

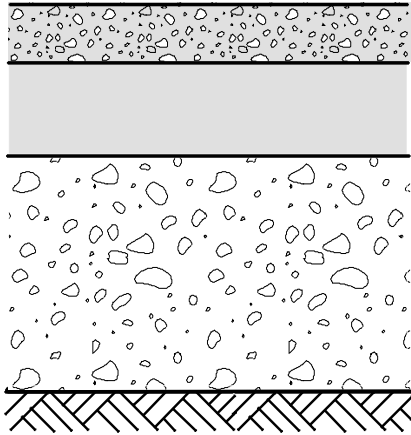
CIVIL-454.07

# DIMENSIONNEMENT DES CHAUSSES ROUTIERES

Base : Chapitre 15.4  
du TGC 25

# Problématique du dimensionnement

## ► Chaussée routière



Couche de roulement en enrobé bitumineux (AC)

Couche de base en enrobé bitumineux (AC T)

Couche de fondation en matériaux granulaires non traités (grave)

Plate-forme

## ► Quels matériaux utiliser ?

## ► Quelles épaisseurs de couches choisir ?

# Dimensionnement de la chaussée

## ► Normes suisses VSS<>

### ► Basées sur les résultats du AASHTO Road Test

❑ *American Association of State Highway and Transportation Officials*

## ► Principes

### ► Dimensionnement à la fatigue

### ► Méthode empirique

### ► Nombre de passages d'un essieu standard ESAL

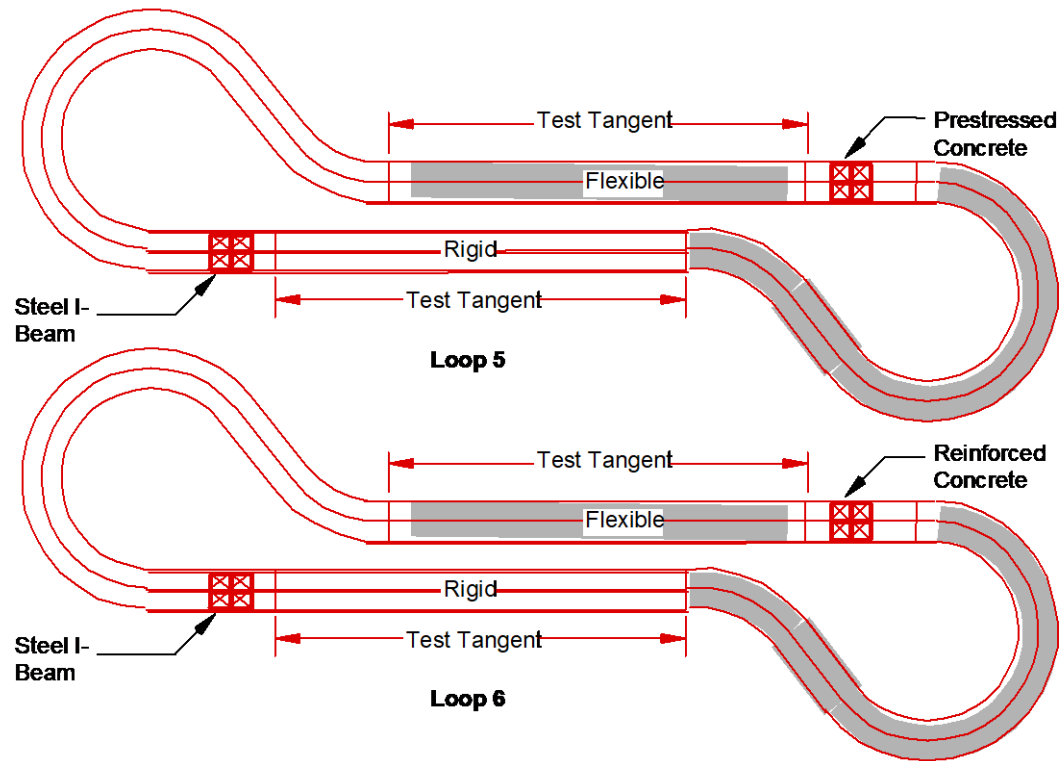
❑ Au-delà, la chaussée n'offre plus les qualités fonctionnelles et structurales pour lesquelles elle est conçue

### ► Durée de vie de 20 ans

# Perte de portance d'une chaussée



# Essai AASHTO



# Dimensionnement de la chaussée

## ► Déterminer pour chaque couche

### ►► Composition

☐ Matériaux

### ►► Épaisseur

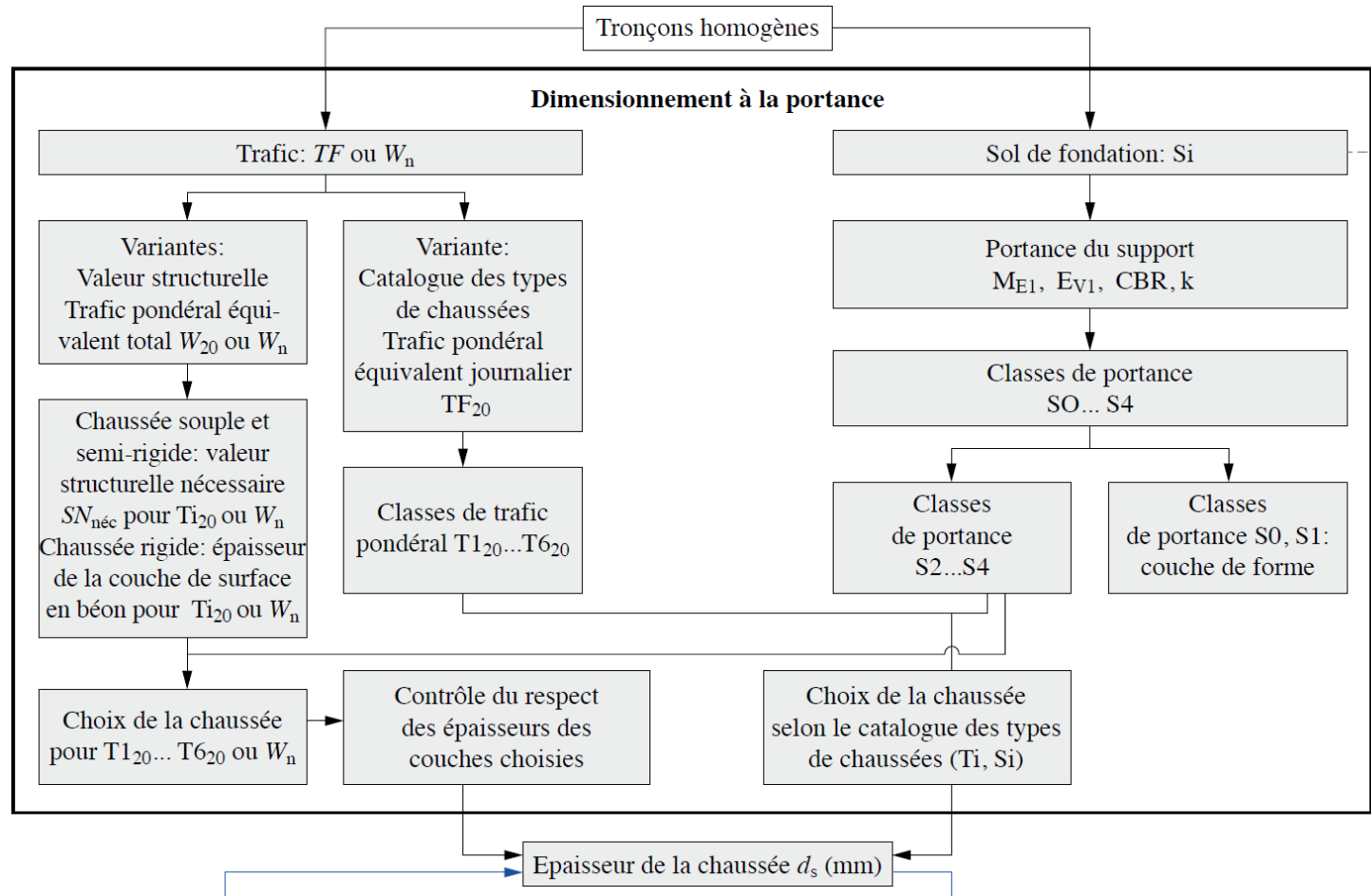
☐ cm

### ►► Ceci pour que la superstructure supporte le trafic pondéral durant **20 ans**



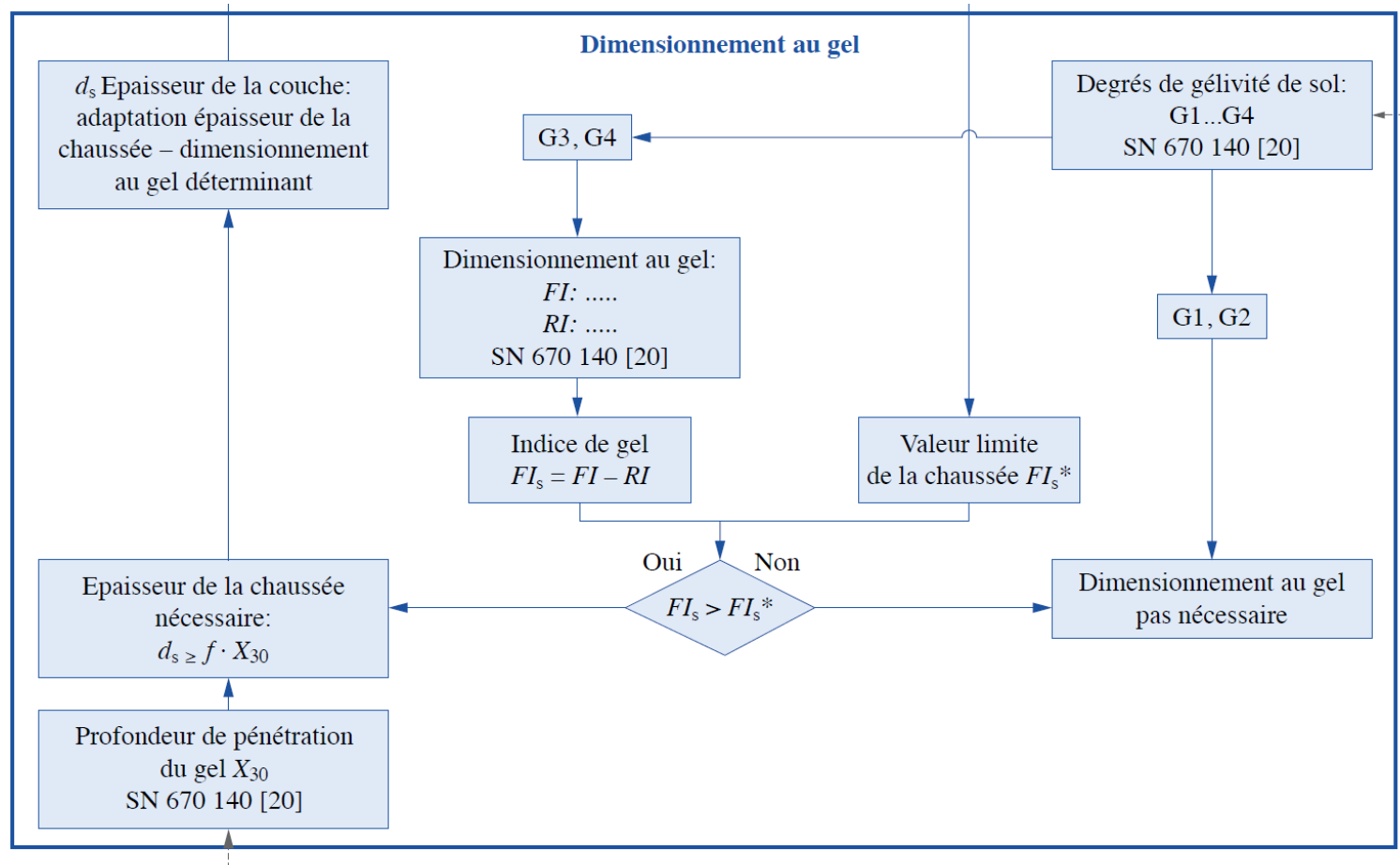
# Procédure de dimensionnement

## ► Dimensionnement à la portance



# Procédure de dimensionnement

## ► Dimensionnement au gel GC 463.11





# Avantages de la méthode

## ► Simplicité

- Rapidité de calcul

- Peu de paramètres nécessaires

## ► Valable pour plusieurs catégories de chaussées

- Nouvelle chaussée

  - ☐ Chaussée type → Catalogue / Chaussée modifiée

- Chaussée existante

  - ☐ Prise en compte de l'état des couches

  - ☐ Estimation de la durée de vie résiduelle

  - ☐ Renforcement (rechargement / renouvellement partiel)

# Limites de la méthode

- ▶ **Calculs parfois trop simplifiés**

- ▶▶ Difficultés d'effectuer certaines études paramétriques

- ▶ **Pas de considération de ...**

- ▶▶ Caractéristiques mécaniques précises du sol

- ▶▶ Influences climatiques

- ☐ Autres que le gel

- ▶▶ Caractéristiques des matériaux (formulation, âge, etc.)

- ▶▶ Interactions entre les couches négligées

# Notion de tronçon homogène

- ▶ **Tronçon comportant des caractéristiques identiques**
  - ▶ Trafic pondéral
  - ▶ Portance du sol de fondation
  - ▶ Conditions climatiques (gel)
  - ▶ Type de chaussée
- ▶ **Dimensions**
  - ▶ Éviter le tronçonnement en entités trop petites
    - ❑ Valeurs représentatives avec un écart type acceptable
  - ▶ Stabilité temporelle

# Terminologie

## ▶ **Trafic lourd**

- ▶ Supérieur à 3,5 tonnes
- ▶ Plus long que 6 m

## ▶ **Classe de véhicules lourds**

- ▶ Groupe de PL
- ▶ Configuration d'essieux

## ▶ **Catégorie de poids lourds**

- ▶ Regroupement de diverses classes de véhicules lourds

# Terminologie

## ► Essieu

- Arbre placé transversalement sous la caisse et supportant les roues situées à ses extrémités
- Simple ou moteur
- Simple / Tandem / Tridem



# Terminologie

## ► Essieu équivalent

### ►► Essieu de référence de l'essai AAHSTO

- Base de nombreuses normes de dimensionnement

### ►► 8,16 tonnes (*18'000 livres*)

### ►► **ESAL** « *Equivalent Single Axle Road* »

## ► Trafic pondéral

### ►► Nombre de charges d'essieux

# Terminologie

## ► Trafic pondéral équivalent

►► Nombre d'ESAL en moyenne durant  $n$  années

►► Trafic pondéral équivalent journalier

□  $TF_n$

□  $ESAL / jour$

►► Trafic pondéral équivalent total

□  $W_n$

□  $ESAL$



# Facteur d'équivalence

## ► Relation de base

### ►► Equivalence

- Dégradation due à Charge d'essieu  $P_i$
- $\equiv$
- Dégradation due à  $K_i \times$  Charge d'essieu  $P_{\text{réf}}$

$$K_i = \left( \frac{P_i}{P_{\text{réf}}} \right)^\alpha$$

- $\alpha \cong 4$
- $P_{\text{ref}} = \text{ESAL} = 8,16 \text{ tonnes} \cong 81 \text{ kN}$

# Facteur d'équivalence

## ► Coefficient de charge $\alpha$

►► Configuration des essieux

►► Type de superstructure

►► Formule exacte de  $K_i$  pour un revêtement souple

$$K_i = \left( \frac{P_i}{P_{réf}} \right)^\alpha$$

$$K_i = \left( \frac{P_i + A_i}{19} \right)^{4,79} \cdot \frac{0,892}{10^{\frac{-0,201}{B_i}}} \cdot A_i^{-4,33}$$

$$B_i = 0,4 + \frac{0,081 \cdot (P_i + A_i)^{3,23}}{299,4 \cdot A_i^{3,23}}$$

**Compliqué !**

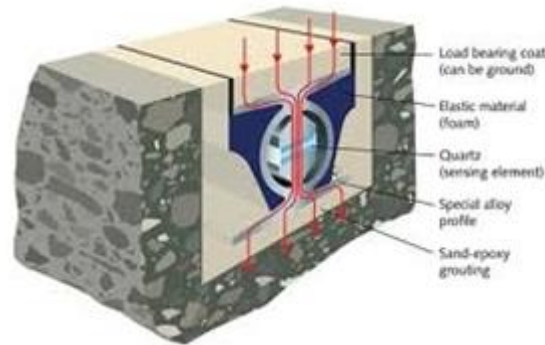
# Facteur d'équivalence

Charge d'essieu (t)	Chaussée souple et semi-rigide			Chaussée rigide		
	Essieu simple	Essieu tandem	Essieu tridem	Essieu simple	Essieu tandem	Essieu tridem
0,5	0,00006	0,00002	0,00001	0,00004	0,00002	0,00002
1	0,0005	0,0001	0,00005	0,0003	0,0001	0,00007
2	0,006	0,0007	0,0003	0,003	0,0007	0,0004
3	0,02	0,003	0,0009	0,015	0,0027	0,0012
4	0,07	0,008	0,002	0,05	0,008	0,003
5	0,15	0,02	0,005	0,12	0,02	0,007
6	0,29	0,03	0,01	0,26	0,04	0,013
7	0,53	0,06	0,02	0,51	0,07	0,02
8,16	1,00	0,10	0,03	1,00	0,13	0,04
9	1,52	0,14	0,04	1,53	0,20	0,06
10	2,40	0,20	0,06	2,42	0,31	0,10
11	3,66	0,28	0,08	3,66	0,46	0,14
12	5,40	0,40	0,11	5,34	0,67	0,21
13	7,76	0,54	0,14	7,53	0,94	0,29
14	10,87	0,73	0,19	10,31	1,29	0,39
15	14,91	0,96	0,24	13,76	1,74	0,53
16	20,06	1,26	0,30	17,96	2,30	0,69
17	26,54	1,63	0,38	22,99	2,98	0,90
18	34,59	2,08	0,48	28,95	3,81	1,14
19		2,64	0,59		4,80	1,44
20		3,30	0,72		5,97	1,79
21		4,09	0,88		7,34	2,21
22		5,03	1,06		8,93	2,69
23			1,27			3,26
24			1,52			3,90
25			1,81			4,64
26			2,14			5,48
27			2,51			6,42
28			2,94			7,48
29			3,43			8,66
30			3,98			9,97

# Données de trafic

## ► Recensement du trafic lourd

- Stations de comptage (WIM Weigh in motion)
- Relevés visuels
- Enquêtes, campagne de pesage, données statistiques



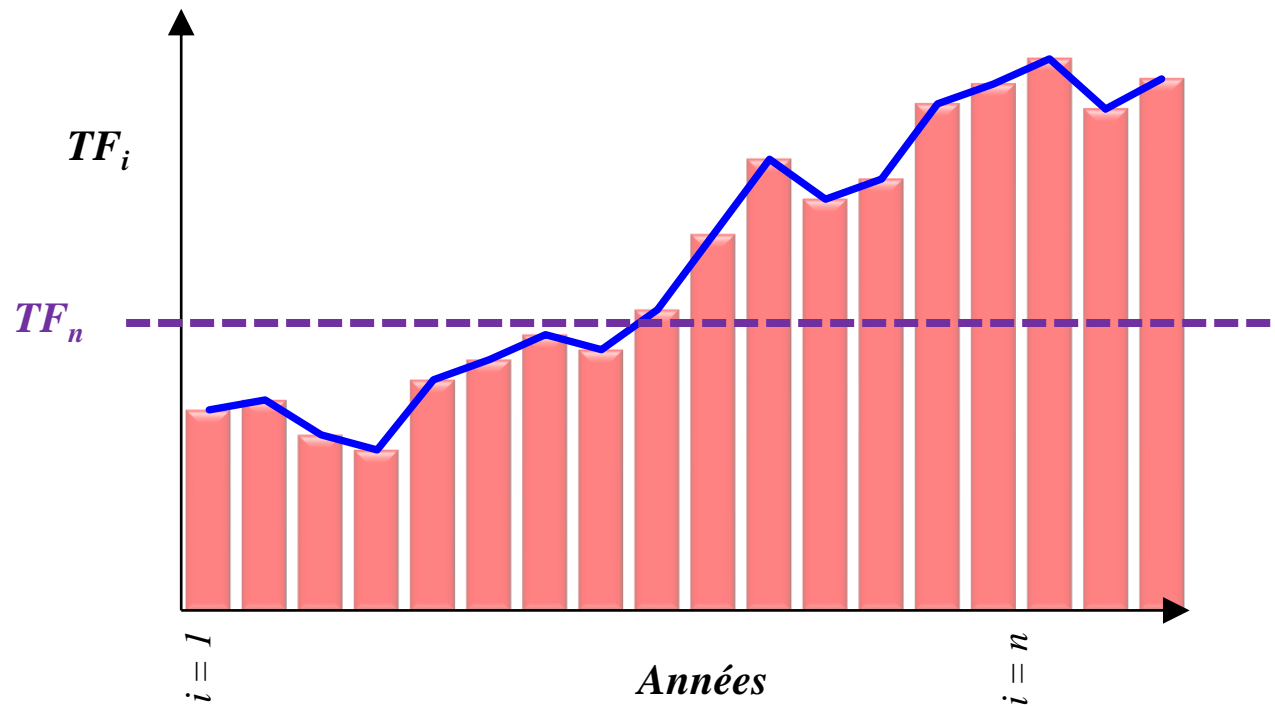
# Détermination de $TF$

## ► Evolution générale

►► Durée de vie de **20 ans** en général

►► Ne pas oublier l'accroissement du trafic !

$$TF_n = \frac{1}{n} \int_{i=1}^{i=n} TF_i$$



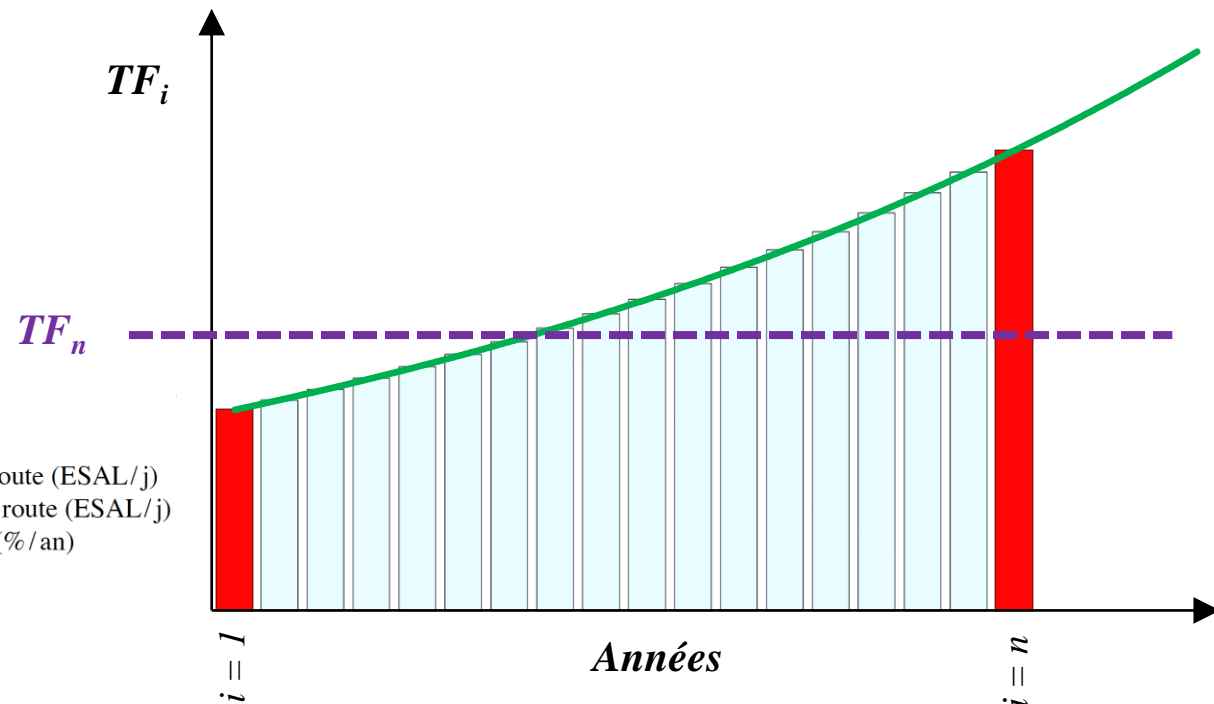
# Détermination de $TF$

## ► Evolution généralement rencontrée

- Accroissement régulier → croissance en % / an
- Moyenne des 2 valeurs extrêmes → Suffisant comme approche

$$TF_n = TF_1 \left[ \frac{1 + (1 + t_c)^n}{2} \right]$$

$TF_n$  trafic pondéral équivalent journalier moyen sur la durée de vie de la route (ESAL/j)  
 $TF_1$  trafic pondéral équivalent journalier moyen à la mise en service de la route (ESAL/j)  
 $t_c$  taux de croissance annuel du trafic lourd durant la période d'analyse (% / an)  
 $n$  durée de vie de la route, généralement 20 ans



# Répartition entre voies

- Charge pondérale en un endroit donné de la chaussée
- Distribution moyenne

route à 1 voie	route à 2 voies	route à 3 voies	route à 4 voies
▲ 100 % ▼	▲ 50 %      50 % ▼	▲      ▲ 50 %   0 %   0 %   50 % ▼      ▼	▲      ▲ 45 %   5 %   5 %   45 % ▼      ▼



# Détermination de $TF$

## ► 4 procédures

- Procédure de base
- Classes de véhicules lourds
- Catégories de véhicules lourds
- Volume de trafic lourd

## ► Rapport $W$ et $TF$

- $W_n$  ESAL sur la durée de vie
- $TF_n$  ESAL/jour

$$TF_n = \frac{W_n}{n \cdot 365}$$

# Procédure de base

## ► Formule

$$W = \sum n_i \cdot K_i$$

- $N_i$  nombre d'essieux de type  $i$
- $K_i$  facteur d'équivalence pour un type d'essieu  $i$

## ► Données

- Structure du trafic lourd / Charge de tous les essieux

## ► Utilisation







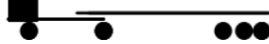




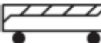
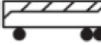
- Trafic particulier

# Facteur d'équivalence $K_i$

Charge d'essieu (t)	Chaussée souple et semi-rigide			Chaussée rigide		
	Essieu simple	Essieu tandem	Essieu tridem	Essieu simple	Essieu tandem	Essieu tridem
0,5	0,00006	0,00002	0,00001	0,00004	0,00002	0,00002
1	0,0005	0,0001	0,00005	0,0003	0,0001	0,00007
2	0,006	0,0007	0,0003	0,003	0,0007	0,0004
3	0,02	0,003	0,0009	0,015	0,0027	0,0012
4	0,07	0,008	0,002	0,05	0,008	0,003
5	0,15	0,02	0,005	0,12	0,02	0,007
6	0,29	0,03	0,01	0,26	0,04	0,013
7	0,53	0,06	0,02	0,51	0,07	0,02
8,16	1,00	0,10	0,03	1,00	0,13	0,04
9	1,52	0,14	0,04	1,53	0,20	0,06
10	2,40	0,20	0,06	2,42	0,31	0,10
11	3,66	0,28	0,08	3,66	0,46	0,14
12	5,40	0,40	0,11	5,34	0,67	0,21
13	7,76	0,54	0,14	7,53	0,94	0,29
14	10,87	0,73	0,19	10,31	1,29	0,39
15	14,91	0,96	0,24	13,76	1,74	0,53
16	20,06	1,26	0,30	17,96	2,30	0,69
17	26,54	1,63	0,38	22,99	2,98	0,90
18	34,59	2,08	0,48	28,95	3,81	1,14
19		2,64	0,59		4,80	1,44
20		3,30	0,72		5,97	1,79
21		4,09	0,88		7,34	2,21
22		5,03	1,06		8,93	2,69
23			1,27			3,26
24			1,52			3,90
25			1,81			4,64
26			2,14			5,48
27			2,51			6,42
28			2,94			7,48
29			3,43			8,66
30			3,98			9,97

# Classes de véhicules lourds

## ► Facteur d'équivalence $K_i$

Silhouette des classes de véhicules lourds	Chaussée souple et semi-rigide	Chaussée rigide
	0,7	0,6
	1,4	2,1
	1,5	2,7
	1,9	3,0
	0,5	0,5
	1,7	1,8
	1,8	2,2
	2,0	2,2
	2,0	1,9
	1,7	1,6
	1,3	1,0
	2,5	2,6
	1,2	0,9

# Catégories de véhicules lourds

## ► Facteur d'équivalence $K_i$

Catégorie de poids lourds	Chaussée souple et semi-rigide	Chaussée rigide
Camion	0,9	1,0
Camion remorque	1,9	2,0
Semi-remorque, Tracteur à sellette	1,7	2,0
Autocars	2,3	
Autobus	2,5	
Autobus articulé	3,9	

# Volume de trafic lourd

## ► Facteur d'équivalence $K_i$

Type de routes	Chaussée en enrobé bitumineux	Chaussée en béton de ciment
RGD : autoroutes de transit	1,6	1,7
RGD : autoroutes	1,4	1,5
RP	1,3	1,5
RL	1,0	1,3

# Classes de trafic pondéral

## ► 6 classes de trafic pondéral

Classes de trafic	Qualification	Trafic pondéral équivalent journalier $TF_{20}$ (ESAL / jour)	Trafic pondéral équivalent total $W_{20}$ (ESAL)
<b>T1<sub>20</sub></b>	très léger	$\leq 30$	$\leq 220'000$
<b>T2<sub>20</sub></b>	léger	30 à 100	220'000 à 730'000
<b>T3<sub>20</sub></b>	moyen	100 à 300	730'000 à 2'200'000
<b>T4<sub>20</sub></b>	lourd	300 à 1'000	2'200'000 à 7'300'000
<b>T5<sub>20</sub></b>	très lourd	1'000 à 3'000	7'300'000 à 22'00'000
<b>T6<sub>20</sub></b>	extrêmement lourd	3'000 à 10'000	22'00'000 à 73'00'000

$$W_{20} = TF_{20} \cdot 20 \cdot 365 = TF_{20} \cdot 7'300$$



# Classes de portances

- 5 classes de portances
- Sol S0 inapte à la construction routière
- Sol S1 renforcement nécessaire

Classes de portance	Qualification	Module $ME_1$ (MN/m <sup>2</sup> )	Module $E_{v1}$ (MN/m <sup>2</sup> )	CBR (%)	k (MN/m <sup>3</sup> )	Type de sol
<b>S0</b>	portance très faible	< 6	< 4,5	< 3	< 15	sols très fins
<b>S1</b>	portance faible	6 à 15	4,5 à 11,25	3 à 6	15 à 30	sols fins (limons et argiles)
<b>S2</b>	portance moyenne	15 à 30	11,25 à 22,5	6 à 12	30 à 60	sols à granulométrie moyenne (sables)
<b>S3</b>	portance élevée	30 à 60	22,5 à 45	12 à 25	60 à 100	sables et sols grossiers
<b>S4</b>	portance très élevée	> 60	> 45	> 25	> 100	sols grossiers (graviers)

# 2 approches de dimensionnement

## ► Catalogue des types de superstructure

- Classe de portance & Classe de trafic pondéral
- Choix d'un type de superstructure

## ► Valeur de superstructure SN

- Classe de portance & Classe de trafic pondéral ou trafic pondéral équivalent total W
- Matériaux quelconques
- Épaisseurs variables

# 2 approches de dimensionnement

- ▶ **Valeur de superstructure SN** (*suite*)
  - ▶ Approche selon normes (seuils)
  - ▶ Approche selon formule exacte
- ▶ **Utilisation combinée des deux méthodes**
  - ▶ Catalogue des types de superstructure
  - ▶ Modification des couches ainsi obtenues par SN équivalent

# Catalogue des types de superstructure




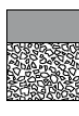


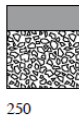






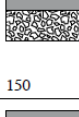

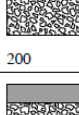
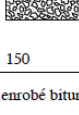
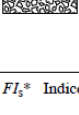
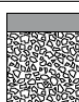
## ► 6 types de superstructure

### ►► Classes de portance S2 à S4

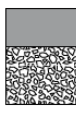






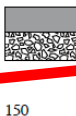





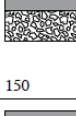

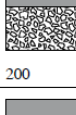
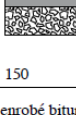
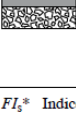

Type de chaussée	Libellé
Chaussée souple et semi-rigide	
1	Couches en enrobé bitumineux sur grave non traitée
2	Couches en enrobé bitumineux sur couche de fondation à chaud AC F et grave non traitée
3	Couches en enrobé bitumineux sur couche de fondation à chaud AC F
4	Couches en enrobé bitumineux sur couches stabilisées aux liants hydrauliques et grave non traitée
5	Couches en enrobé bitumineux sur couches stabilisées aux liants hydrauliques
6	Couches en enrobé bitumineux sur grave non traitée et couche stabilisée aux liants hydrauliques
Chaussée rigide	
11	Couches de surface en béton sur grave non traitée
12	Couches de surface en béton sur couche de base en enrobé bitumineux AC T et grave non traitée
13	Couches de surface en béton sur couches stabilisées aux liants hydrauliques et grave non traitée
14	Couches de surface en béton sur couches stabilisées aux liants hydrauliques
15	Couches de surface en béton sur plate-forme
16	Couches de surface en béton armé continu sur couche de base en enrobé bitumineux AC T et grave non traitée

**Traité avec  
chaussées en béton**

# Catalogue des types de superstructure

Type de chaussée 1							Couche(s) en enrobé bitumineux sur grave non traitée		
Dimensionnement de la portance				Dimensionnement au gel					
				Indices de gel	Facteur de dimensionnement				
Tx <sub>20</sub>	S2		S3		S4		FI <sub>s</sub>	G3	G4
T6 <sub>20</sub>		270 mm 400 mm 670 mm		270 mm 200 mm 470 mm		270 mm 150 mm 420 mm	< 400 400...600 > 600	0,50 0,50 0,55	0,60 0,60 0,65
FI <sub>s</sub> *	300		200						
T5 <sub>20</sub>		220 mm 400 mm 620 mm		220 mm 200 mm 420 mm		220 mm 150 mm 370 mm			
FI <sub>s</sub> *	250		200						
T4 <sub>20</sub>		170 mm 400 mm 570 mm		170 mm 200 mm 370 mm		170 mm 150 mm 320 mm	< 400 400...600 > 600	0,50 0,50 0,55	0,60 0,60 0,65
FI <sub>s</sub> *	250		150						
T3 <sub>20</sub>		130 mm 350 mm 480 mm		130 mm 200 mm 330 mm		130 mm 150 mm 280 mm			
FI <sub>s</sub> *	200		150						
T2 <sub>20</sub>		100 mm 350 mm 450 mm		100 mm 200 mm 300 mm		100 mm 150 mm 250 mm	< 400 400...600 > 600	0,45 0,45 0,50	0,55 0,55 0,60
FI <sub>s</sub> *	200		150						
T1 <sub>20</sub>		70 mm 300 mm 370 mm		70 mm 200 mm 270 mm		70 mm 150 mm 220 mm			
FI <sub>s</sub> *	200		150						
				Couche(s) en enrobé bitumineux		FI <sub>s</sub> * Indices critiques de gel selon le chiffre 29			
				Grave non traitée					
				Plate-forme					

# Catalogue des types de superstructure

Type de chaussée 1							Couche(s) en enrobé bitumineux sur grave non traitée		
Dimensionnement de la portance				Dimensionnement au gel					
				Indices de gel	Facteur de dimensionnement $f$				
$T_{k20}$	S2	S3	S4	$FI_s^*$	G3	G4			
T6 <sub>20</sub>	 270 mm 400 mm 670 mm	 270 mm 200 mm 470 mm	 270 mm 150 mm 420 mm	< 400 400...600 > 600	0,50 0,50 0,55	0,60 0,60 0,65			
$FI_s^*$	300	200							
T5 <sub>20</sub>	 220 mm 400 mm 620 mm	 220 mm 200 mm 420 mm	 220 mm 150 mm 370 mm						
$FI_s^*$	250	200							
T4 <sub>20</sub>	 170 mm 400 mm 570 mm	 170 mm 200 mm 370 mm	 170 mm 150 mm 320 mm	< 400 400...600 > 600	0,50 0,45 0,45	0,65 0,60 0,55			
$FI_s^*$	250	150							
T3 <sub>20</sub>	 130 mm 350 mm 480 mm	 130 mm 200 mm 330 mm	 130 mm 150 mm 280 mm						
$FI_s^*$	200	150							
T2 <sub>20</sub>	 100 mm 350 mm 450 mm	 100 mm 200 mm 300 mm	 100 mm 150 mm 250 mm	< 400 400...600 > 600	0,45 0,45 0,50	0,55 0,55 0,60			
$FI_s^*$	200	150							
T1 <sub>20</sub>	 70 mm 300 mm 370 mm	 70 mm 200 mm 270 mm	 70 mm 150 mm 220 mm						
$FI_s^*$	200	150							
				$FI_s^*$ Indices critiques de gel selon le chiffre 29					

# Valeur de structure *SN*

- ▶ **Structural Number *SN***

- ▶ **Vérification**

- ▶▶  $SN \geq SN_{néc}$

- ▶ **Épaisseur structurelle *SN***

$$SN = \sum_{i=1}^{i=n} a_i \cdot D_i \quad \text{en cm de grave ronde non traitée}$$

  - ▶▶  $a_i$       facteur de portance relative du matériau constitutif de la couche

  - ▶▶  $D_i$       épaisseur de la couche (cm)



# Facteur de portance relative

Couches de la chaussée	Matériaux en fonction de l'état des dégradations			
	Nouvelle chaussée	Dégradations légères Perte de matériaux / Fissuration	Dégradations moyennes Perte de matériaux / Fissuration	Dégradations structurelles Faïençage / Déformation
Couche de roulement, de liaison et de base				
Enrobés bitumineux <b>AC, AC T, AC MR</b> Splittmastix-asphalt <b>SMA</b> Asphalte coulé <b>MA</b>	4,0	3,4	2,8	2,4
Couche de roulement et de liaison				
Enrobé drainant <b>PA</b>	2,6	2,2	1,8	1,6
Couche de base				
Enrobés bitumineux à module élevé <b>AC EME C1</b> <sup>1)</sup>	4,4	3,8	2,8	2,4
Enrobés bitumineux à module élevé <b>AC EME C2</b> <sup>1)</sup>	5,6	5,0		
Couche de fondation				
Enrobé bitumineux <b>AC F</b>	3,2	2,8	2,2	1,9
Pénétration et stabilisations				
Pénétration	2,6	2,2	1,8	1,6
Stabilisation aux liants hydrauliques	2,4	2,0	1,7	1,5
Stabilisation aux liants bitumineux	2,7	2,3	1,9	1,6
Grave non traitée				
Grave concassée	1,25	1,25	1,25	0,75 <sup>2)</sup>
Grave ronde	1,0	1,0	1,0	0,6 <sup>2)</sup>

# Exemple : calcul de SN

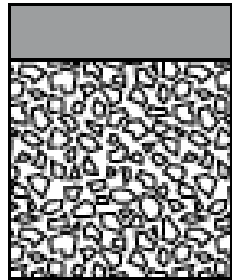
## ► Chaussée avec 3 couches

►► 8 cm AC

►► 10 cm AC T

►► 40 cm fondation grave ronde

► SN = ?



Couche(s) en enrobé bitumineux

Grave non traitée

Plate-forme

# Exemple : calcul de SN

## ► Matériaux neufs

►► AC →  $a = 4,0$

►► AC T →  $a = 4,0$

►► Grave ronde →  $a = 1,0$

## ► SN

►►  $8 \times 4,0 + 10 \times 4,0 + 40 \times 1,0$

►►  $32 + 40 + 40$

►►  $SN = 112 \text{ cm g.r.}$

Couches de la chaussée	Matériaux en fonction de l'état des dégradations			
	Nouvelle chaussée	Dégradations légères Perte de matériaux / Fissuration	Dégradations moyennes Perte de matériaux / Fissuration	Dégradations structurelles Faiencage / Déformation
Couche de roulement, de liaison et de base				
Enrobés bitumineux <b>AC, AC T, AC MR</b> Splittmastix-asphalt <b>SMA</b> Asphalte coulé <b>MA</b>	4,0	3,4	2,8	2,4
Couche de roulement et de liaison				
Enrobé drainant <b>PA</b>	2,6	2,2	1,8	1,6
Couche de base				
Enrobés bitumineux à module élevé <b>AC EME C1<sup>1)</sup></b>	4,4	3,8	2,8	2,4
Enrobés bitumineux à module élevé <b>AC EME C2<sup>1)</sup></b>	5,6	5,0		
Couche de fondation				
Enrobé bitumineux <b>AC F</b>	3,2	2,8	2,2	1,9
Pénétration et stabilisations				
Pénétration	2,6	2,2	1,8	1,6
Stabilisation aux liants hydrauliques	2,4	2,0	1,7	1,5
Stabilisation aux liants bitumineux	2,7	2,3	1,9	1,6
Grave non traitée				
Grave concassée	1,25	1,25	1,25	0,75 <sup>2)</sup>
Grave ronde	1,0	1,0	1,0	0,6 <sup>2)</sup>



Couche(s) en enrobé bitumineux

Grave non traitée

Plate-forme

# Valeur de structure nécessaire

- ▶ **Dimensionnement selon  $Ti_{20}$**
- ▶ **Dépend de 2 paramètres**
  - ▶ **Classe de trafic pondéral / Classe de portance**
- ▶ **Donnée en cm de grave ronde non traitée**

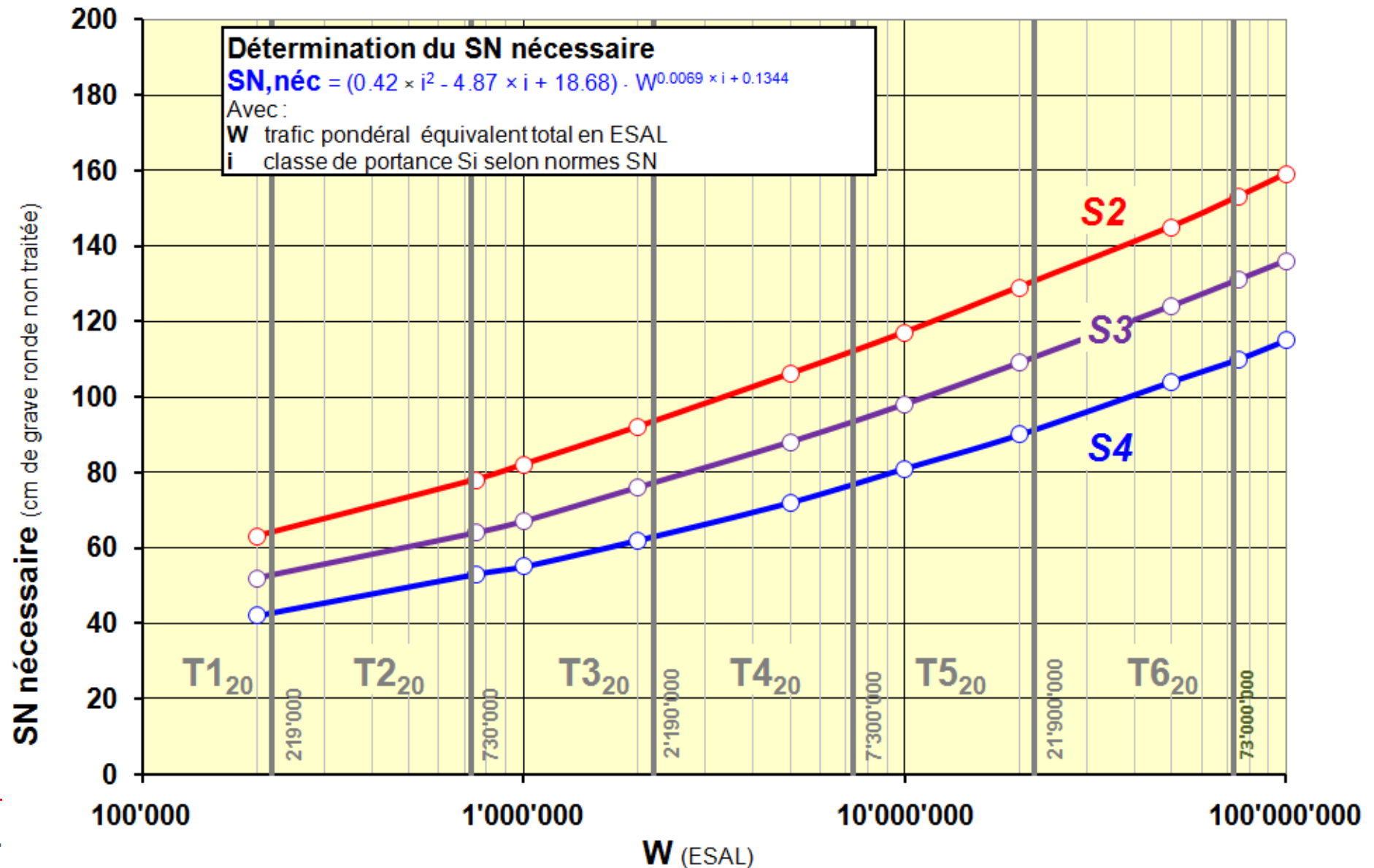
Classe de trafic pondéral	Classe de portance Si		
	S2	S3	S4
$T1_{20}$	59	50	41
$T2_{20}$	73	59	50
$T3_{20}$	87	73	59
$T4_{20}$	105	87	73
$T5_{20}$	123	105	87
$T6_{20}$	145	123	105

# Valeur de structure nécessaire

- ▶ **Dimensionnement selon  $W_n$**
- ▶ **Dépend de 2 paramètres**
  - ▶ Trafic pondéral équivalent total / Classe de portance
- ▶ **Donnée en cm de grave ronde non traitée**

Trafic pondéral équivalent total W	Classe de portance Si		
	S2	S3	S4
200 000	63	52	42
750 000	78	64	53
1 000 000	82	67	55
2 000 000	92	76	62
5 000 000	106	88	72
10 000 000	117	98	81
20 000 000	129	109	90
50 000 000	145	124	104
75 000 000	153	131	110
100 000 000	159	136	115

# Valeur de structure nécessaire



# Exemple

- ▶ **Chaussée souple**
- ▶  **$TF_{20} = 450$  ESAL/j**
- ▶ **Sol sableux – CBR 8 %**
- ▶ **Chaussée de Type 1**
- ▶ **Variante : remplacer la base de la couche de fondation par 10 cm de stabilisation hydraulique**
  - ▶ **Méthode SN / Méthode Exacte**
- ▶ **Durée de vie de 20 ans**

# Classes de trafic pondéral

► **TF = 450 ESAL/j**

Classes de trafic	Qualification	Trafic pondéral équivalent journalier $TF_{20}$ (ESAL / jour)	Trafic pondéral équivalent total $W_{20}$ (ESAL)
<b>T1<sub>20</sub></b>	très léger	$\leq 30$	$\leq 220'000$
<b>T2<sub>20</sub></b>	léger	30 à 100	220'000 à 730'000
<b>T3<sub>20</sub></b>	moyen	100 à 300	730'000 à 2'200'000
<b>T4<sub>20</sub></b>	lourd	300 à 1'000	2'200'000 à 7'300'000
<b>T5<sub>20</sub></b>	très lourd	1'000 à 3'000	7'300'000 à 22'00'000
<b>T6<sub>20</sub></b>	extrêmement lourd	3'000 à 10'000	22'00'000 à 73'00'000

► **T4<sub>20</sub>**



# Classes de portances

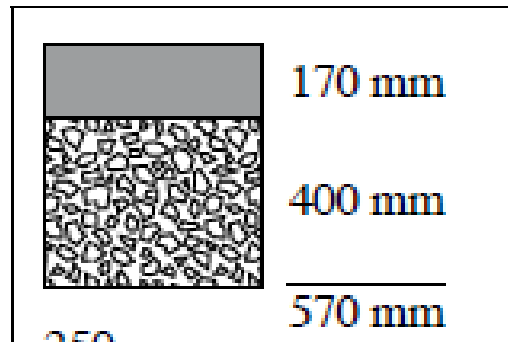
## ► Sol sableux – CBR 8 %

Classes de portance	Qualification	Module $ME_1$ (MN/m <sup>2</sup> )	Module $E_{v1}$ (MN/m <sup>2</sup> )	CBR (%)	k (MN/m <sup>3</sup> )	Type de sol
<b>S0</b>	portance très faible	< 6	< 4,5	< 3	< 15	sols très fins
<b>S1</b>	portance faible	6 à 15	4,5 à 11,25	3 à 6	15 à 30	sols fins (limons et argiles)
<b>S2</b>	portance moyenne	15 à 30	11,25 à 22,5	6 à 12	30 à 60	sols à granulométrie moyenne (sables)
<b>S3</b>	portance élevée	30 à 60	22,5 à 45	12 à 25	60 à 100	sables et sols grossiers
<b>S4</b>	portance très élevée	> 60	> 45	> 25	> 100	sols grossiers (graviers)

## ► S2

# Catalogue des types de superstructure

## ► S2 / T4<sub>20</sub>



Type de chaussée 1		Couche(s) en enrobé bitumineux sur grave non traitée				
Dimensionnement de la portance				Dimensionnement au gel		
				Indices de gel	Facteur de dimensionnement <i>f</i>	
T <sub>20</sub>	S2	S3	S4	<i>FI<sub>s</sub></i>	G3	G4
T6 <sub>20</sub>	270 mm 400 mm 670 mm	270 mm 200 mm 470 mm	270 mm 150 mm 420 mm	< 400 400...600 > 600	0,50 0,50 0,55	0,60 0,60 0,65
<i>FI<sub>s</sub></i> *	300	200				
T5 <sub>20</sub>	220 mm 400 mm 620 mm	220 mm 200 mm 420 mm	220 mm 150 mm 370 mm			
<i>FI<sub>s</sub></i> *	250	200				
T4 <sub>20</sub>	170 mm 400 mm 570 mm	170 mm 200 mm 370 mm	170 mm 150 mm 320 mm	< 400 400...600 > 600	0,45 0,45 0,50	0,55 0,55 0,60
<i>FI<sub>s</sub></i> *	250	150				
T3 <sub>20</sub>	130 mm 350 mm 480 mm	130 mm 200 mm 330 mm	130 mm 150 mm 280 mm			
<i>FI<sub>s</sub></i> *	200	150				
T2 <sub>20</sub>	100 mm 350 mm 450 mm	100 mm 200 mm 300 mm	100 mm 150 mm 250 mm	< 400 400...600 > 600	0,45 0,45 0,50	0,55 0,55 0,60
<i>FI<sub>s</sub></i> *	200	150				
T1 <sub>20</sub>	70 mm 300 mm 370 mm	70 mm 200 mm 270 mm	70 mm 150 mm 220 mm			
<i>FI<sub>s</sub></i> *	200	150				
	Couche(s) en enrobé bitumineux Grave non traitée Plate-forme	<i>FI<sub>s</sub></i> * Indices critiques de gel selon le chiffre 29				

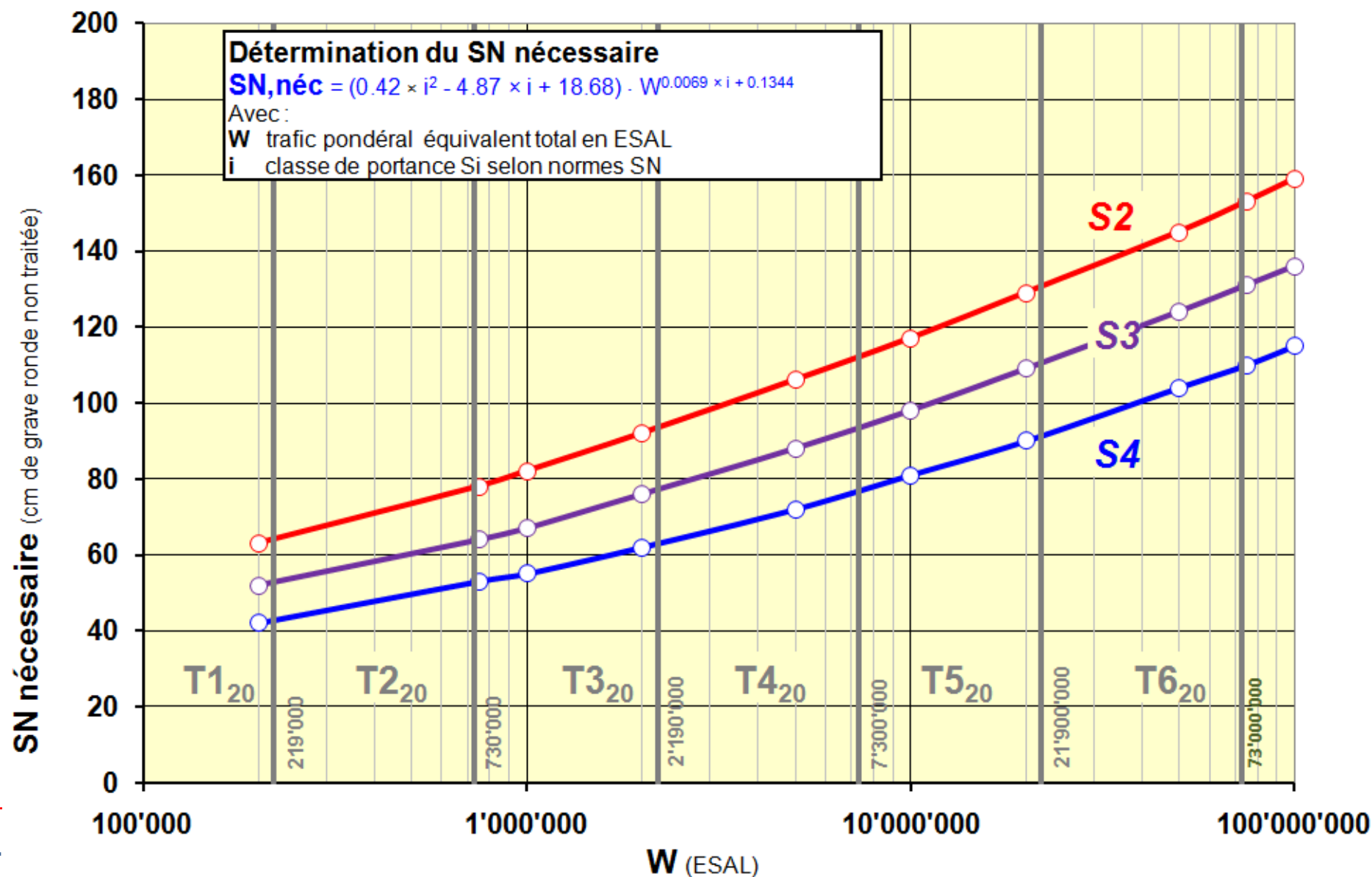
# Valeur de structure nécessaire

## ► S2 / T4<sub>20</sub>

Classe de trafic pondéral	Classe de portance Si		
	S2	S3	S4
T1 <sub>20</sub>	59	50	41
T2 <sub>20</sub>	73	59	50
T3 <sub>20</sub>	87	73	59
T4 <sub>20</sub>	105	87	73
T5 <sub>20</sub>	123	105	87
T6 <sub>20</sub>	145	123	105

► **SN<sub>néc</sub> = 105 cm g.r.**

# Valeur de structure nécessaire



# Valeur de structure nécessaire

►  $TF_{20} = 450 \text{ ESAL} / j$

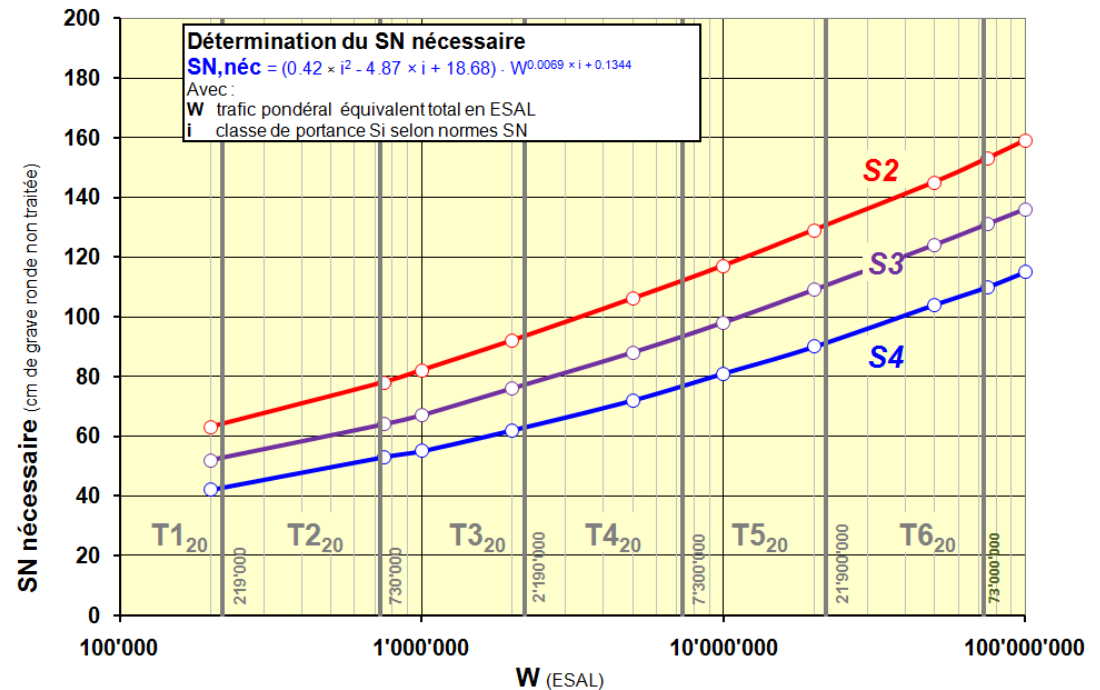
►  $i = 2$

►  $W = 450 \times 20 \times 365 = 3,285 \text{ millions ESAL}$

► Formule exacte

►  $SN_{\text{néc}} = 98,2 \text{ cm g.r.}$

► Selon tableau : 105



# Valeur de structure SN selon catalogue

## ► Matériaux neufs

►► AC / AC T →  $a = 4,0$

►► Grave ronde →  $a = 1,0$

## ► SN

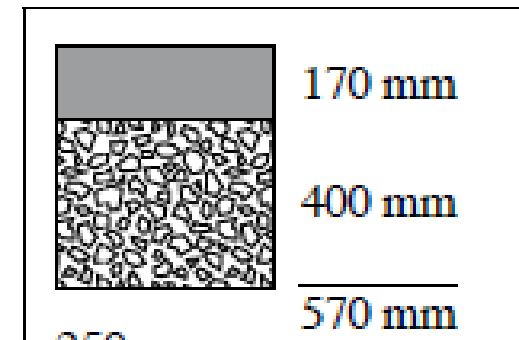
►►  $17 \times 4,0 + 40 \times 1,0$

►►  $68 + 40 = 108 \text{ cm g.r.}$

## ► SN néc

►►  $105 / 98 \text{ cm g.r.}$

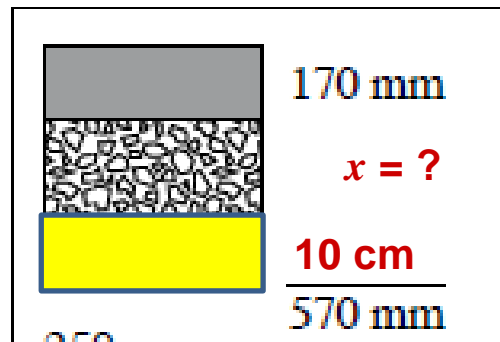
Couches de la chaussée	Matériaux en fonction de l'état des dégradations			
	Nouvelle chaussée	Dégradations légères Perte de matériaux / Fissuration	Dégradations moyennes Perte de matériaux / Fissuration	Dégradations structurelles Faiencage / Déformation
Couche de roulement, de liaison et de base				
Enrobés bitumineux <b>AC, AC T, AC MR</b> Splittmastix-asphalt <b>SMA</b> Asphalte coulé <b>MA</b>	4,0	3,4	2,8	2,4
Couche de roulement et de liaison				
Enrobé drainant <b>PA</b>	2,6	2,2	1,8	1,6
Couche de base				
Enrobés bitumineux à module élevé <b>AC EME C1<sup>1)</sup></b>	4,4	3,8	2,8	2,4
Enrobés bitumineux à module élevé <b>AC EME C2<sup>1)</sup></b>	5,6	5,0		
Couche de fondation				
Enrobé bitumineux <b>AC F</b>	3,2	2,8	2,2	1,9
Pénétration et stabilisations				
Pénétration	2,6	2,2	1,8	1,6
Stabilisation aux liants hydrauliques	2,4	2,0	1,7	1,5
Stabilisation aux liants bitumineux	2,7	2,3	1,9	1,6
Grave non traitée				
Grave concassée	1,25	1,25	1,25	0,75 <sup>2)</sup>
Grave ronde	1,0	1,0	1,0	0,6 <sup>2)</sup>



# Variante de chaussée

## ► Stabilisation hydraulique

### ►► 10 cm en bas de fondation



# Exemple : variante avec stabilisation

## ► Matériaux neufs

►► AC →  $a = 4,0$

►► Grave ronde →  $a = 1,0$

►► Stabilisation hydr. →  $a = 2,4$

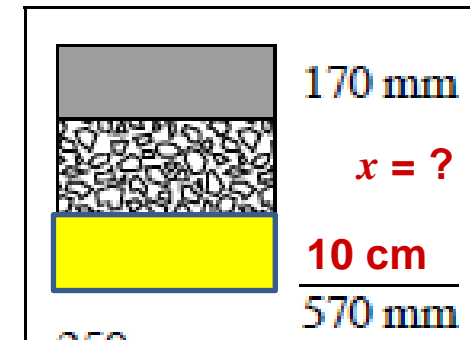
►  $SN = SN_{néc} = 98,2 \text{ cm g.r.}$

►►  $17 \times 4,0 + x \times 1,0 + 10 \times 2,4 = 98,2$

►►  $x = 6,2 \text{ cm} \rightarrow \mathbf{7 \text{ cm}}$

►►  $SN = 68 + 7 + 24 = 99 \text{ cm g.r.}$

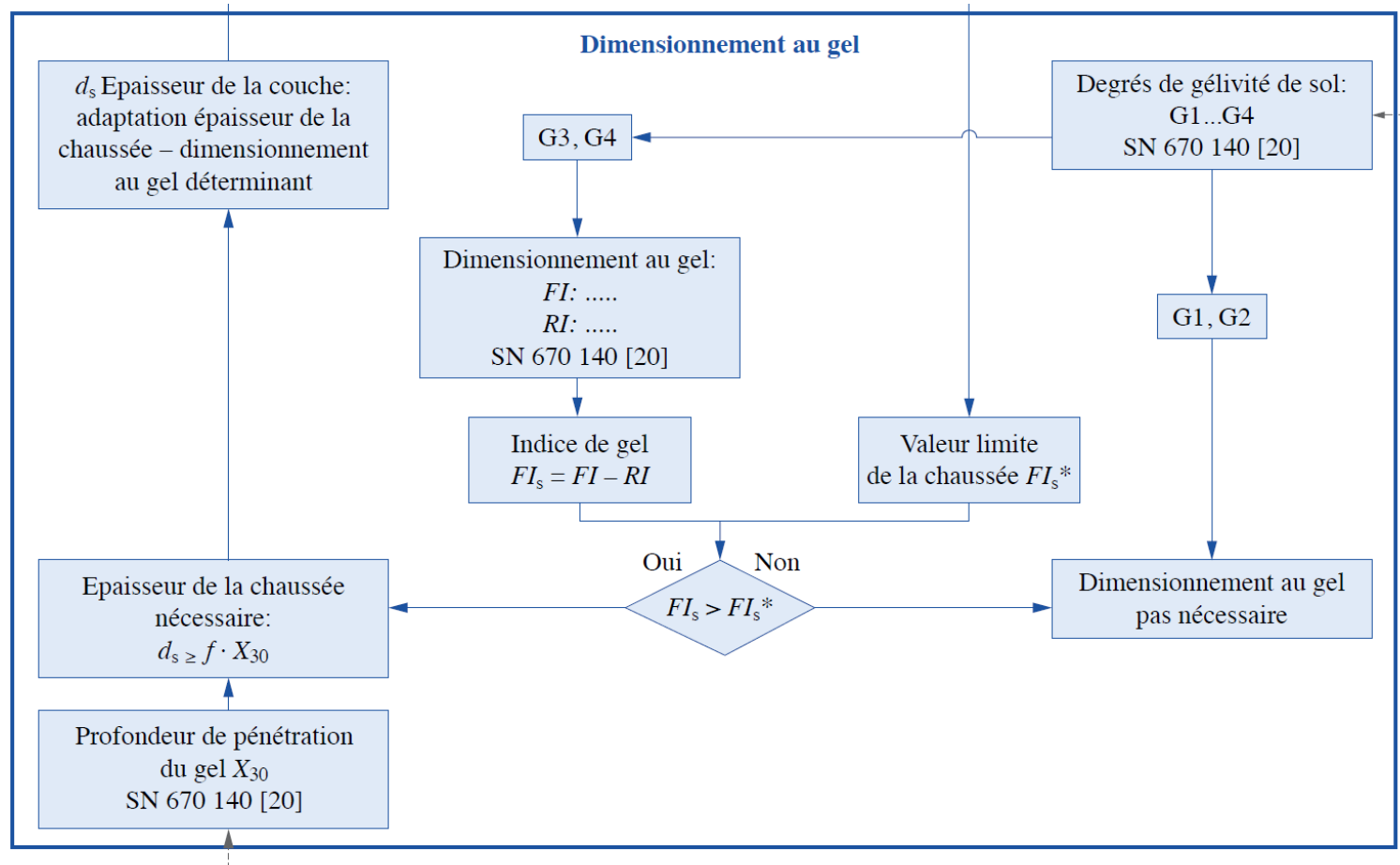
Couches de la chaussée	Matériaux en fonction de l'état des dégradations			
	Nouvelle chaussée	Dégradations légères Perte de matériaux / Fissuration	Dégradations moyennes Perte de matériaux / Fissuration	Dégradations structurelles Faiencage / Déformation
Couche de roulement, de liaison et de base				
Enrobés bitumineux <b>AC, AC T, AC MR</b> Splittmastix-asphalt <b>SMA</b> Asphalte coulé <b>MA</b>	4,0	3,4	2,8	2,4
Couche de roulement et de liaison				
Enrobé drainant <b>PA</b>	2,6	2,2	1,8	1,6
Couche de base				
Enrobés bitumineux à module élevé <b>AC EME C1<sup>1)</sup></b>	4,4	3,8	2,8	2,4
Enrobés bitumineux à module élevé <b>AC EME C2<sup>1)</sup></b>	5,6	5,0		
Couche de fondation				
Enrobé bitumineux <b>AC F</b>	3,2	2,8	2,2	1,9
Pénétration et stabilisations				
Pénétration	2,6	2,2	1,8	1,6
Stabilisation aux liants hydrauliques	2,4	2,0	1,7	1,5
Stabilisation aux liants bitumineux	2,7	2,3	1,9	1,6
Grave non traitée				
Grave concassée	1,25	1,25	1,25	0,75 <sup>2)</sup>
Grave ronde	1,0	1,0	1,0	0,6 <sup>2)</sup>





# Procédure de dimensionnement

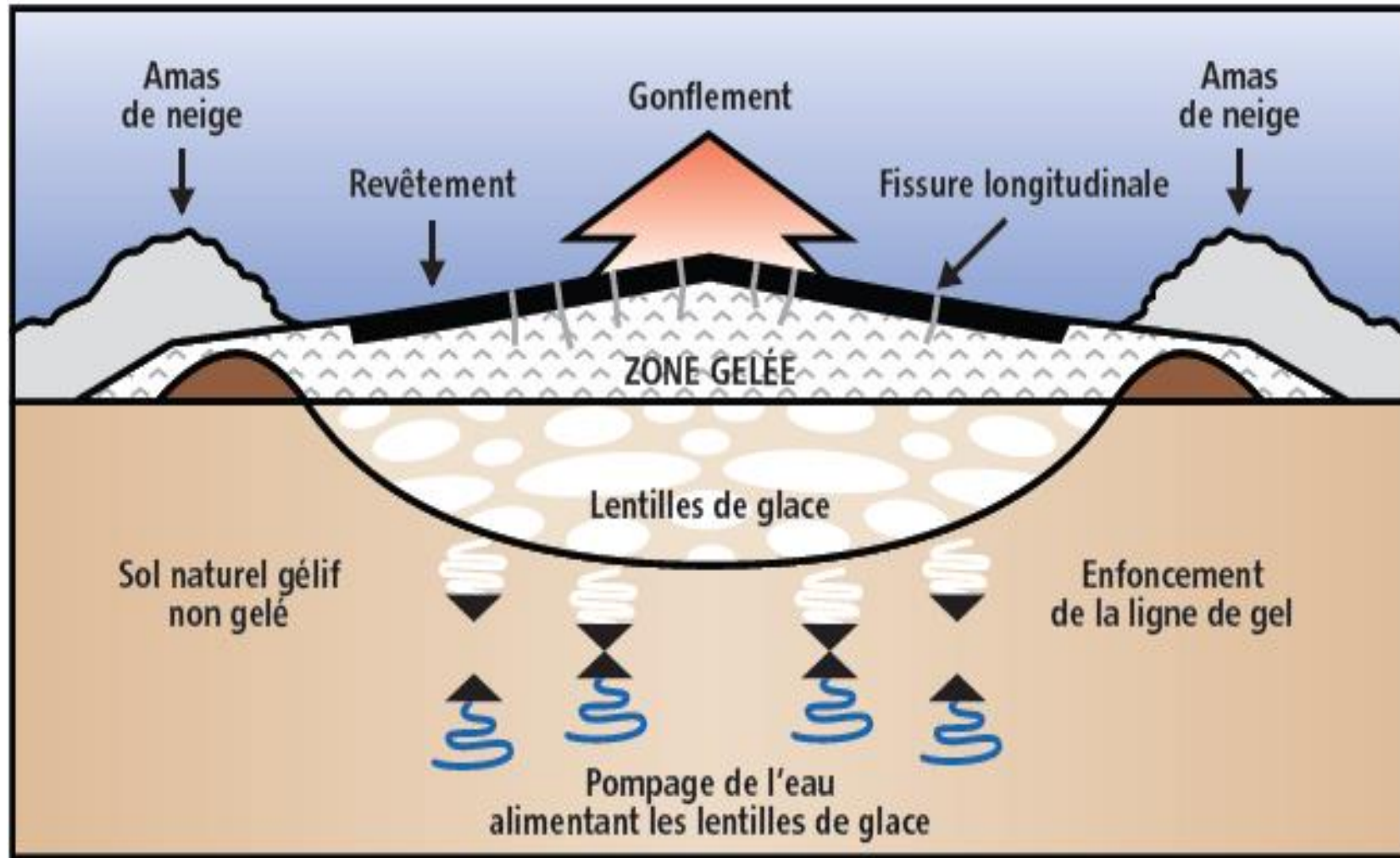
## ► Dimensionnement au gel



# Processus du gel

- ▶ **Gel de l'eau interstitielle présente dans un sol gélif**
  - ▶ Sol de granulométrie moyenne
  - ▶ Sables & Limons
- ▶ **Diminution de la teneur en eau non gelée**
  - ▶ Dépression (suction)
  - ▶ Migration de l'eau interstitielle non encore gelée vers la zone gelée
  - ▶ Formation de **lentilles de glace**

# Formation de lentilles de glace



# Lentilles de glace

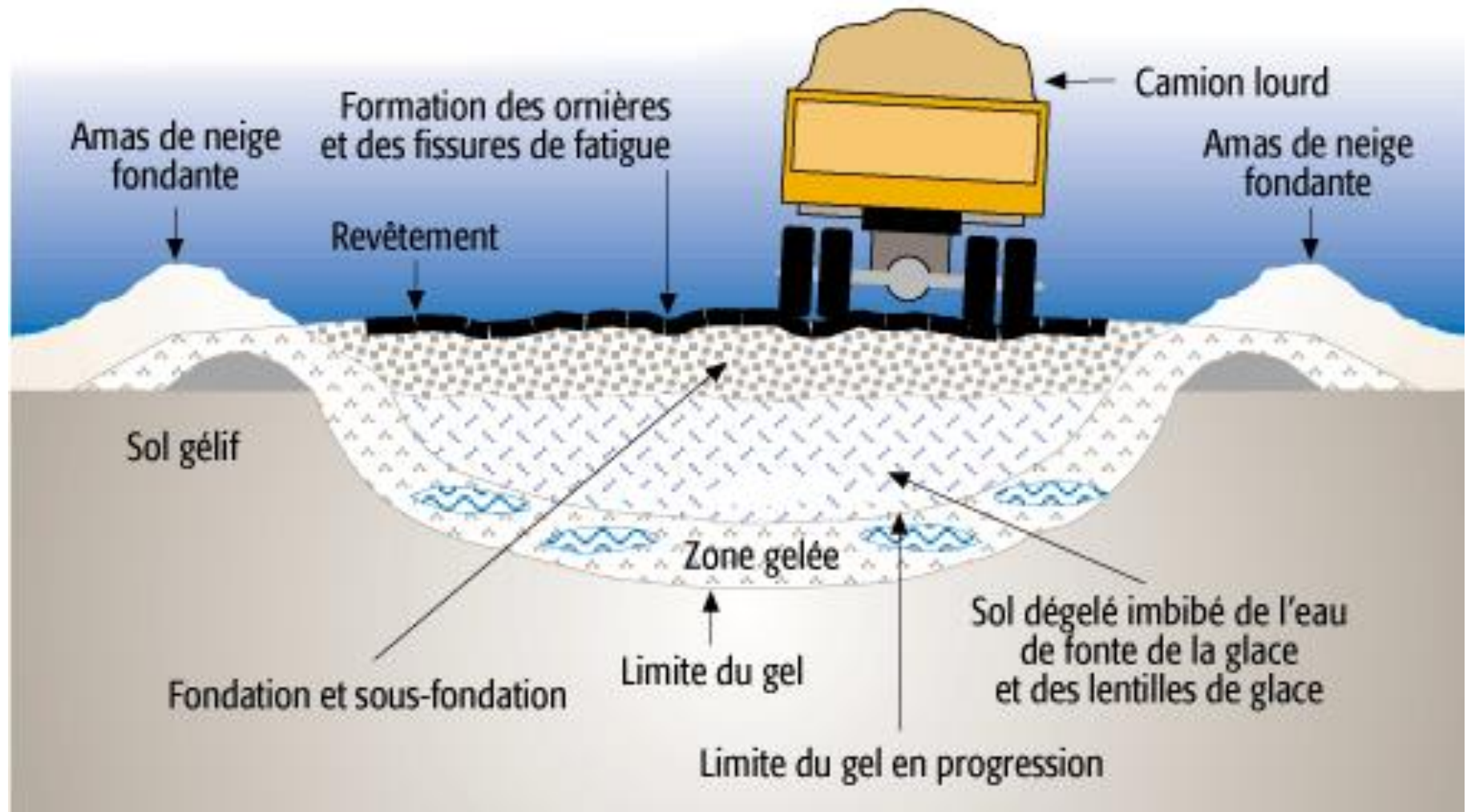


# Processus du dégel

- ▶ Au dégel, la glace de la couche gelée fond aussi bien par le bas que par le haut
- ▶ L'eau devenue libre dans les couches supérieures ne peut s'infiltrer vers le bas tant que la glace de la couche gelée n'est pas entièrement fondue
- ▶ Elle est ainsi la cause d'une diminution de la portance
  - ▶ Le sol devient une **bouillie** non portante



# Phénomène du dégel sur une chaussée



# Dégâts dus au gel

## ► Gonflement

- Formation de lentilles de glace dans les sols gélifs
- Peuvent provoquer la fissuration du revêtement et ainsi favoriser leur destruction lors du dégel



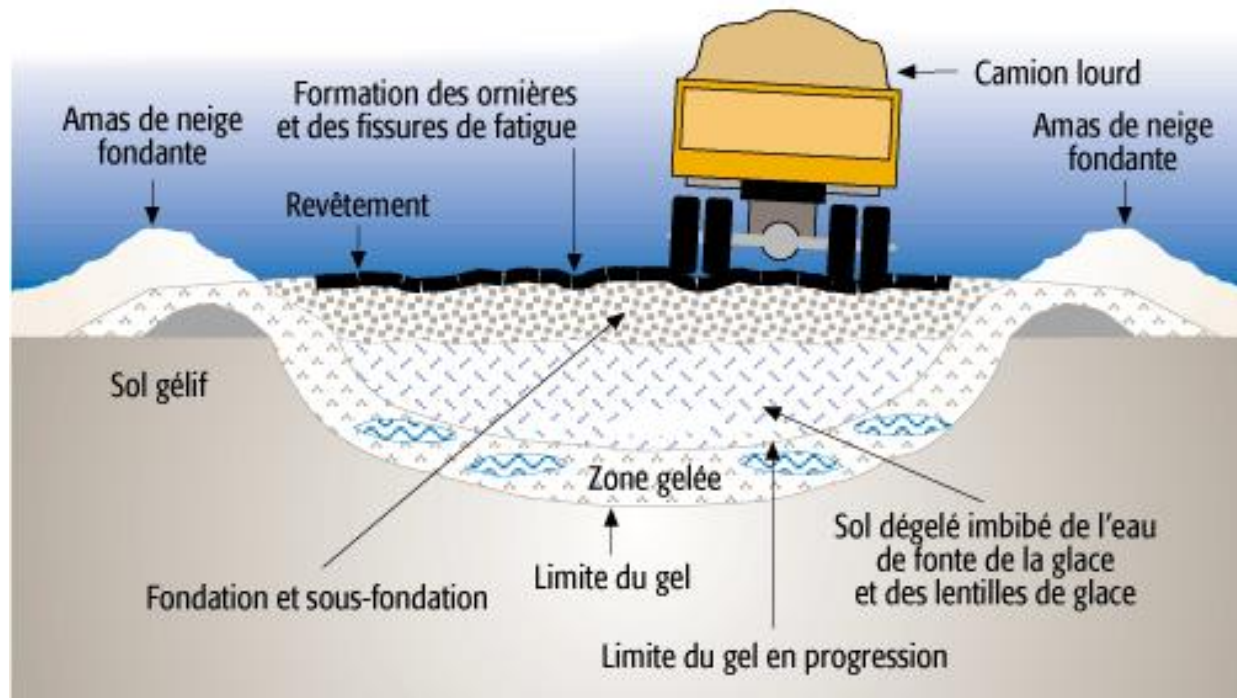
# Fissure longitudinale de gel





# Dégâts dus au dégel

- **Diminution de la portance lors du dégel**
  - Peut conduire à des déformations irréversibles
  - Peut aller jusqu'à la destruction de la substance



# Dégâts dus au dégel



# Dégâts dus au dégel

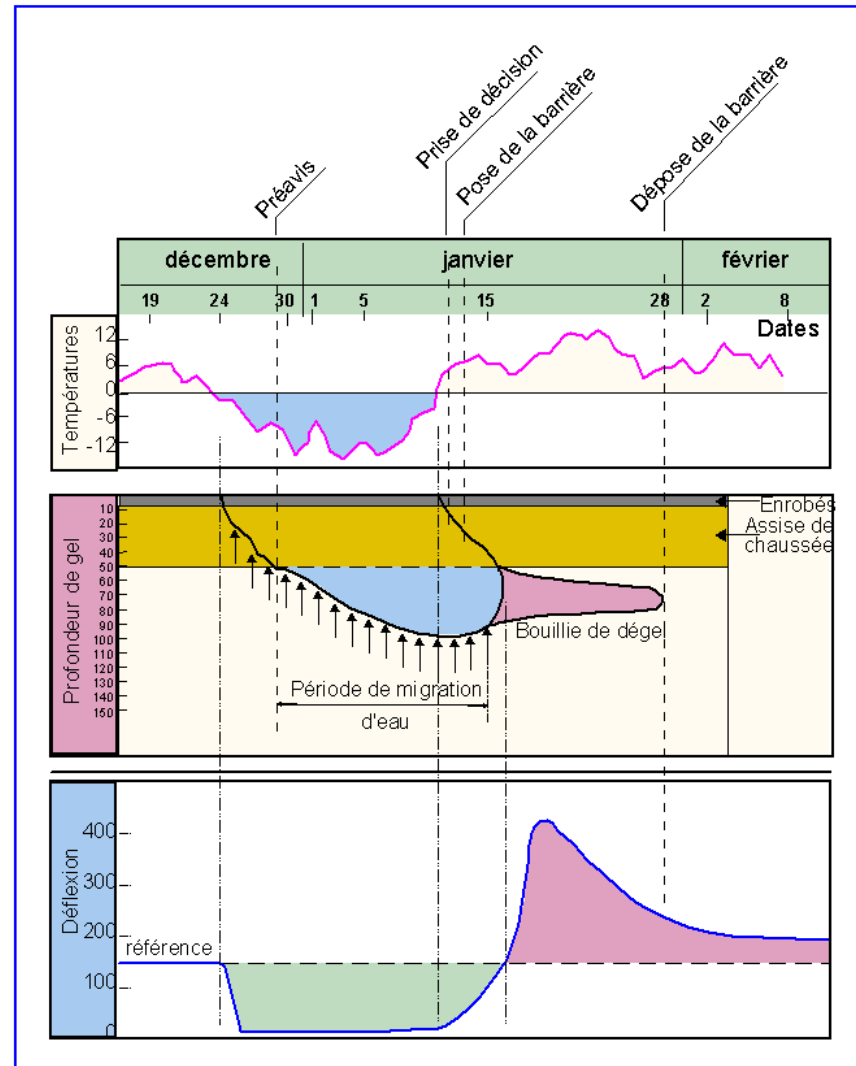




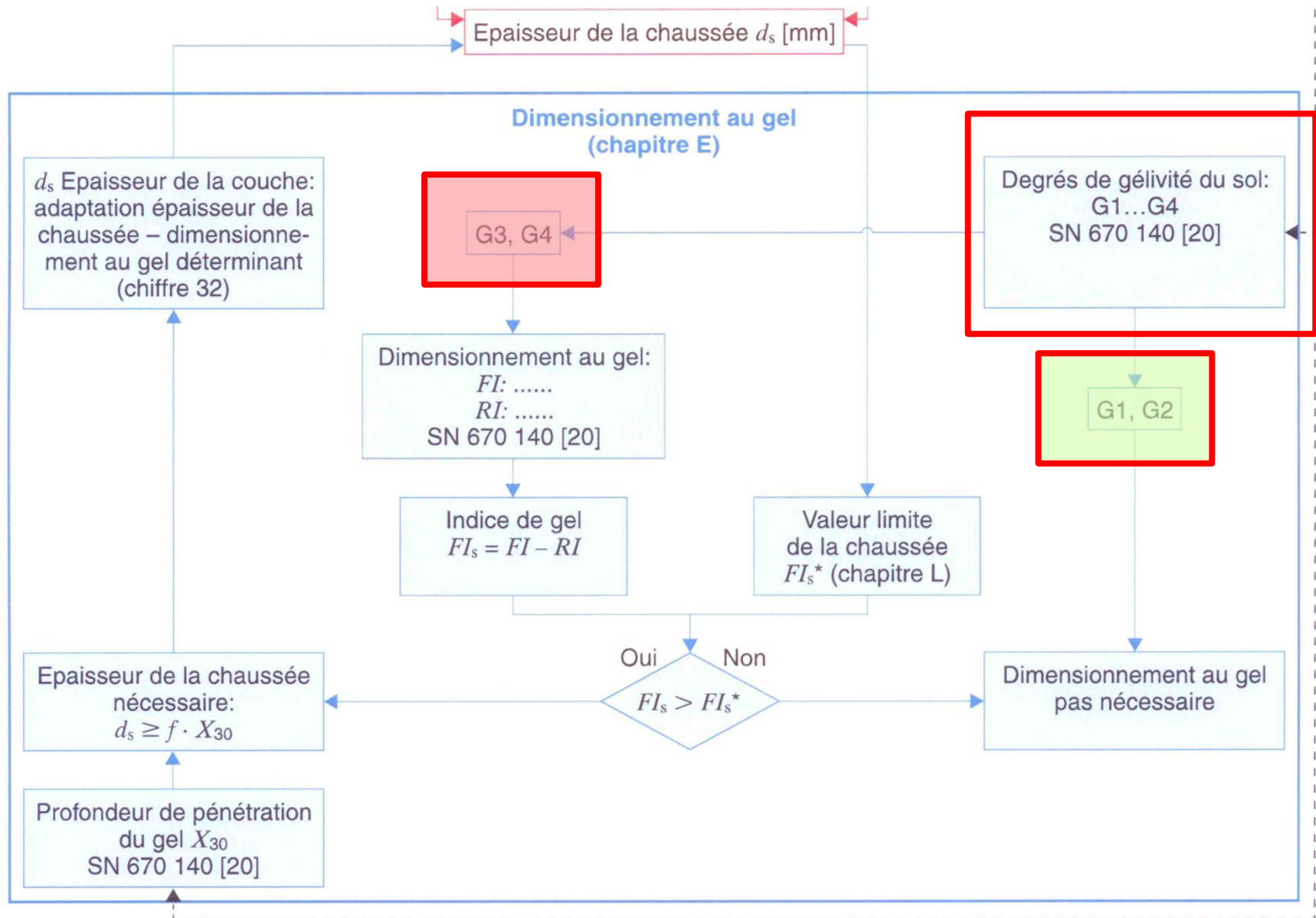
# Mesure de la profondeur de gel



# Exemple de relevé



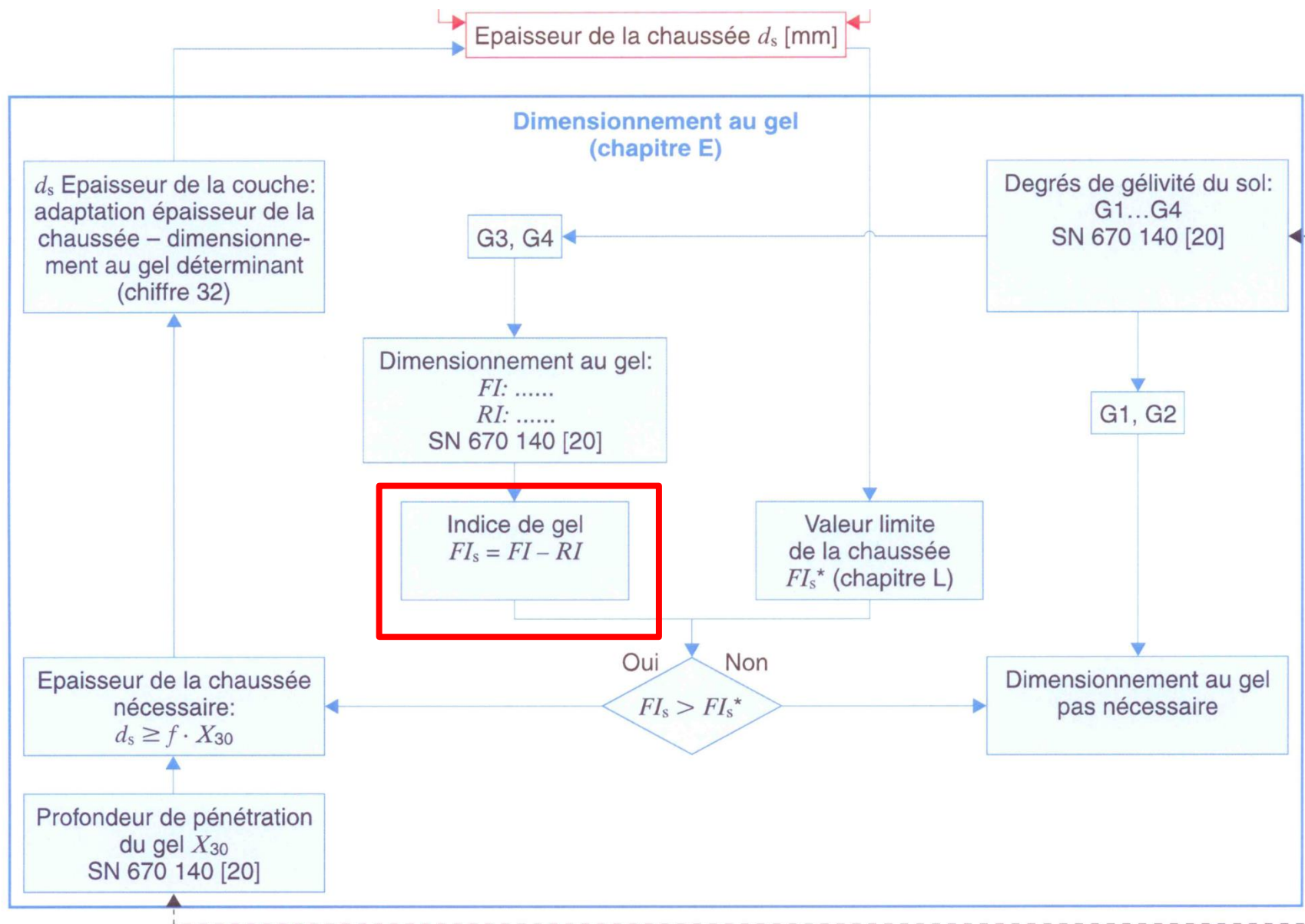
# Procédure de dimensionnement



# Degré de gélivité des sols

Degré de gélivité	Sols	Fraction plus petite que 0,02 mm (%)	Classification (SN 670 005a et 670 008a)
<b>G1</b> Très faible	Graviers	3...10 au-dessous de 3% le sol n'est pas gélif	GW,GP,GM,GC
<b>G2</b> Faible	Graviers	10...20	GM,GC-CL,GM-GC,GM-ML
	Sables	3...15	SW,SP,SM,SC
<b>G3</b> Moyen	Graviers	> 20	GC-CL,GM-GC,GM-ML
	Sables (très fins et limoneux exceptés)	> 15	SC-CL, SM-SC,SM-ML
	Argiles (IP > 12)	-	CL,CH
<b>G4</b> Fort	Limons	-	ML,MH
	Sables limoneux très fins	> 15	SM-ML
	Limons argileux (indice de plasticité > 12)	-	CL,CL-ML
	Argiles stratifiées et autres sédiments stratifiés à grains fins	-	En alternance : CL,ML CL,ML,SM CL,CH,ML CL,CH,ML,SM

# Procédure de dimensionnement





# Indice de gel de la route

$$FI_s = FI - RI$$

## ▶ $FI_s$

▶ Indice de gel de la route

## ▶ FI

▶ Indice de gel de l'air obtenu par des mesures ou par la carte de Suisse des indices de gel de l'air

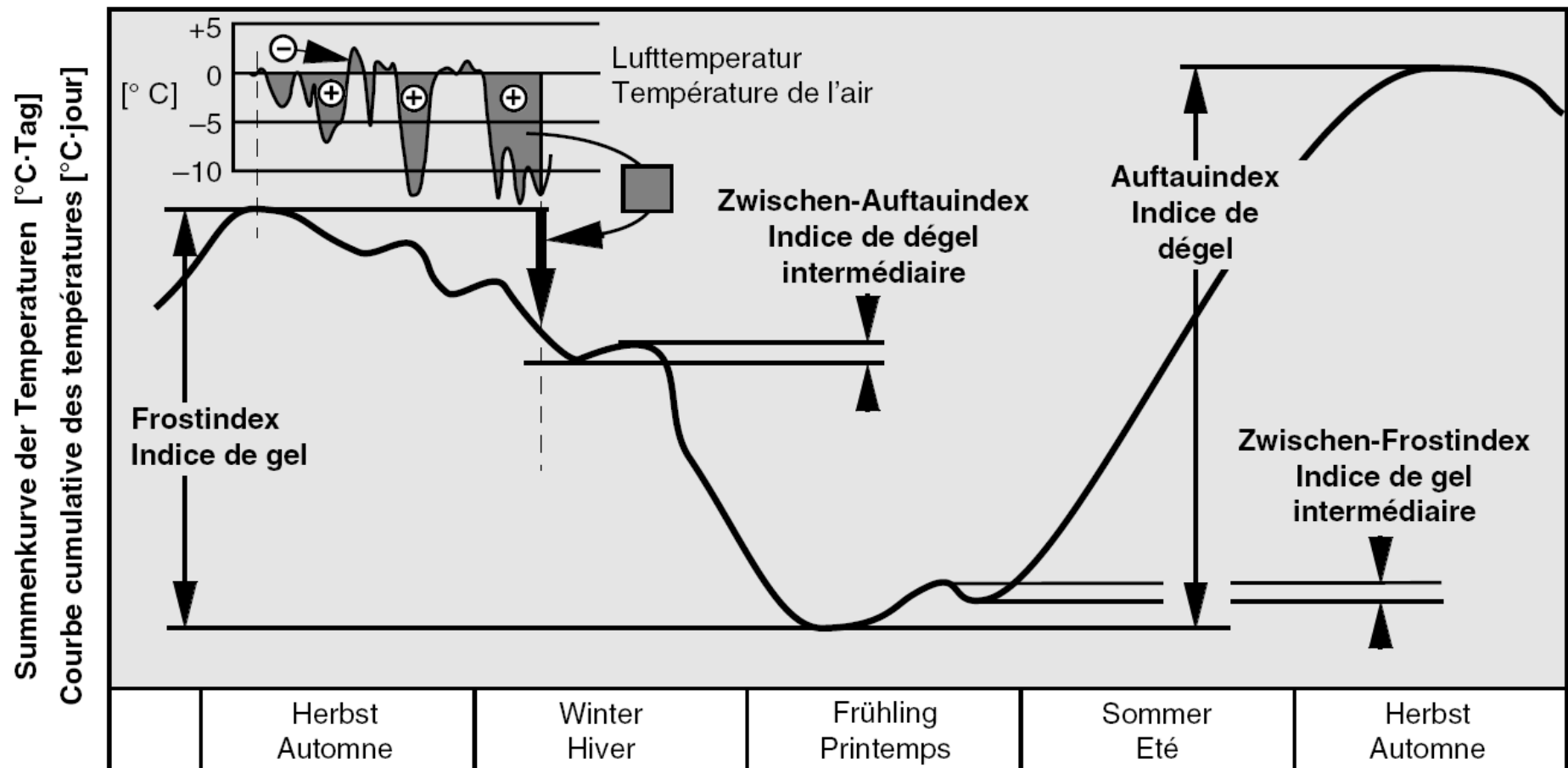
## ▶ RI

▶ Indice de radiation → ensoleillement de la chaussée

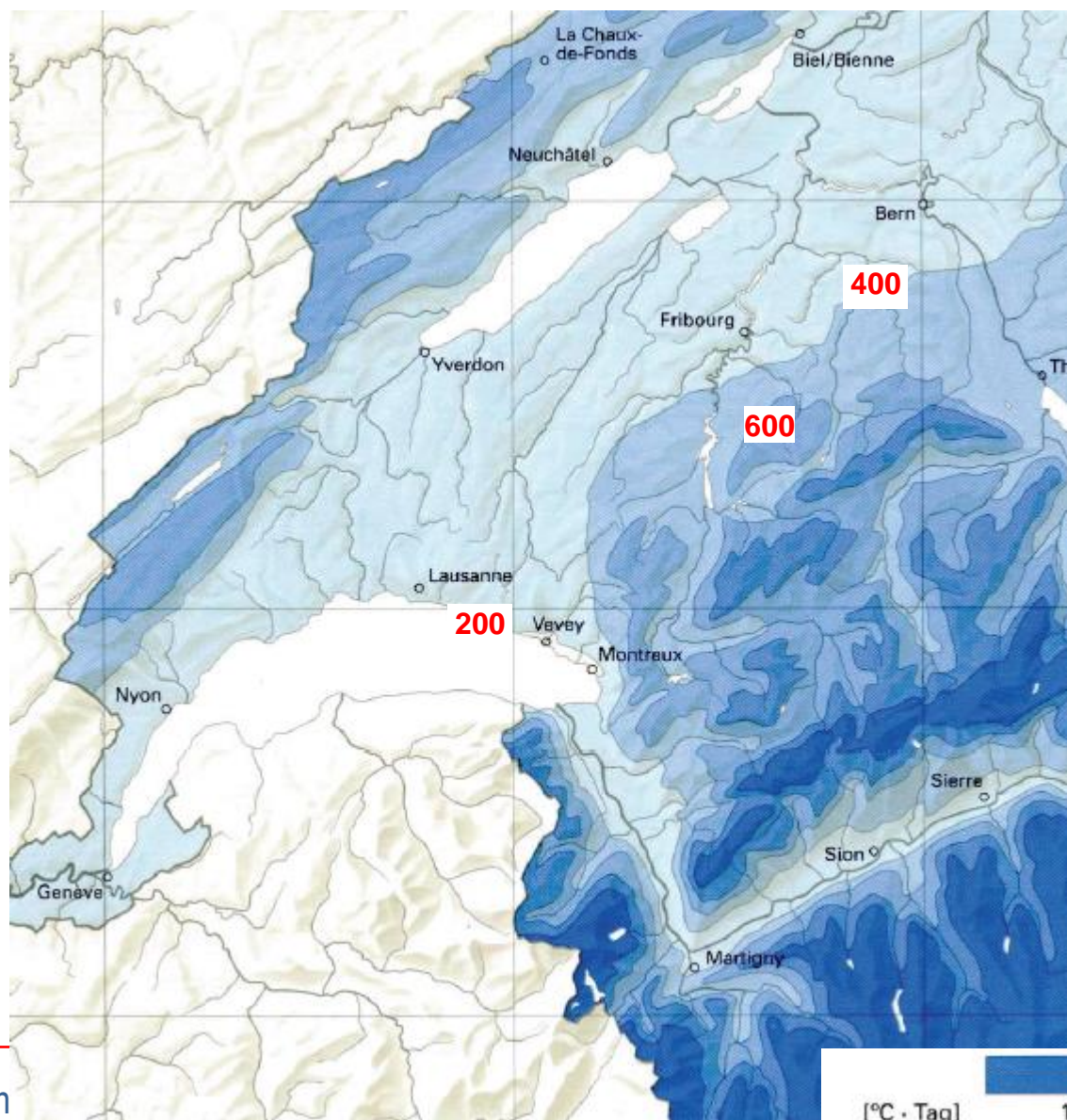
## ▶ Unité    °C·jour

# Indice de gel de l'air FI

- Différence entre le maximum et le minimum de la courbe cumulative durant la période de gel



# Indice de gel de l'air FI (Suisse)



[°C · Tag]

1000

800

600

400

200

[°C · jour]

de circulation - A

# Indice de gel de l'air FI (Québec / France)

## ► Québec

► Montréal 1'000 °C.j

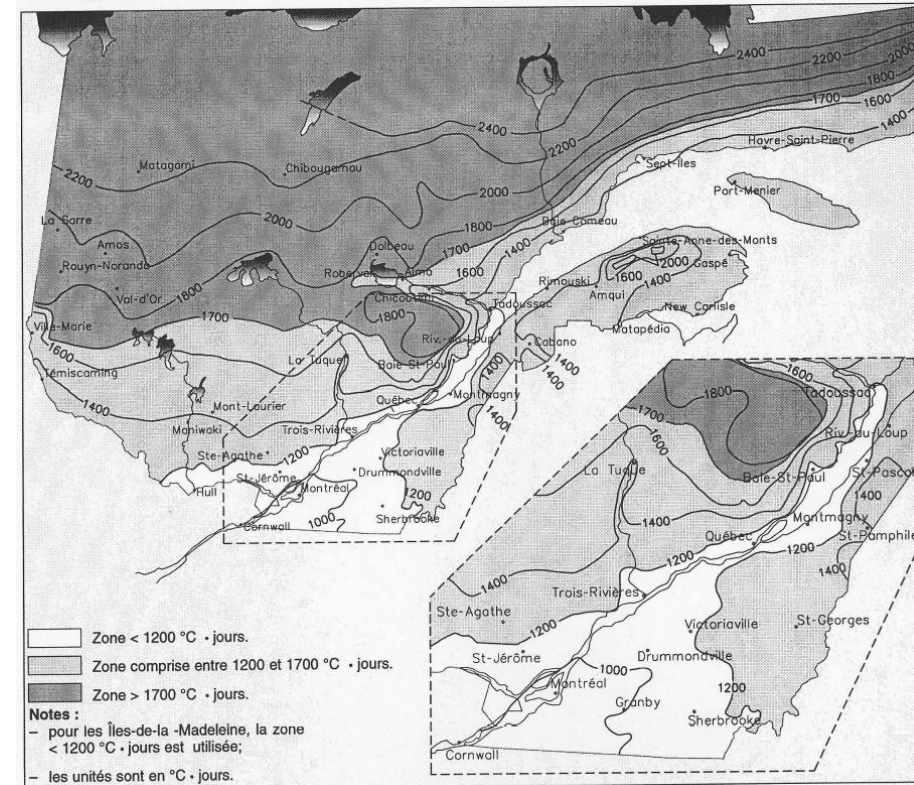
► Québec 1'200 °C.j

## ► France

► Bordeaux / Nantes 13 °C.j

► Paris 36 °C.j

► Strasbourg 67 °C.j

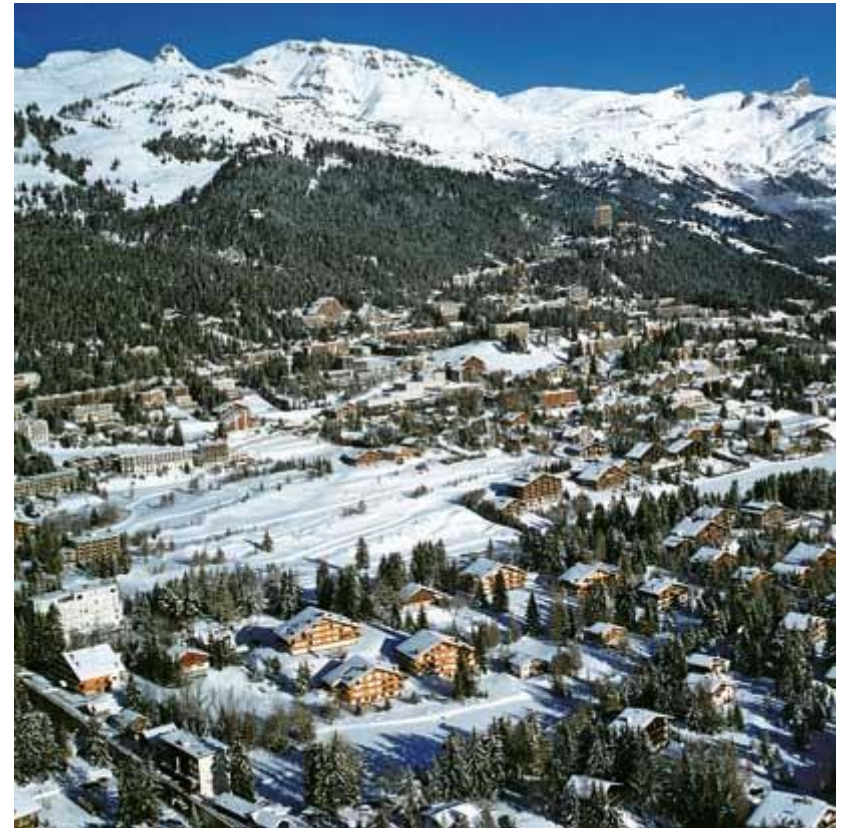




# Indice de radiation RI

## ► Energie fournie par le soleil

### ► Moyenne de la durée d'ensoleillement durant les mois d'hiver



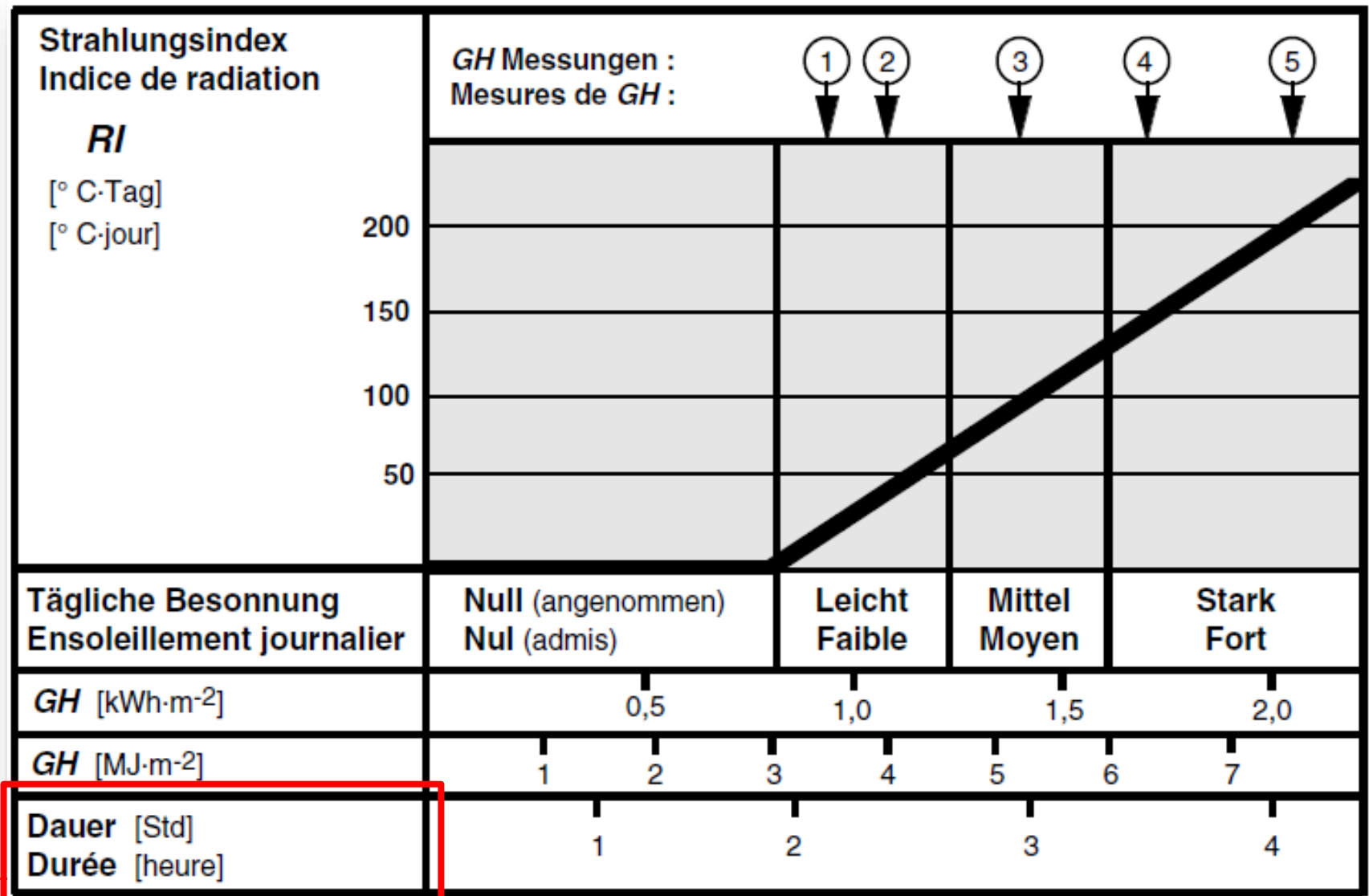
# Indice de radiation RI

## ► Energie fournie par le soleil

### ►► Différence ubac - adret

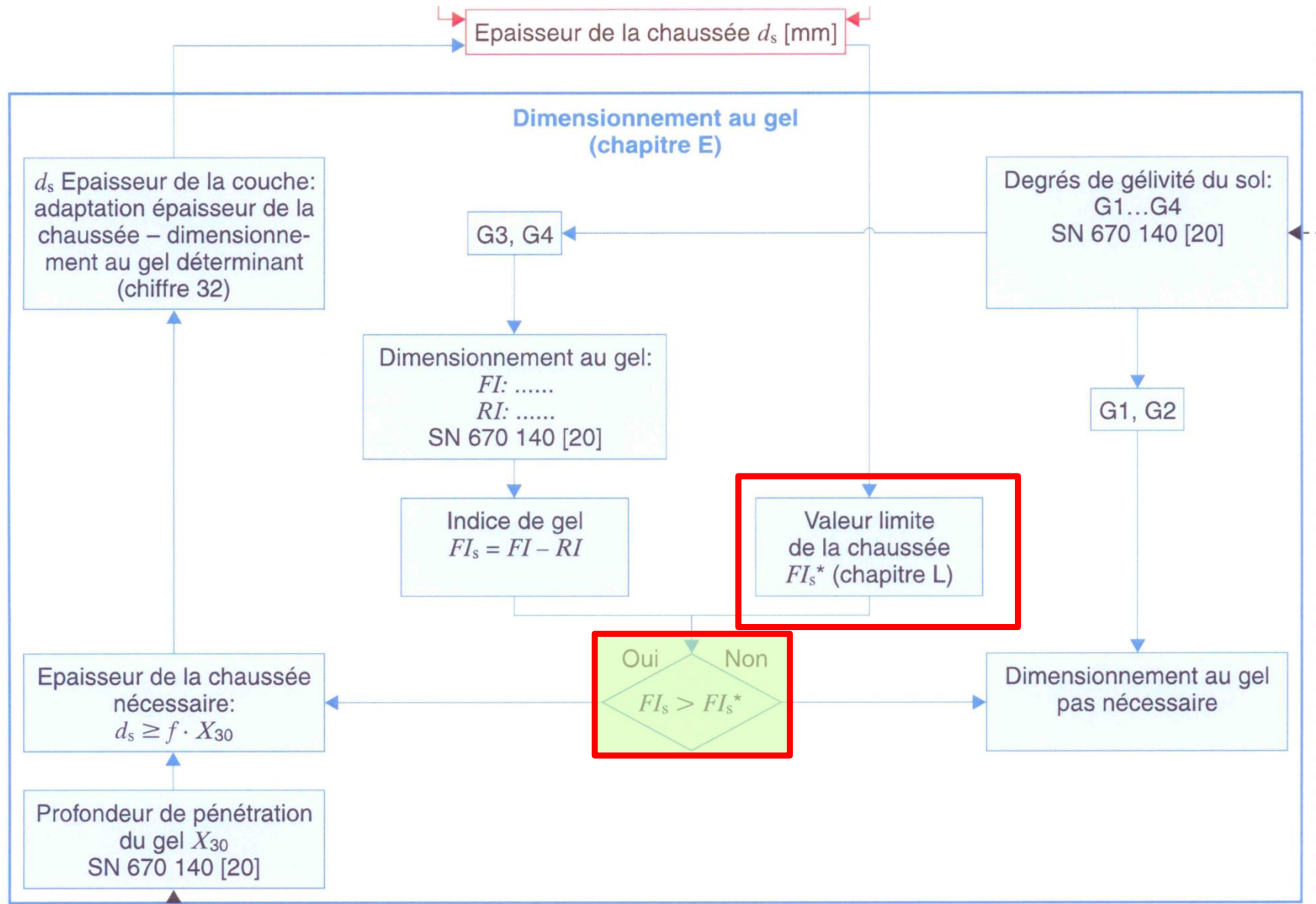


# Indice de radiation RI





# Procédure de dimensionnement

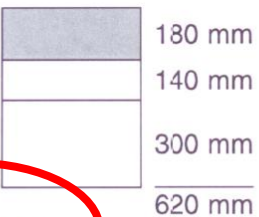
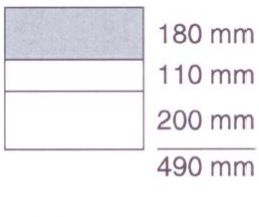
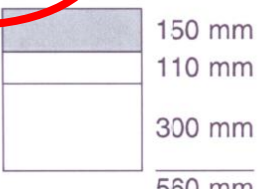
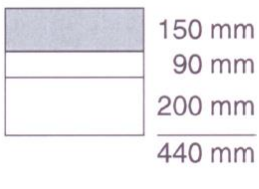




# Indice critique de gel de la route

►  $FI_s^*$

## ► Indice critique de gel de la surface de la route

Type de chaussée 2		Couche(s) en enrobé bitumineux sur enrobés bitumineux pour couches de fondation AC F et grave non traitée				
Ti <sub>20</sub>	Tragfähigkeitsdimensionierung Dimensionnement de la portance			Frostdimensionierung Dimensionnement au gel		
	S2	S3	S4	Frost-indices Indices de gel FI <sub>s</sub>	Frostdimensionierungsfaktor f Facteur de dimensionnement f G3	G4
T6 <sub>20</sub>						
$FI_s^*$	300	200				
T5 <sub>20</sub>				< 400 400...600 > 600	0,45 0,45 0,50	0,55 0,55 0,60

# Indice critique de gel de la route

►  $F_{i_s} < F_{i_s}^*$

⇒ pas de dimensionnement au gel

►  $F_{i_s} \geq F_{i_s}^*$

⇒ dimensionnement au gel nécessaire

```

graph TD
    A[Degrés de gélivité du sol:  
G1...G4  
SN 670 140 [20]] --> B{G1, G2 / G3, G4}
    B -- G1, G2 --> C[Dimensionnement au gel pas nécessaire]
    B -- G3, G4 --> D[Dimensionnement au gel:  
FI: .....  
RI: .....  
SN 670 140 [20]]
    D --> E[Indice de gel  
FI_s = FI - RI]
    E --> F{FI_s > FI_s*}
    F -- Oui --> G[Epaisseur de la chaussée nécessaire:  
d_s ≥ f · X_30]
    F -- Non --> C
    G --> H[Epaisseur de la chaussée d_s [mm]]
    
```

**Dimensionnement au gel (chapitre E)**

Degrés de gélivité du sol:  
G1...G4  
SN 670 140 [20]

G3, G4

Dimensionnement au gel:  
 $FI$ : .....  
 $RI$ : .....  
SN 670 140 [20]

Indice de gel  
 $FI_s = FI - RI$

Valeur limite de la chaussée  
 $FI_s^*$  (chapitre L)

Oui Non

$FI_s > FI_s^*$

Epaisseur de la chaussée nécessaire:  
 $d_s \geq f \cdot X_{30}$

Profondeur de pénétration du gel  $X_{30}$   
SN 670 140 [20]

Dimensionnement au gel pas nécessaire

Epaisseur de la chaussée  $d_s$  [mm]

$d_s$  Epaisseur de la couche: adaptation épaisseur de la chaussée – dimensionnement au gel déterminant (chiffre 32)

# Vérification de la profondeur de gel

$$d_s \geq f \cdot X_{30}$$

►  $d_s$

► épaisseur de la chaussée (cm)

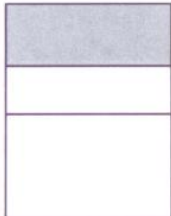
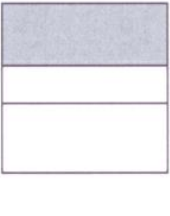
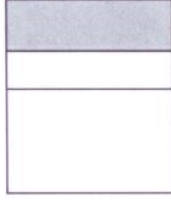
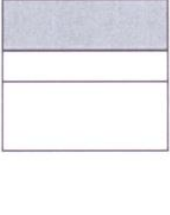
►  $f$

► facteur de dimensionnement au gel présentés dans le catalogue des types de chaussée et fct de  $T_i$ ,  $S_i$  et  $FI_s$

►  $X_{30}$

► profondeur de gel moyenne des trois hivers les plus froids sur une période de 30 ans

# Facteur de dimensionnement au gel $f$

Type de chaussée 2		Couche(s) en enrobé bitumineux sur enrobés bitumineux pour couches de fondation AC F et grave non traitée				
	Tragfähigkeitsdimensionierung Dimensionnement de la portance			Frostdimensionierung Dimensionnement au gel		
				Frost-indices Indices de gel $FI_s$	Frostdimensionierungsfaktor $f$ Facteur de dimensionnement $f$ G3	G4
Ti <sub>20</sub>	S2	S3	S4			
T6 <sub>20</sub>						
$FI_s^*$	300	200				
T5 <sub>20</sub>						
	560 mm	440 mm				
				<div>&lt; 400</div> <div>400...600</div> <div>&gt; 600</div>	<div>0,45</div> <div>0,45</div> <div>0,50</div>	<div>0,55</div> <div>0,55</div> <div>0,60</div>

# Profondeur de gel $X_{30}$

## ► Relevés in situ

## ► Tabelles

►►  $d_s$

►►  $Fi_s$

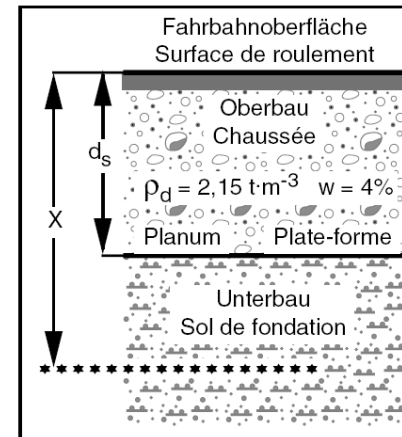
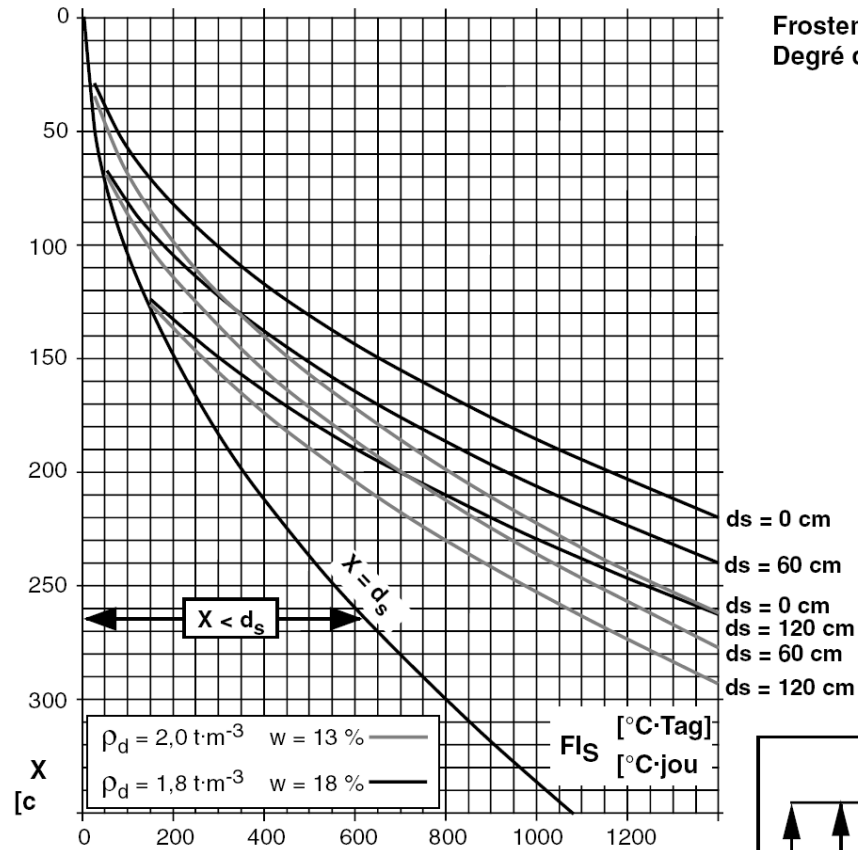
►►  $W$

►►  $G_i$

# Profondeur de gel $X_{30}$

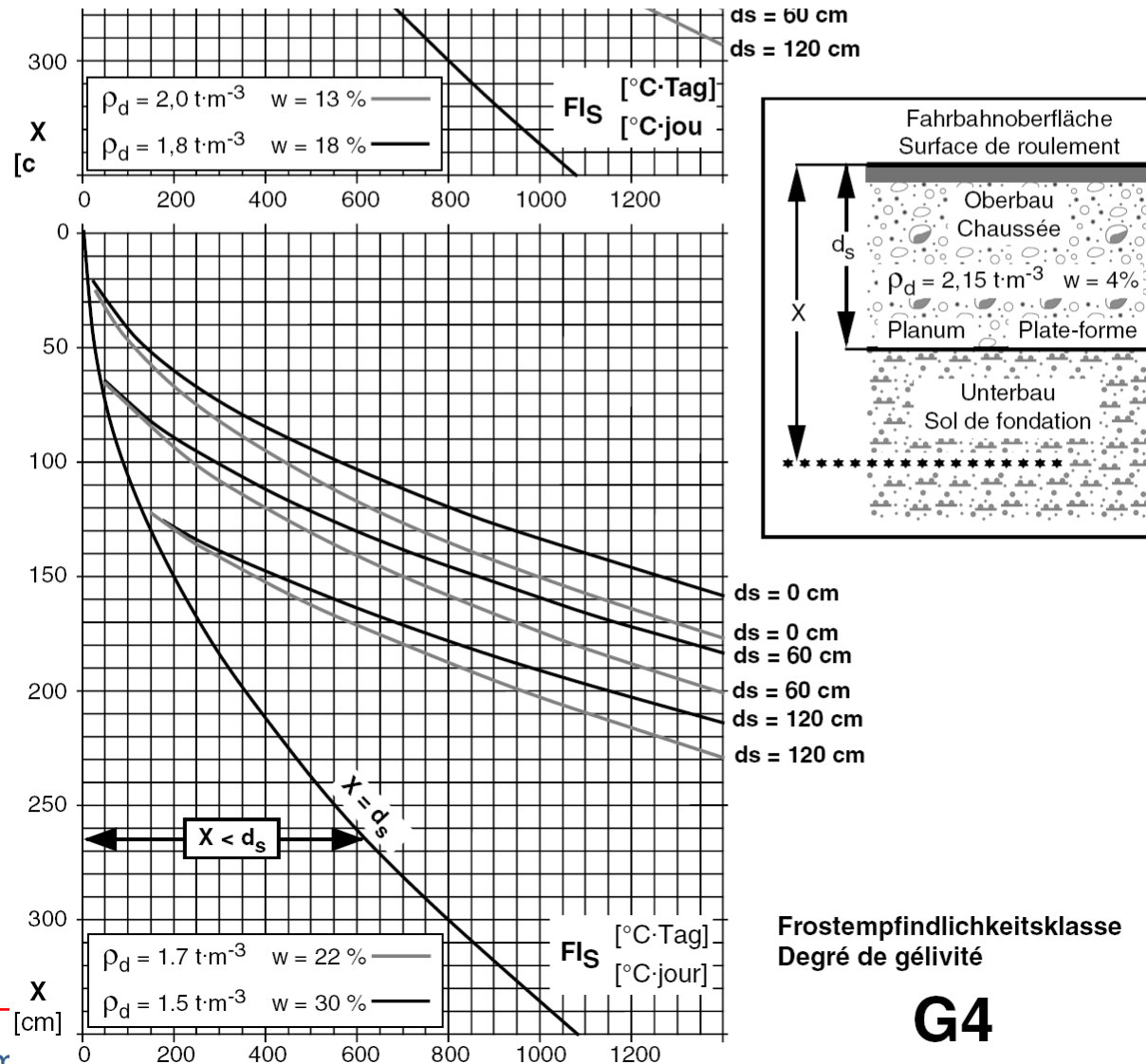
Frostempfindlichkeitsklasse  
Degré de gélivité

**G3**





# Profondeur de gel $X_{30}$



Frostempfindlichkeitsklasse  
Degré de gélivité

**G4**



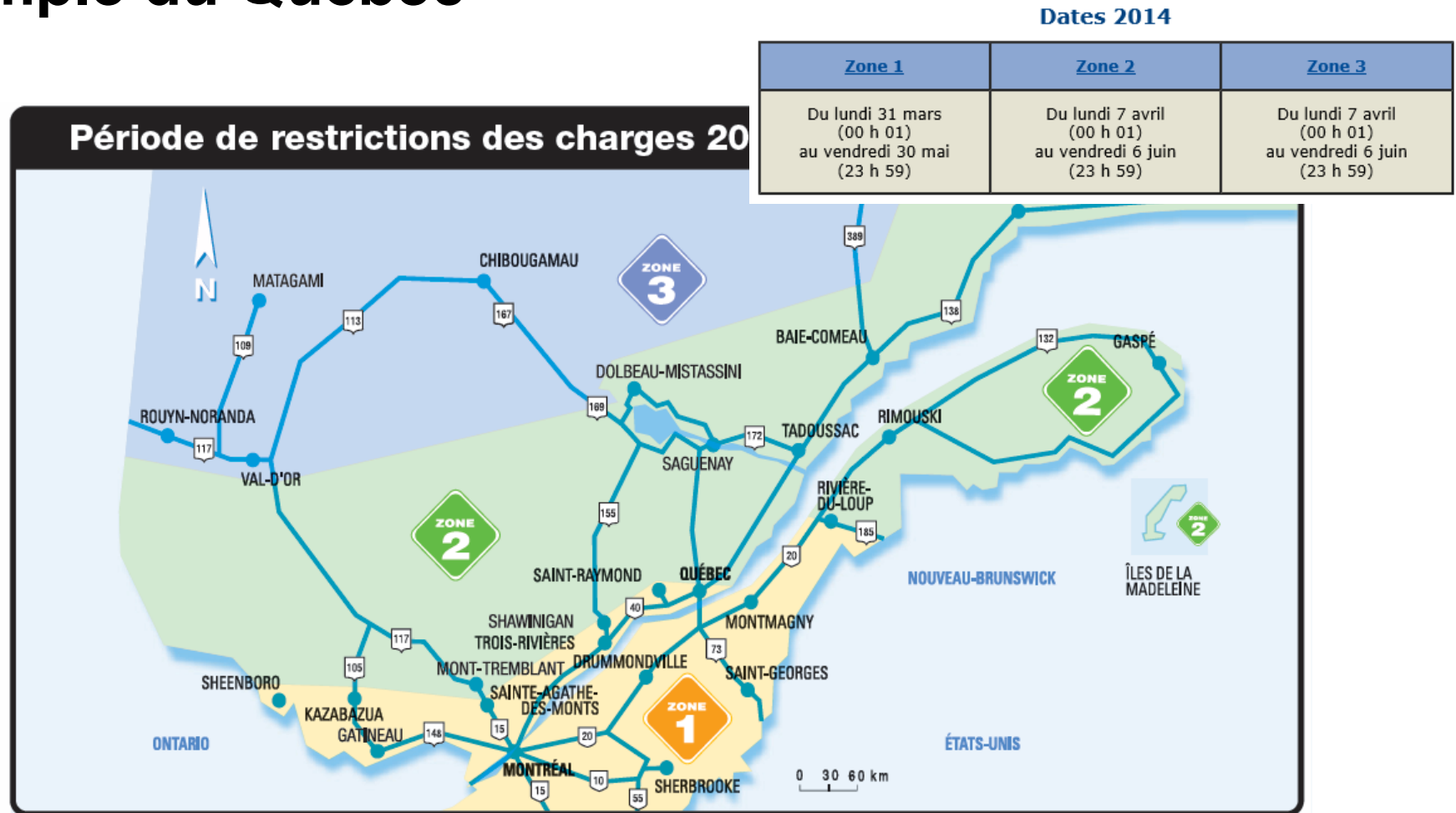
# Mesures

- ▶ Augmentation de l'épaisseur de la chaussée  $d_s$  obtenue par le dimensionnement à la portance
- ▶ Changement de type de chaussée
- ▶ Isolation thermique à la base de la couche de fondation
- ▶ Modification du tracé de la route afin de traverser une zone plus clémente quant aux conditions de gel
- ▶ Implantation d'une barrière de gel interdisant le trafic lourd lors des périodes de dégel



# Restriction de charges

## ► Exemple du Québec





**MERCI POUR VOTRE ATTENTION**