base de données – Matériaux comme 'Enrobés à Module Connu', lesquels nécessitent l'introduction des valeurs de module élastique obtenues à 0° C, 15°C et 30°C et à la fréquence de 10 Hz.

Base de données - Matériaux

Type de matériaux : **Enrobé à Module Connu**

Ajouter Supprimer

Modifier Sélectionner un matériau pour accéder aux boutons

Copier

Couche d'usure

Dénomination	Fréquence (Hz)	E (T1 = 0°C - N/mm²)	E (T2 = 15°C - N/mm²)	E (T3 = 30°C - N/mm²)
AB-1B	10	18624	9520	3120
AB-2C	10	22987	13120	4210
Z0A-B1	10	19673	10230	3760

Couche de base

Dénomination	Fréquence (Hz)	E (T1 = 0°C - N/mm²)	E (T2 = 15°C - N/mm²)	E (T3 = 30°C - N/mm²)
AB-3B	10	19853	11010	3470
AB-3A	10	20119	12860	3300
AVS	10	23351	14500	5670

Quitter

Si nous sommes dans l'impossibilité d'effectuer l'essai 2PB-TR sur l'enrobé non classique, nous approcherons le module d'élasticité par la caractérisation classique, comme décrit au paragraphe 2.3.2.1. Dans la base de données, ces matériaux sont classés comme 'enrobés bitumineux', avec un '*' indiquant qu'il s'agisse d'un enrobé bitumineux avec bitume modifié. Pour certains enrobés non classique, la caractérisation classique donne des résultats acceptables entre 0°C et 30°C. Mais il reste évident que la réalisation de l'essai 2PB-TR est préférable pour l'étude du comportement mécanique.

Finalement, nous remarquons que le calcul de l'orniérage des enrobés bitumineux avec bitume modifié ne peut pas s'effectuer avec DimMET. Pour le calcul d'orniérage, nous devons connaître les caractéristiques mécaniques de l'enrobé à 40°C (3.3.3) mais à cette température, il n'est pas favorable d'approcher le module d'élasticité du bitume modifié de façon classique. Une détermination directe des caractéristiques mécaniques de l'enrobé non classique au moyen du 2PB-TR n'est pas possible non plus. Le 2PB-TR s'exécute dans une gamme de température de -20°C et 30°C.

Base de données - Matériaux

Type de matériaux : **Enrobés bitumineux**

Ajouter Supprimer

Modifier Sélectionner un matériau pour accéder aux boutons

Copier

Couche d'usure

Dénomination	% Liant	% Vides	Pénétration (1/10mm)	Temp. A&B (°C)	Non classique
SMA - C2/6 (50/85-50)	6.70	5.00	60.00	50.00	*
SMA - C2/6 (50/85-65)	6.70	5.00	60.00	50.00	*
SMA - C2/6 (50/85-75)	6.70	5.00	65.00	47.00	*

Couche de base

Dénomination	% Liant	% Vides	Pénétration (1/10mm)	Temp. A&B (°C)	Non classique
BB - 3A	4.50	5.00	60.00	50.00	
BB - 3B	4.70	5.00	60.00	50.00	

Quitter

2.4. Le climat

Le climat a une influence sur le dimensionnement des revêtements en béton de ciment et des revêtements bitumineux. Pour les premiers, la différence de température entre la surface et la base du revêtement induit des contraintes thermiques. Pour les seconds, la variation des températures influence le module d'élasticité des enrobés bitumineux.

Enfin, chaque structure doit faire l'objet d'un dimensionnement au gel de manière à ce que la profondeur de pénétration du gel soit inférieure à l'épaisseur des matériaux non gélifs.

2.4.1. Influence du gradient thermique sur les contraintes dans une dalle en béton de ciment

La température au sein des dalles de revêtement en béton de ciment, et dans une moindre mesure dans les fondations (liées), varie. Cette variation, exprimée par un gradient thermique ($^{\circ}\text{C}/\text{mm}$), induit des déformations de dalles qui provoquent des contraintes qualifiées de thermiques.

Les contraintes thermiques sont calculées dans DimMET à l'aide d'une généralisation du modèle de Bradbury, adapté à une dalle rectangulaire. Bradbury assimile la dalle en béton soumise à un gradient thermique à deux poutres perpendiculaires. Il en résulte que:

$$w(x, y) = w(x) + w(y)$$

Relation dans laquelle w exprime la déflexion suivant une direction donnée.

Les contraintes sont calculées dans le sens transversal lorsque la largeur de la dalle est supérieure à sa longueur et inversement, les contraintes sont calculées dans le sens longitudinal lorsque la longueur est supérieure à la largeur.

Un élément de dalle est délimité transversalement par un bord ou un joint longitudinal et longitudinalement par un joint transversal ou une fissure (cas des bétons armés continus).

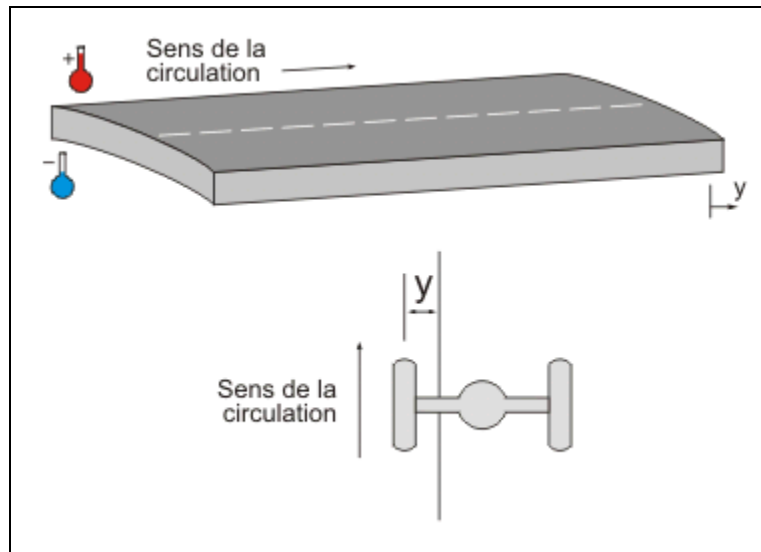
Ainsi, pour le béton armé continu, les contraintes sont toujours calculées dans le sens transversal car longitudinalement, l'interdistance entre les fissures est de l'ordre de 1,5 m tandis que la largeur est de 3,5 à 4,5 m (cf. RW99).

Pour les dalles goujonnées, les contraintes sont toujours calculées dans le sens longitudinal car la longueur de la dalle, de 5 m (cf. RW99), est dans tous les cas supérieure à la largeur.

Dans le cas des dalles non goujonnées, la longueur de la dalle étant fixée à 4 m (cf. RW99), les contraintes sont calculées dans le sens longitudinal si la largeur est inférieure à 4 m et dans le sens transversal si la largeur est supérieure à 4 m.

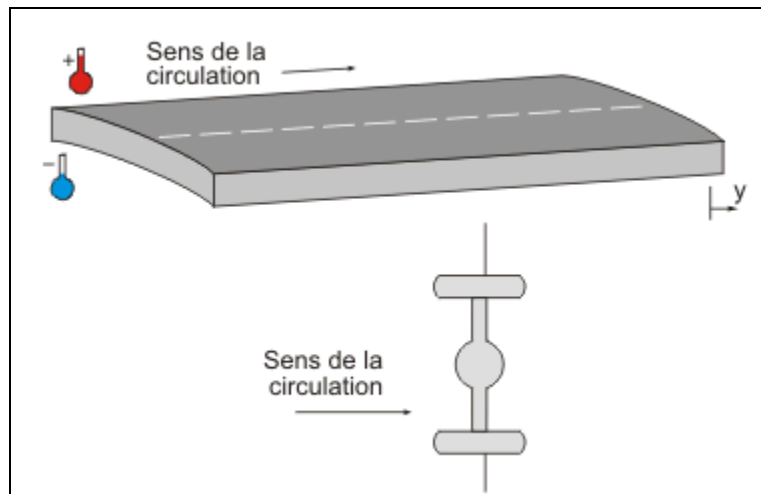
La recherche de la contrainte maximale nécessite la localisation (y) de l'essieu par rapport à l'axe de la dalle (suivant la plus grande longueur).

Si la largeur de la dalle est supérieure à sa longueur, pour un essieu de 2m de large roulant, par hypothèse, à 0,3 m du bord:



$$y = 2,3 - \frac{L}{2} \text{ (en mm)}$$

Si la longueur de la dalle est supérieure à sa largeur:

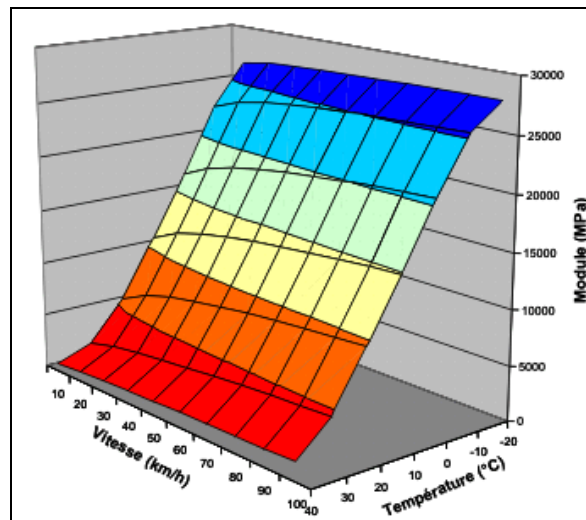


$$y = 0$$

2.4.2. Influence de la température sur les contraintes dans un enrobé bitumineux

Dans le cas des revêtements bitumineux, la température moyenne mensuelle est prise en compte dans la détermination du module d'élasticité des couches bitumineuses. Le calcul de la température de l'enrobé se fait selon le modèle de C. De Backer, [Les températures dans les structures routières mesurées expérimentales - Méthode prévisionnelle. Rapport de recherche 180/CDB, Centre de recherches routières, 1979].

A la figure suivante, un exemple de courbe donnant le module d'élasticité d'un enrobé en fonction de la température et de la fréquence d'application de la charge est présenté:



2.4.3 Dimensionnement au gel

La méthode du dimensionnement au gel est basée sur le [Code de bonne pratique pour le dimensionnement des chaussées à revêtement hydrocarboné, Recommandations R 49/83, Centre de Recherches routières, 1983].

La profondeur de pénétration du gel est déterminée sur base de l'indice de gel de la région considérée suivant la relation:

$$Z = 50 \cdot \sqrt{J}$$

où Z est la profondeur de pénétration du gel (mm) et J est l'indice de gel de la région considérée ($^{\circ}\text{C jours}$).

L'épaisseur des matériaux non gélifs est donnée par la relation suivante:

$$D = a \cdot Z$$

où D est l'épaisseur des matériaux non gélifs (mm) et a un coefficient donné au tableau suivant:

	Valeur du coefficient a			
Situation	Enrobé: $D < Z$	Enrobé: nappe phréatique haute	Béton: $D < Z$	Béton: nappe phréatique haute
Sol non gélif	0	0	0	0
Géivité moyenne	0,72	0,80	0,60	0,70
Forte géivité	0,90	1	0,80	0,90

Exemple de dimensionnement au gel

The screenshot shows a software window titled "Dimensionnement au gel". It displays the following information:

- Epaisseur prévue pour la structure (en mm) =** 450
- Epaisseur nécessaire des matériaux non gélifs (en mm) =** 608
- Pour information : Profondeur de gel (en mm) =** 765

Below this, three solutions are listed:

- Solution 1** Nouvelle épaisseur de la sous-fondation en mm: 430
- Solution 2** Remplacement du sol gélif sur une épaisseur de (mm): 200
- Solution 3** Traiter le sol gélif aux liants hydrauliques sur une épaisseur de (mm): 200

An "OK" button is located at the bottom center of the window.

Définition de l'indice de gel: [L'environnement climatique de la route, R. Van Ganse, Publication F 36/81, Centre de Recherches routières, 1981]

On appelle indice de gel d'une période froide, la différence des nombres de degrés-jours correspondant au sommet et au point le plus bas d'une courbe des degrés-jours égal à la température moyenne en °C prise avec son signe.

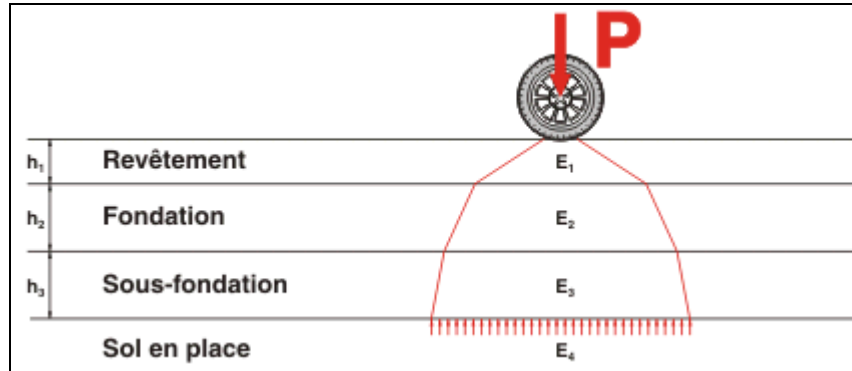
Exemple:

Jour	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Température moyenne (°C)	+1	+1	-2	-4	-5	-8	-6	-1	+2	+2
°C-jours cumulés (°C)	+1	+2	0	-4	-9	-17	-23	-24	-22	-20

$$J = +2 - (-24) = 26$$

3. Méthodes de dimensionnement

La répartition d'une charge dans une structure routière est représentée à la figure suivante:



Le dimensionnement structural d'une chaussée consiste à calculer les valeurs des contraintes et déformations à la base des différentes couches et de les introduire dans les lois de fatigue correspondantes de manière à obtenir le nombre maximum d'application de charges définies avant rupture des matériaux (liés).

DimMET fait appel aux modèles de calcul suivants:

- Pour les structures rigides, les modèles de *Westergaard* et de *Pasternak* (cf. 3.2 [Structure rigide](#))
- Pour les structures semi-rigides et souples, le modèle multicouche de *Burmister* (cf. 3.3 [Structure semi-rigides et souples](#))

3.1. Conditions aux limites propres à toutes les structures

- En ce qui concerne les charges:
On fait l'hypothèse que la charge d'une roue est répartie uniformément sur une surface circulaire.
- En ce qui concerne la structure des chaussées:
 - On fait l'hypothèse que les couches successives restent en contact dans le sens vertical. Les déflexions, les contraintes verticales et les contraintes de cisaillement sont égales aux interfaces entre les couches.
 - On admet que dans le plan horizontal, les couches puissent se déplacer les unes par rapport aux autres. L'adhérence parfaite (déplacements horizontaux égaux) et le glissement parfait (contraintes de cisaillement nulles) constituent les cas extrêmes.
 - Les adhérences, en général parfaites au moment de la construction, se détériorent avec le temps.
Dans DimMET, on fait l'hypothèse que cette détérioration se fait par périodes de 10 ans. Les adhérences correspondant aux couches en contact

sont données dans la base de données. Les valeurs données par défaut se trouvent à la figure suivante:

The screenshot shows a software window titled "Base de données - Adhérence". It contains two main sections. The top section, "Modèles d'adhérence :", has a sub-section "Valeurs par défaut" which is currently empty. To the right of this section are five buttons: "Ajouter", "Supprimer", "Modifier", "Copier", and "Sortir". The bottom section, "Valeurs d'adhérence :", contains a table with adhesion values for different material combinations and age ranges.

Type d'adhérence	0-10 ans	10-20 ans	20-30 ans	30-... ans
béton - enrobé bitumineux	1	0,66	0,33	0,1
enrobé bitumineux - béton maigre	0,5	0,1	0,1	0,1
béton - béton maigre	0,1	0,1	0,1	0,1

- En ce qui concerne les fondations liées hydrauliquement (spécialement le béton maigre):
Le calcul et l'expérience montrent que les fondations liées hydrauliquement se fissurent avant que le revêtement, en enrobé bitumineux ou en béton de ciment, ne montre des signes de fatigue. DimMET attribue dès lors à la fondation fissurée un module d'élasticité réduit, que l'on peut retrouver dans la base de données.

3.2. Structure rigide

Le calcul des dalles en béton est basé sur la théorie de la résistance des matériaux dans les hypothèses suivantes:

1. Géométrie:
Les dalles sont considérées comme des plaques minces, ce qui signifie que la longueur et la largeur de la dalle sont grandes par rapport à l'épaisseur.
2. Hypothèse de Bernoulli:
Les déflexions à la surface et à la base des dalles sont les mêmes.
3. Les matériaux utilisés sont homogènes, isotropes et suivent une loi de comportement linéaire.

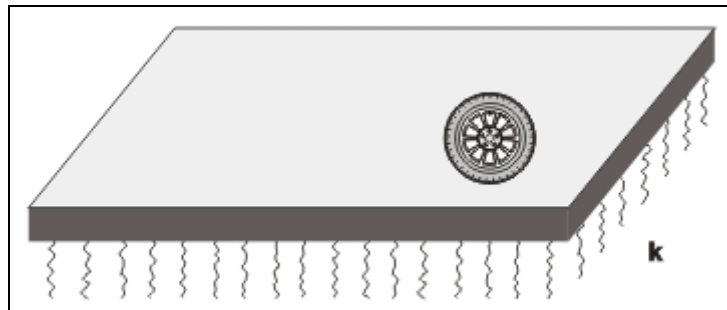
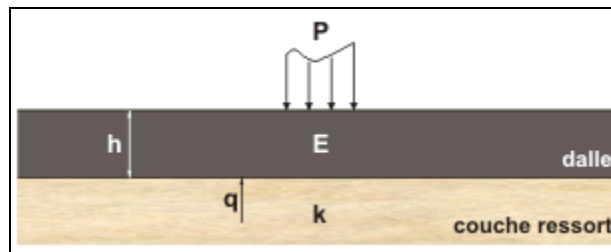
3.2.1. Modèle de Westergaard

Le Modèle original de Westergaard est un modèle bicouche, à c'est-à-dire, une dalle sur le sol.

Le sol est modélisé par une série de ressorts verticaux sans connexions horizontales (fondation de Winkler). Il en résulte que la déflexion à la surface du sol est proportionnelle à la contrainte verticale appliquée:

$$k = \frac{q}{w}$$

où w est la déflexion (mm), q la contrainte verticale (N/mm^2) et k la rigidité du sol (N/mm^3).



La dalle est soumise à une charge p répartie en surface et à une contrainte de réaction q du sol. L'équation d'équilibre vertical s'écrit:

$$\nabla^4 w + \frac{q}{D} = \frac{p}{D}$$

et appliquant l'hypothèse de Winkler:

$$\nabla^4 w + \frac{k w}{D} = \frac{p}{D}$$

où D est la rigidité de la dalle et est déterminée par:

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)}$$

Le modèle de Westergaard s'applique à des dalles d'étendue infinie ou à des dalles finies (avec bords et joints). Le transfert des efforts tranchants aux joints des dalles est déterminé par la relation suivante:

$$T = \gamma \cdot T_{\infty}$$

où T est l'effort tranchant résultant (N), γ le coefficient de transfert d'effort au joint et T_{∞} l'effort tranchant dans une dalle sans joint (N).

Le coefficient adopté pour le transfert de charge dépend du type de dalles:

- Béton armé continu: $\gamma = 0,8$
- Dalles goujonnées: $\gamma = 0,5$
- Dalles non goujonnées: $\gamma = 0,2$

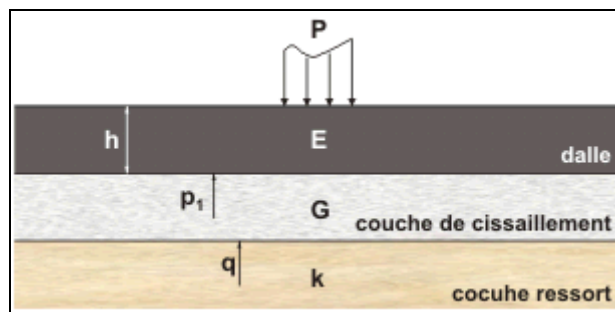
3.2.2. Modèle de Pasternak

Le modèle de Pasternak tient compte de la résistance au cisaillement du sol.

Pasternak fait l'hypothèse que l'effort tranchant est proportionnel à la dérivée de la déflexion:

$$T = G \frac{dw}{dx}$$

où G (N/mm) est le module de Pasternak.



Pour plus de clarté, le sol est subdivisé en une couche ne reprenant que le cisaillement et une couche ne reprenant que les efforts verticaux.

L'équation d'équilibre vertical s'écrit:

$$\nabla^4 w - \frac{G}{D} \nabla^2 w + \frac{k w}{D} = \frac{p}{D}$$

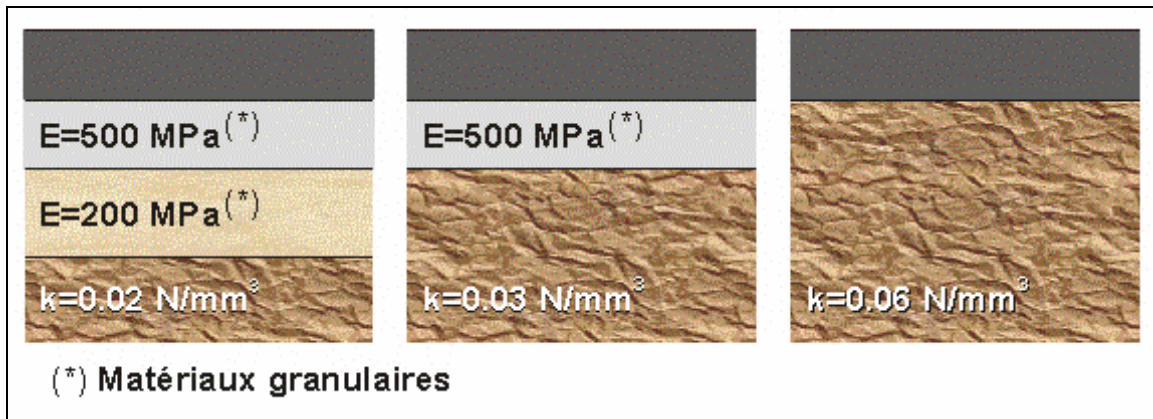
Des recherches menées à l'Université de Singapour on conduit à une relation liant le module G au k de Westergaard (celle-ci doit être considérée avec prudence car elle résulte d'observations limitées en nombre et, de plus, dépend des unités utilisées):

$$G^{(N/mm)} = 350000 \cdot k^{(N/mm^3)}$$

3.2.3. Portance équivalente des couches non liées

Dans la pratique, une structure rigide ne se limite pas à une dalle posée sur le sol, comme dans le [modèle de Westergaard](#). Elle se compose en général d'un revêtement en béton de ciment, éventuellement d'une couche intermédiaire en enrobé bitumineux, d'une fondation en béton maigre reposant sur plusieurs couches granulaires.

Ces couches granulaires peuvent être converties en une couche unique avec un module k équivalent [Mc Cullough, 1981], comme par exemple:



La portance équivalente des couches granulaires est déterminée, dans la fenêtre de calcul, en cliquant sur l'onglet "Portance équivalente (N/mm³)".

Fondation	
Type	Matériau granulaire Type III
h(mm)	200
Sous-Fondation	
Type	Type III
h(mm)	200
Sol	
Type	Argile
Portance équivalente (N/mm²)	
0.06	

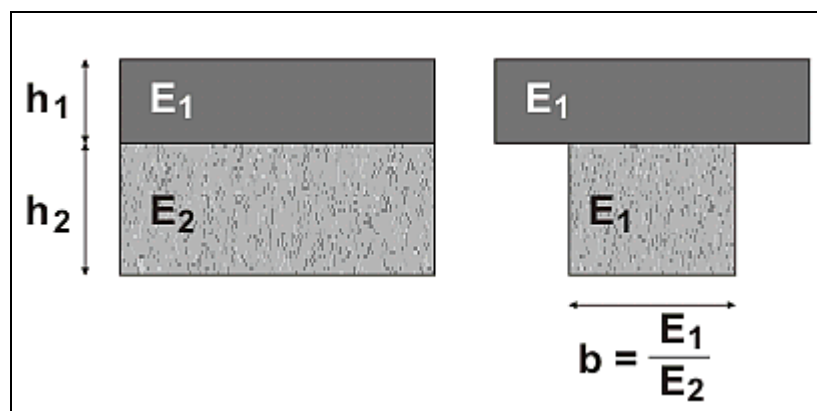
3.2.4. Rigidité équivalente des couches liées

Les couches liées peuvent être converties en une seule couche de rigidité équivalente D_{eq} , dont la valeur dépend de l'adhérence entre les couches.

En cas de glissement parfait, la rigidité équivalente est égale à la somme des rigidités des couches:

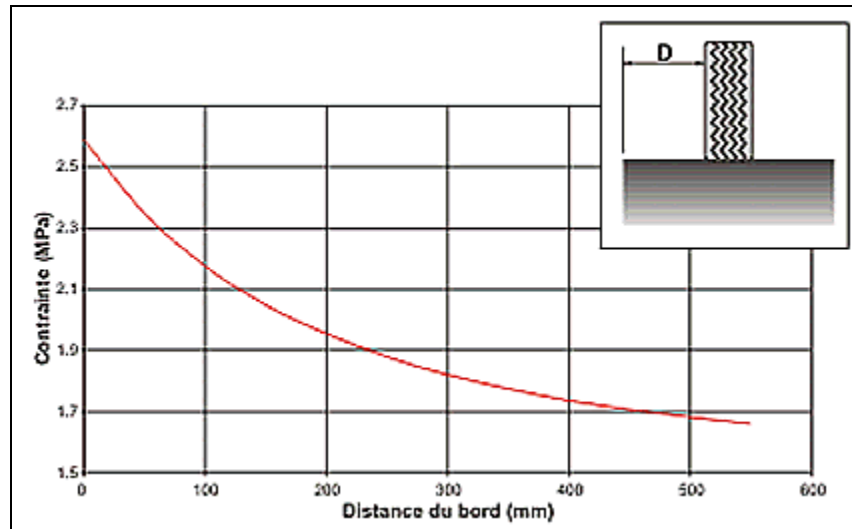
$$D_{eq} = \frac{E_{eq} h^3}{12(1 - \mu^2)} = \frac{E_1 h_1^3}{12(1 - \mu_1^2)} + \frac{E_2 h_2^3}{12(1 - \mu_2^2)}$$

En cas d'adhérence parfaite entre les couches, la section unitaire de la structure est transformée en une section en T dont la rigidité équivalente ($E_1 I_{12}$) est donnée par le produit du module de la couche supérieure par le moment d'inertie de la section en T.



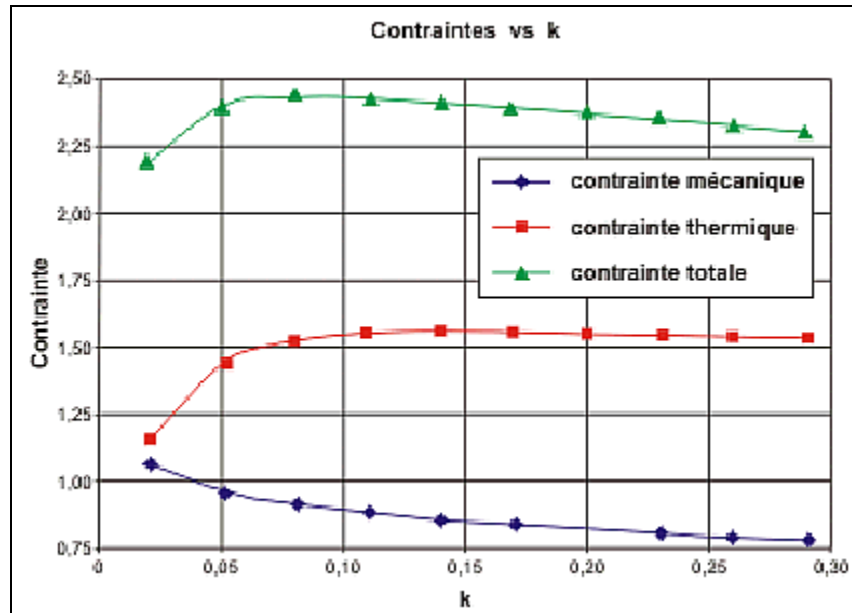
3.2.5. Contraintes dans la dalle

Les modèles de Westergaard et de Pasternak permettent de déterminer la déflexion verticale et la contrainte de flexion à la base de la dalle en n'importe quel point de celle-ci. La contrainte maximale se situe en bord de dalle quand la charge se trouve également en bord de dalle.



La surlargeur nécessaire est calculée pour que la contrainte en bord de dalle soit inférieure ou égale à la contrainte au joint.

La figure ci-après reprend la variation des contraintes thermiques et mécaniques, à la base d'une dalle en béton sur sol, en fonction de l'évolution de la portance k . Les contraintes mécaniques diminuent lorsque la portance du sol augmente. Les contraintes thermiques augmentent avec l'augmentation de k puis se stabilisent. Ce phénomène est dû au fait que plus le sol est portant, plus le moment, qui s'oppose à la courbure de la dalle, doit être important. Pour des gradients thermiques extrêmes, la somme des deux contraintes amène à une augmentation de la durée de vie de la structure avec l'augmentation de k dans un premier temps, pour diminuer par la suite.



3.2.6. Loi de fatigue du béton

La loi de fatigue calcule le nombre N d'applications d'une charge déterminée jusqu'à la rupture du matériau.

Loi de fatigue adoptée pour le béton:

$$\log N = 15 \left[\frac{1 - \frac{\sigma_{fl} + \sigma_{th}}{\sigma_{br}}}{1 - 0,75 \frac{\sigma_{th}}{\sigma_{br}}} \right]$$

Loi de fatigue adoptée pour le béton maigre:

$$\log N = 14 \left[\frac{1 - \frac{\sigma_{fl} + \sigma_{th}}{\sigma_{br}}}{1 - 0,75 \frac{\sigma_{th}}{\sigma_{br}}} \right]$$

Avec:

σ_{fl} : contrainte de flexion (N/mm^2)

σ_{th} : contrainte thermique (N/mm^2)

σ_{br} : contrainte de rupture (N/mm^2)

La loi de fatigue est appliquée pour toutes les charges d'essieux P_i de manière à obtenir un nombre N_i d'applications de charge P_i . La combinaison des N_i se fait par application de la Loi de Miner:

$$\frac{f_1 \cdot N}{N_1} + \frac{f_2 \cdot N}{N_2} + \dots + \frac{f_i \cdot N}{N_i} + \dots + \frac{f_n \cdot N}{N_n} = 1$$

D'où:

$$N = \frac{1}{\frac{f_1}{N_1} + \frac{f_2}{N_2} + \dots + \frac{f_i}{N_i} + \dots + \frac{f_n}{N_n}}$$

où f_i est la fréquence des charges P_i .

3.2.7. Coefficient de calage

Ce coefficient est destiné à ajuster, le cas échéant, les résultats du modèle de calcul au comportement des chaussées rigides observé en situation réelle.

Actuellement, l'expérience montre que le coefficient de calage peut être pris égal à **1,1** pour tous les types de chaussées rigides.

3.3. Structures souple et semi-rigide

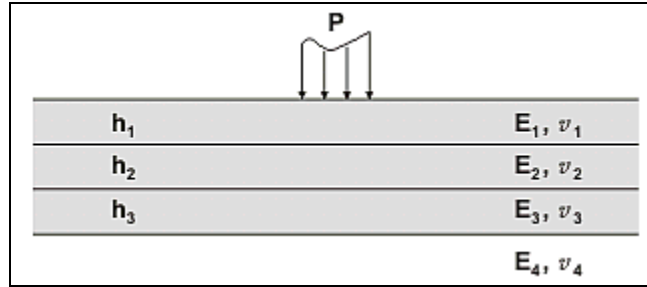
Le calcul des structures souples (revêtement bitumineux sur fondation non liée) et semi-rigides (revêtement bitumineux sur fondation liée) est basé sur la théorie de l'élasticité. Les hypothèses sont les suivantes:

1. Géométrie:
Les couches sont infinies dans le sens horizontal.
2. Les matériaux utilisés sont homogènes, isotropes et suivent une loi de comportement linéaire.
3. Le sol peut être anisotrope si le module vertical, E_v , diffère du module horizontal, E_h .
En général, $E_v > E_h$.

3.3.1 Modèle multicouche de Burmister

Le modèle multicouche calcule les contraintes, les déplacements et les déformations en chaque point de la structure.

Chaque couche est caractérisée par un module d'Young, un coefficient de Poisson et éventuellement, pour le sol, un degré d'anisotropie.



Les conditions d'interface doivent être définies; les cas extrêmes sont:

- Adhérence parfaite:
les couches restent en contact entre elles. Il y a égalité des déplacements à l'interface.
- Glissement parfait:
les couches peuvent glisser librement les unes par rapport aux autres. Les contraintes de cisaillement sont nulles à l'interface.

3.3.2. Loi de fatigue de l'enrobé bitumineux

La loi de fatigue calcule le nombre N d'applications d'une charge déterminée jusqu'à la rupture du matériau.

Loi de fatigue adoptée:

$$N = \left(\frac{0,0016}{\varepsilon_x} \right)^{4,76}$$

Avec ε : la déformation à la base de la couche d'enrobé.

Le nombre N est multiplié par un facteur 7. Ce facteur tient compte de l'effet bénéfique du temps de repos entre charges successives sur la résistance à la fatigue des enrobés bitumineux.

La loi de fatigue est appliquée pour toutes les charges d'essieux P_i de manière à obtenir un nombre N_i d'applications de charge P_i . La combinaison des N_i se fait par application de la Loi de Miner:

$$\frac{f_1 \cdot N}{N_1} + \frac{f_2 \cdot N}{N_2} + \dots + \frac{f_i \cdot N}{N_i} + \dots + \frac{f_n \cdot N}{N_n} = 1$$

D'où:

$$N = \frac{1}{\frac{f_1}{N_1} + \frac{f_2}{N_2} + \dots + \frac{f_i}{N_i} + \dots + \frac{f_n}{N_n}}$$

où f_i est la fréquence des charges P_i .

3.3.3. Loi de déformation permanente (orniérage)

L'orniérage primaire se produit dans les couches bitumineuses en raison de la déformation permanente des matériaux bitumineux.

La déformation plastique permanente est exprimée par la relation de L.Francken, [Permanent Deformation Law of Bituminous Road Mixes in Repeated Triaxial Compression. Proceedings of the Fourth International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements. The University of Michigan, Ann Arbor, Vol. II, pp. 486-496, August 1977; Francken L., Loi de déformation permanente des bétons asphaltiques - influence de composition et rôle des constituants. Bituminfo 43/1982]:

$$\varepsilon_p = \frac{|\sigma_v - \sigma_h|}{2 \cdot E_p} \cdot t^{0,25}$$

où

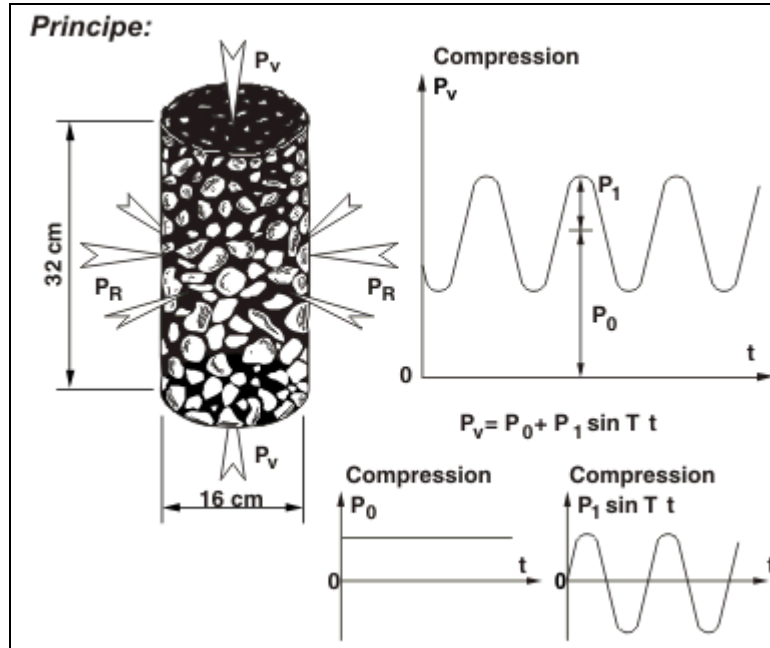
σ_v, σ_h = contrainte verticale et horizontale (N/mm^2)

t = temps ($ksec$)

E_p = module de déformation permanente (N/mm^2)

Cette loi de déformation a été déduite d'essais triaxiaux dynamiques sur des éprouvettes cylindriques. Dans le cas d'un essai triaxial, le déviateur de contraintes $|\sigma_v - \sigma_h|$ est imposé.

Principe de l'essai triaxial dynamique



L'équation de la déformation permanente sous les charges du trafic peut être reformulée comme suit:

$$\varepsilon_p = \frac{|\sigma_v - \sigma_h|}{2 \cdot E_p} \cdot \left[\frac{N}{450 \cdot V} \right]^{0.25}$$

où

V = vitesse des véhicules (km/h)

N = nombre de véhicules

On admet que la fréquence de chargement (Hz) peut être exprimée en fonction de la vitesse (km/h) de la circulation par la relation :

$$f = 0,45 \cdot v$$

Pour le calcul de l'orniérage, la vitesse du trafic doit être introduite dans la table *paramètres* de la base de données. Cette vitesse peut être différente de celle prise en compte pour le calcul de dimensionnement. La valeur adoptée par défaut est égale à 60 km/h.

La déformation permanente diffère à chaque niveau des couches bitumineuses.

L'orniérage est calculé séparément et représenté graphiquement par couche. Le tableau reprend l'histogramme retenu pour les quatre plages de températures.

T (°C)	%
20	10
30	20
40	60
0	10

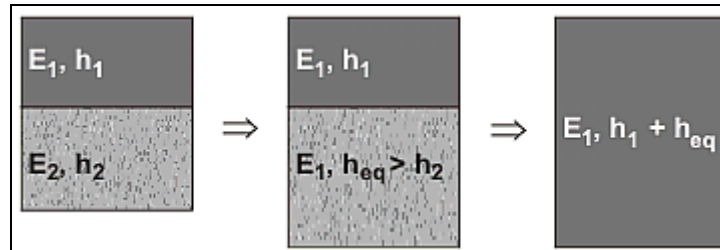
3.3.4. Rigidité équivalente de couches d'enrobés bitumineux

Lorsque le nombre de couches d'enrobés bitumineux est supérieur à 4, il est possible de ramener ce nombre à 4 par la relation d'équivalence entre les épaisseurs et les modules d'élasticité des couches.

Cette équivalence est obtenue en égalant les rigidités respectives des couches. Cette relation suppose une adhérence parfaite entre les couches. La relation est la suivante :

$$h_{eq} = h_2 \sqrt[3]{\frac{E_2}{E_1}}$$

Exemple dans lequel $E_2 > E_1$:



4. Calcul inverse

Le calcul inverse permet d'estimer le module élastique des différentes couches de la structure d'une chaussée sur base:

- de la mesure du bassin de déflexion de la structure sous l'action d'une charge donnée (appareils de mesure: [Déflectomètre à masse tombante](#) ou [Curviamètre](#))
 - de l'épaisseur des différentes couches
 - du coefficient de Poisson des différentes couches
- Les valeurs reprises dans le tableau sont données à titre indicatif:

Matériau	Coefficient de Poisson
Béton de ciment	0.25
Enrobé bitumineux	0.35
Béton maigre non fissuré	0.25
Béton sec compacté	0.25
Béton maigre fissuré	0.30
Béton sec compacté fissuré	0.30
Empierrement stabilisé	0.30
Matériaux granulaires	0.50
Sol	0.50

- du module élastique estimé des différentes couches
- Les valeurs reprises dans le tableau sont données à titre indicatif:

Matériau	Module (MPa)
Béton de ciment	30 000 - 40 000
Enrobé bitumineux	5 000 - 15 000
Béton maigre non fissuré	15 000 - 25 000
Béton maigre fissuré	3 000 - 7 000
Béton sec compacté	25 000 - 35 000
Béton sec compacté fissuré	7 000 - 10 000
Empierrement stabilisé	8 000 - 12 000
Empierrement stabilisé dégradé	800 - 3 000
Empierrement	500 - 800
Sable-ciment	3 000 - 5 000
Sous-fondation granulaire	200 - 300
Sol	10 - 300

- des adhérences estimées ($0 < Adh < 1$) entre les différentes couches.
Les valeurs reprises dans le tableau sont adoptées par défaut:

Base de données - Adhérence

Modèles d'adhérence :

Valeurs par défaut

Ajouter Supprimer

Modifier

Copier Sortir

Valeurs d'adhérence :

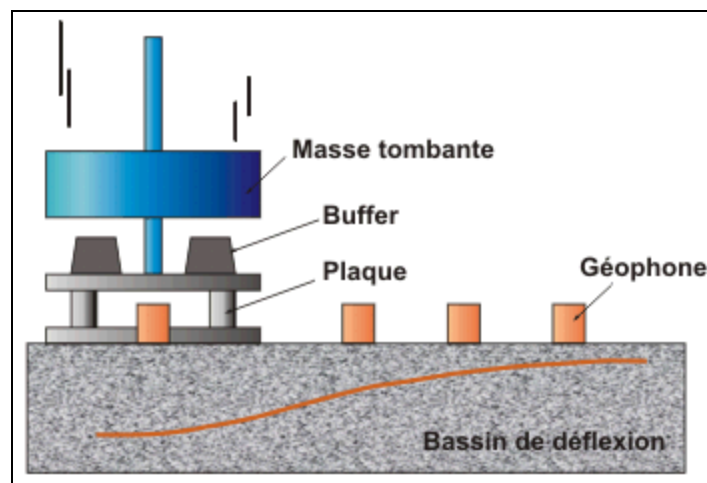
Type d'adhérence	0-10 ans	10-20 ans	20-30 ans	30-... ans
béton - enrobé bitumineux	1	0,66	0,33	0,1
enrobé bitumineux - béton maigre	0,5	0,1	0,1	0,1
béton - béton maigre	0,1	0,1	0,1	0,1
enrobé bitumineux - enrobé bitumineux	1	1	1	1
enrobé bitumineux - béton	1	1	0,5	0,5
enrobé bitumineux - fondation non liée	0,1	0,1	0,1	0,1
béton - fondation non liée	0,1	0,1	0,1	0,1
fondation non liée - fondation non liée	1	1	1	1
fondation liée - fondation non liée	0,1	0,1	0,1	0,1
béton - béton	0,1	0,1	0,1	0,1

Le calcul inverse consiste à faire coïncider le bassin de déflexion calculé; au bassin de déflexion mesuré.

4.1. Le déflectomètre à masse tombante

Le déflectomètre à masse tombante ou Falling Weight Deflectometer (FWD) est un appareil de mesure de déflexion dont les caractéristiques principales sont:

- 9 géophones pour la mesure des déflexions disposés généralement à 0, 300, 600, 900, 1200, 1500, 1800, 2100 et 2400 mm de l'application de la charge
- Charge maximale de 150 KN (pour un FWD standard)
- Convient pour tous types de structures (rigides, semi-rigides et souples)
- Mesure discontinue (1 point tous les 100m pour le grand rendement)

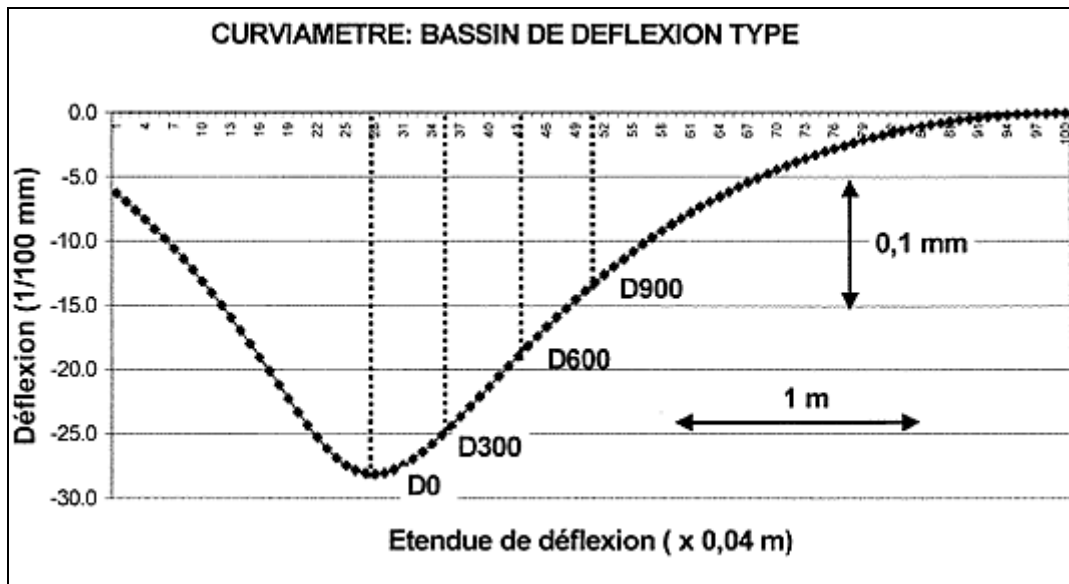


4.2. Le Curviamètre

Le Curviamètre est un appareil de mesure de déflexion dont les caractéristiques principales sont:

- 3 géophones pour la mesure des déflexions disposés sur la chaîne permettant la mesure de 100 points entre 1m avant à 3m après la charge
- Charge de roue jumelée de 50 ou 65 kN
- Convient pour les structure semi-rigides et souples (le seuil de précision ne permet pas de mesure sur les structures rigides)
- Mesure continue (1 mesure tous les 5m)
- Vitesse de 18km/h (5m/s)





5. Méthodes de renforcement

Le renforcement a pour objectif principal de remédier à un ou plusieurs défauts de la structure et de prolonger sa durée de vie soit par apport des couches supplémentaires (rechargement ou *overlay*) soit par remplacement des couches abîmées par de nouvelles (reconstruction partielle ou *inlay*). Le renforcement est donc appelé à augmenter la portance de la structure de la chaussée.

Le logiciel DimMET considère les cas suivants:

- Un overlay en béton de ciment sur un revêtement en béton de ciment existant ou sur un revêtement bitumineux existant (cf. 5.1. Overlay en béton);
- Un inlay en béton de ciment remplaçant la totalité d'un revêtement en béton de ciment existant ou la totalité ou une partie d'un revêtement bitumineux existant (cf. 5.2. Inlay en béton);
- Un overlay en enrobé bitumineux sur un revêtement en béton de ciment existant ou sur un revêtement bitumineux existant (cf. 5.3. Overlay en enrobé bitumineux);
- Un inlay en enrobé bitumineux remplaçant la totalité ou une partie d'un revêtement bitumineux existant (cf. 5.4. Inlay en enrobé bitumineux).

5.1. Overlay en béton

Les overlays en béton sont calculés à l'aide de la théorie multicouche de Burmister (cf.3.3.1 Modèle multicouche de Burmister) pour plusieurs raisons :

- La théorie de Westergaard (cf. 3.2.1 Modèle de Westergaard) nécessite la connaissance de la rigidité du sol, exprimée par k (en N/mm^3). Le calcul inverse estimant le module du sol (E) et le fait qu'il n'existe pas de corrélation entre E et k , il n'est pas possible d'utiliser cette théorie de manière rigoureuse ;
- Il est préférable de réaliser le calcul de renforcement au moyen du même modèle de calcul que celui utilisé pour l'évaluation de la portance, c'est-à-dire le calcul multicouche. En effet, cela permet d'atténuer, voire de supprimer, l'influence d'une mauvaise estimation du module élastique des couches.

Pour tenir compte des effets d'accroissement de la contrainte en bord de dalle (ou au joint) et du gradient thermique, propres aux bétons de ciment, F. Van Cauwelaert a intégré les relations détaillées ci-après.

Prise en compte de la contrainte au joint :

Soit:

σ_{centre} la contrainte au centre de la dalle (calculée par la théorie multicouche);

σ_{joint} la contrainte au joint de dalle;

γ le coefficient de transfert de charge au joint

$$\sigma_{joint} = (2 - \gamma) \sigma_{centre}$$

Prise en compte du gradient thermique :

La contrainte thermique est calculée avec les mêmes relations que pour le dimensionnement des revêtements en béton de ciment. Seul le paramètre k est déterminé autrement.

Soit:

σ_{therm} la contrainte thermique;

k le paramètre entrant dans le calcul de la contrainte thermique;

k doit être tel que

$$\frac{\partial \sigma_{therm}}{\partial k} = 0$$

(recherche du k donnant la contrainte maximale)

On trouve :

$$k = \frac{Eh^3 \pi \sqrt{2}}{6(1 - \mu^2)L}$$

Avec:

E le module dynamique de la dalle en béton ;

h l'épaisseur de la dalle en béton ;

μ le coefficient de Poisson ;

L la longueur de la dalle.

Le logiciel offre les possibilités de renforcement reprises au tableau suivant:

Choix d'un revêtement

Couche existante

☐ Enrobé bitumineux ☒ Béton ☐ Aucune

Veuillez choisir un revêtement :

Béton existant		
Enrobé neuf	Béton neuf	
Béton existant	Béton existant	
Enrobé neuf	Béton neuf	Enrobé neuf
Enrobé neuf	Enrobé neuf	Béton neuf
Béton existant	Béton existant	Béton existant
Enrobé neuf	Enrobé neuf	
Enrobé neuf	Béton neuf	
Enrobé neuf	Enrobé neuf	
Béton existant	Béton existant	

Retour Ok

Pour déterminer la durée de vie résiduelle de la chaussée, il suffit de choisir l'option «Béton existant».

5.2. Inlay en béton

Le mode de calcul d'un inlay en béton est identique à celui d'un overlay en béton (cf. 5.1 Overlay en béton).

Un inlay en béton nécessite l'enlèvement de tout le revêtement en béton de ciment existant. C'est pourquoi, le tableau de choix suivant mentionne pour la couche de revêtement existante: «Aucune».

Remarque: Il est également possible de placer un revêtement en enrobé bitumineux neuf en inlay.

Choix d'un revêtement

Couche existante

☐ Enrobé bitumineux ☐ Béton ☒ Aucune

Veuillez choisir un revêtement :

Enrobé neuf	Béton neuf	
Enrobé neuf	Béton neuf	Enrobé neuf
Enrobé neuf	Enrobé neuf	Béton neuf
Enrobé neuf	Béton neuf	Enrobé neuf
Enrobé neuf	Enrobé neuf	Béton neuf
Enrobé neuf	Enrobé neuf	Enrobé neuf
Enrobé neuf	Béton neuf	Enrobé neuf
Enrobé neuf	Enrobé neuf	Béton neuf
Enrobé neuf	Enrobé neuf	Enrobé neuf
Enrobé neuf	Enrobé neuf	Enrobé neuf

Retour Ok

5.3. Overlay en enrobé bitumineux

Un overlay en béton bitumineux est calculé à l'aide de la théorie multicouche de Burmister décrite au paragraphe 3.3.1 Modèle multicouche de Burmister.

Le module de rigidité d'un enrobé variant en fonction de la température, il est nécessaire d'indiquer la température du revêtement bitumineux existant lors des mesures de portance. Les valeurs des modules du revêtement existant sont alors retrouvées pour chaque température via la méthode empirique suivante:

Pour une vitesse d'application de charge de 60 km/h (vitesse simulée par le FWD et utilisée comme base dans DimMET):

$$Y(t) = \frac{E(20^\circ C)}{E(t)} = 6 \cdot 10^{-8} t^5 + 3 \cdot 10^{-7} t^4 - 2 \cdot 10^{-5} t^3 + 5 \cdot 10^{-4} t^2 + 1,5 \cdot 10^{-2} t + 0,42$$

Soit E_0 , le module obtenu par calcul inverse à partir d'un essai au FWD à une température t_0 .

$$Y(t_0) = \frac{E(20^\circ C)}{E(t_0)} = \frac{E(20^\circ C)}{E_0}$$

De plus:

$$Y(t_{été}) = \frac{E(20^\circ C)}{E(t_{été})}, \quad Y(t_{hiver}) = \frac{E(20^\circ C)}{E(t_{hiver})}, \quad Y(t_{aut / pr}) = \frac{E(20^\circ C)}{E(t_{aut / pr})}$$

Dès lors:

$$E_{été} = \frac{Y(t_0)}{Y(t_{été})} E_0, \quad E_{hiver} = \frac{Y(t_0)}{Y(t_{hiver})} E_0, \quad E_{aut / pr} = \frac{Y(t_0)}{Y(t_{aut / pr})} E_0$$

Dans le cas de mesures au Curviamètre, la vitesse d'application de la charge est de 18 km/h ; ce qui ne correspond ni à celle du FWD, ni à celle prise en compte dans DimMET. Le polynôme du 5^{ème} degré devient:

$$Y'(t) = \frac{E(20^\circ C)}{E'(t)} = 5 \cdot 10^{-8} t^5 + 10^{-6} t^4 - 3 \cdot 10^{-6} t^3 + 10^{-4} t^2 + 1,3 \cdot 10^{-2} t + 0,404$$

Soit E'_0 le module trouvé par calcul inverse sur base des déflexions au Curviamètre à la température t_0 . On a:

$$Y'(t_0) = \frac{E(20^\circ C)}{E'_0}$$

Il faut passer sur la courbe polynomiale utilisée dans DimMET pour trouver les bons modules:

$$E(20^\circ C) = Y'(t_0) \times E'_0$$

Et par conséquent:

$$E_{été} = \frac{1}{Y(t_{été})} E(20^\circ C), \quad E_{hiver} = \frac{1}{Y(t_{hiver})} E(20^\circ C), \quad E_{aut / pr} = \frac{1}{Y(t_{aut / pr})} E(20^\circ C)$$

Le logiciel offre les possibilités de renforcement reprises au tableau suivant:

Choix d'un revêtement

Couche existante

☒ Enrobé bitumineux ☐ Béton ☐ Aucune

Veuillez choisir un revêtement :

Enrobé existant		
Enrobé neuf	Béton neuf	
Enrobé existant	Enrobé existant	
Enrobé neuf	Béton neuf	Enrobé neuf
Enrobé neuf	Enrobé neuf	Béton neuf
Enrobé existant	Enrobé existant	Enrobé existant
Enrobé neuf	Enrobé neuf	
Enrobé neuf	Béton neuf	
Enrobé neuf	Enrobé neuf	
Enrobé existant	Enrobé existant	

Retour Ok

Pour déterminer la durée de vie résiduelle de la chaussée, il suffit de choisir l'option «Enrobé existant».

5.4. Inlay en enrobé bitumineux

La méthode de calcul d'un inlay en enrobé bitumineux est identique à celle utilisée dans le cas d'un overlay en enrobé bitumineux.

Par facilité, le module de rigidité de la partie du revêtement bitumineux existant, encore en place lors de la pose de l'inlay, est pris égal au module de rigidité du revêtement bitumineux entier.

Le logiciel offre les possibilités de renforcement reprises au tableau suivant:

Choix d'un revêtement

Couche existante

☒ Enrobé bitumineux ☐ Béton ☐ Aucune

Veuillez choisir un revêtement :

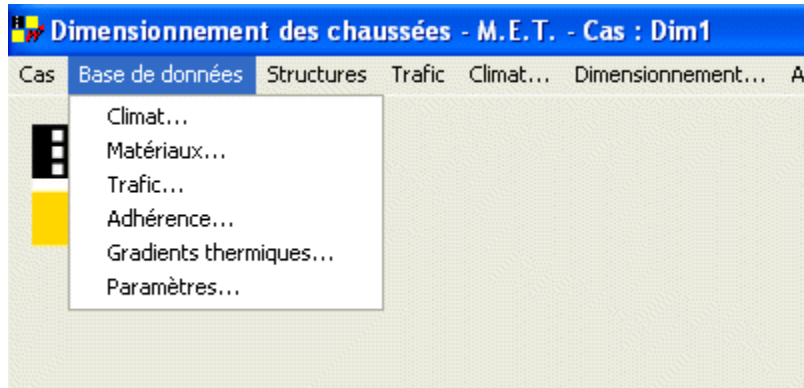
Enrobé existant		
Enrobé neuf	Béton neuf	
Enrobé existant	Enrobé existant	
Enrobé neuf	Béton neuf	Enrobé neuf
Enrobé neuf	Enrobé neuf	Béton neuf
Enrobé existant	Enrobé existant	Enrobé existant
Enrobé neuf	Enrobé neuf	
Enrobé neuf	Béton neuf	
Enrobé neuf	Enrobé neuf	
Enrobé existant	Enrobé existant	

Retour Ok

Pour réaliser un inlay après enlèvement de la totalité du revêtement existant, se référer au 5.2 Inlay en béton.

6. Base de données

La *Base de Données* reprend tous les paramètres du code.



On les retrouve dans les sous-menus suivants:

- Climat...
Contient les températures mensuelles, les rayonnements et l'indice de gel des principales villes de Wallonie.
- Matériaux...
Contient les caractéristiques mécaniques des matériaux de revêtement, de fondation, de sous-fondations et du sol. Ces caractéristiques sont basées sur les exigences du Cahier des charges Type de la Région Wallonne: le [RW99](#).
- Trafic...
Contient les caractéristiques du trafic.
- Adhérence...
Contient les coefficients d'adhérence entre les différentes couches d'une structure.
- Gradients thermiques...
Contient les caractéristiques des gradients thermiques par période et la localisation du calcul des contraintes thermiques.
- Paramètres...
Contient les paramètres auxquels l'utilisateur n'a pas accès.

Il est en outre possible d'ajouter de nouvelles données de températures, matériaux, histogrammes, etc.

Base de données - Matériaux

Type de matériaux : **Enrobés bitumineux**

Appuyer Supprimer

Modifier Sélectionner un matériau pour accéder aux boutons

Copier

Couche d'usure

Dénomination	% Liant	% Vides	Pénétration (1/10mm)	Temp. A&B (°C)	Non classique
BB - 1B	5.90	4.00	60.00	50.00	
BB - 2C	7.90	4.00	42.00	54.00	
BB - 4C	6.20	4.00	60.00	50.00	

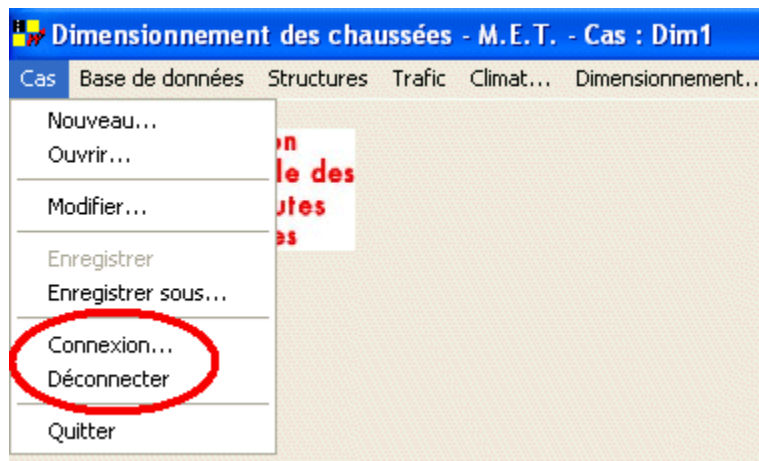
Couche de base

Dénomination	% Liant	% Vides	Pénétration (1/10mm)	Temp. A&B (°C)	Non classique
BB - 3A	4.50	5.00	60.00	50.00	
BB - 3B	4.70	5.00	60.00	50.00	
BB - 3C	4.70	5.00	60.00	50.00	

Retour au menu principal

6.1. Connexion à la table *Paramètres* de la base de données

Grâce à la commande *Connexion...* du menu *Cas*, il est possible d'accéder à la table *Paramètres* de la base de données en écriture (modification ou restauration des valeurs par défaut et sauvegarde). L'introduction d'un mot de passe est nécessaire.



Base de données - Paramètres

Paramètre

Numér	Désignation	Valeur
1	Module de l'enrobé bitumineux (N/mm²)	10000,00
2	Coefficient Poisson béton	0,20
3	Coefficient Poisson Enrobé bitumineux	0,35
4	Coefficient Poisson béton maigre	0,20
5	Coefficient 1 du gel du béton	0,60
6	Coefficient 2 du gel du béton	0,70
7	Coefficient 3 du gel du béton	0,80
8	Coefficient 4 du gel du béton	0,90
9	Coefficient 1 du gel de l'enrobé bitumineux	0,72
10	Coefficient 2 du gel de l'enrobé bitumineux	0,80
11	Coefficient 3 du gel de l'enrobé bitumineux	0,90
12	Coefficient 4 du gel de l'enrobé bitumineux	1,00
13	*****	non défini
14	Nombre d'essieux	4,00
15	Coefficient de la loi de fatigue du béton	15,00

Sauver Valeurs par défaut Retour au menu principal

Lorsque la connexion est active, il est également possible d'avoir accès directement à la base de donnée gérée par Microsoft Access[®].

Dimensionnement des chaussées - M.E.T. - Cas : Dim1

Cas Base de données Structures Trafic Climat... Dimensionnement...

- Climat...
- Matériaux...
- Trafic...
- Adhérence...
- Gradients thermiques...
- Paramètres...
- Ouvrir Base de données...

Attention:

Après avoir effectué les changements dans la base de données, veuillez vous déconnecter.