

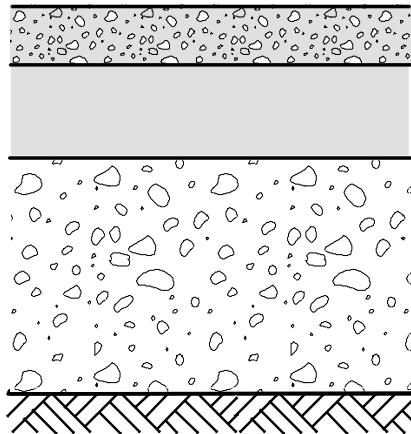
CIVIL-454.07

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

► 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

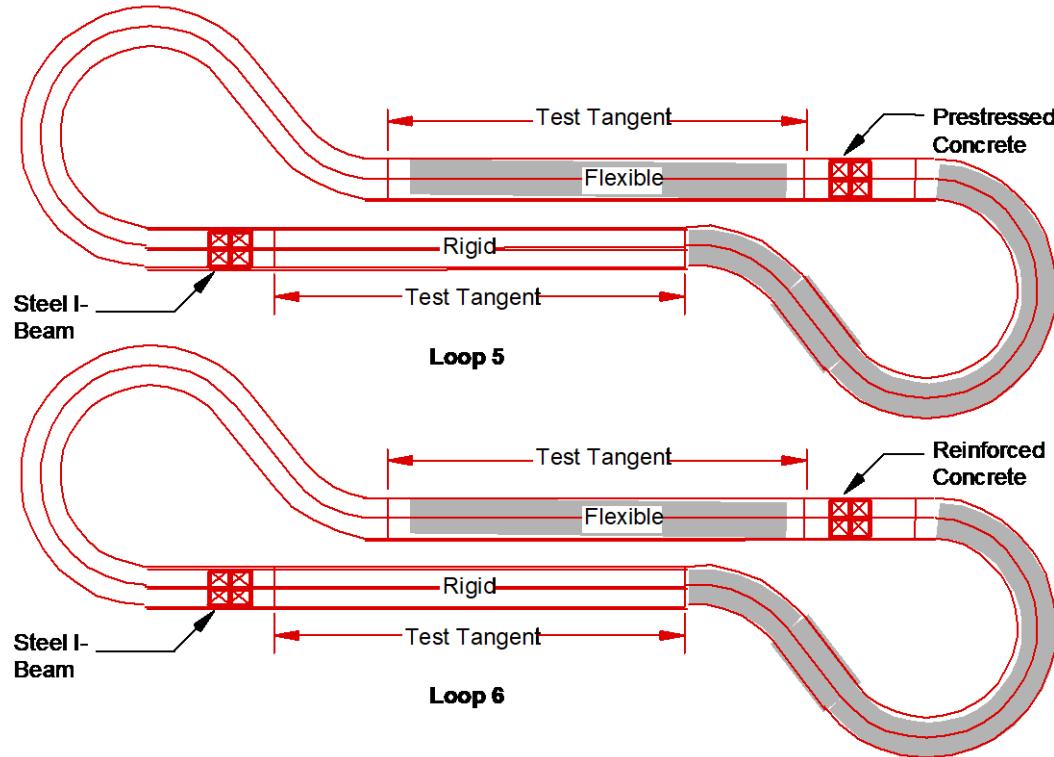
Au-delà, la chaussée n'offre plus les qualités fonctionnelles et structurales pour lesquelles elle est conçue

► Durée de vie de 20 ans

Perte de portance d'une chaussée



Essai AASHTO



Dimensionnement de la chaussée

► Déterminer pour chaque couche

» Composition

- Matériaux

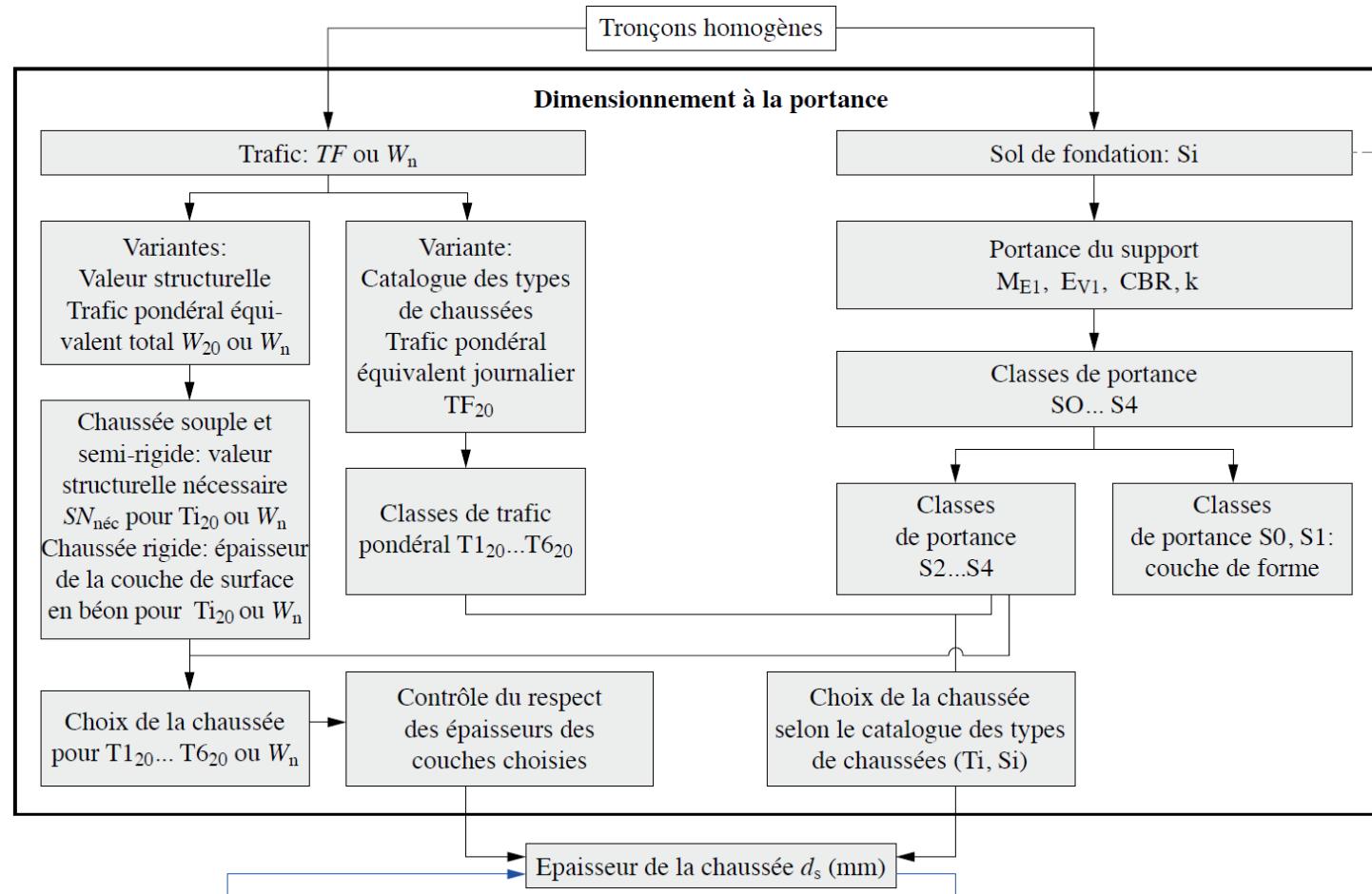
» Épaisseur

- cm

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

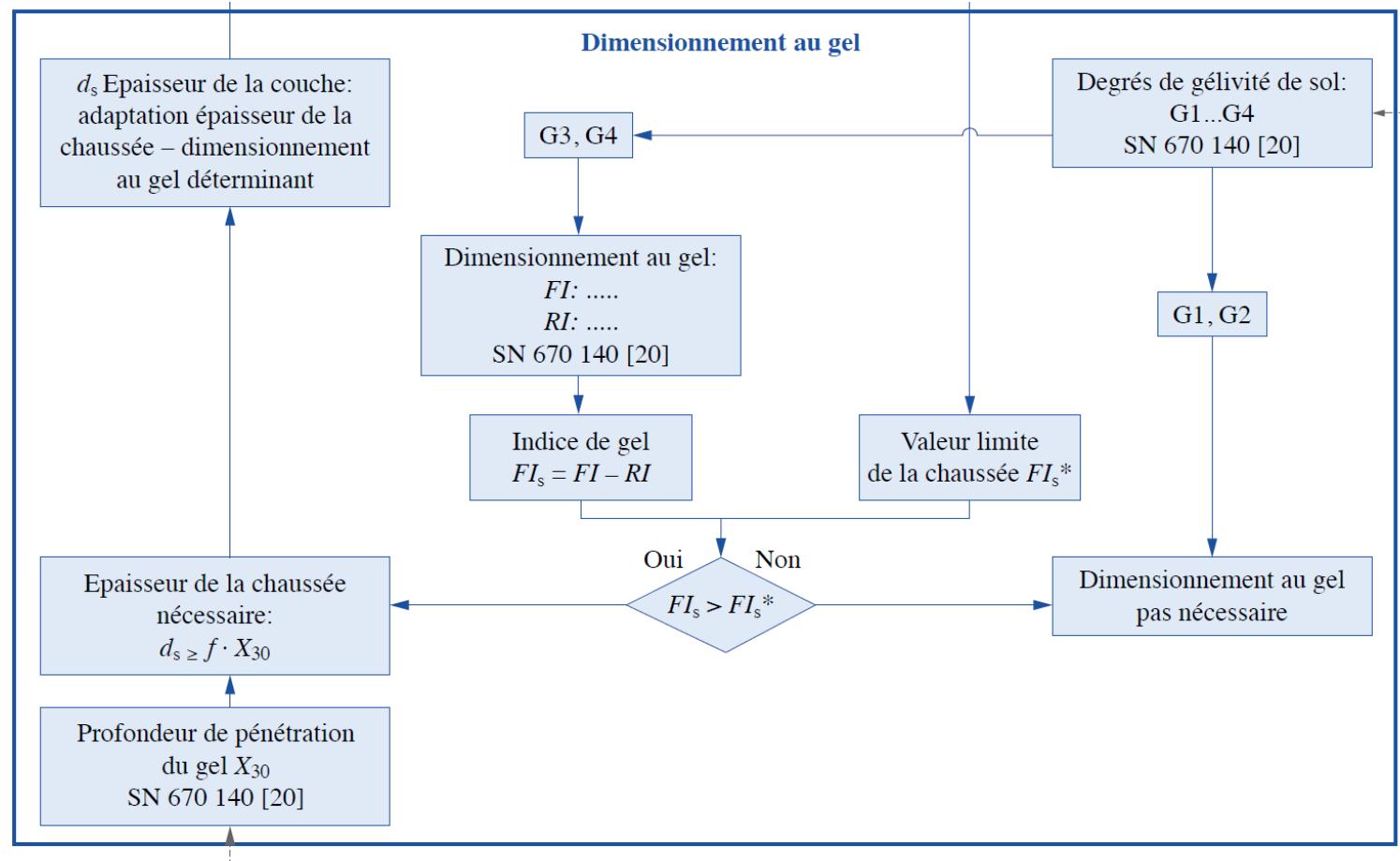
Procédure de dimensionnement

► 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

≡

□ Dégradation due à

$K_i \times$ Charge d'essieu P_{ref}

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

□ $\alpha \approx 4$

□ $P_{ref} = ESAL = 8,16 \text{ tonnes} \approx 81 \text{ kN}$

Facteur d'équivalence

► Coefficient de charge α

► Configuration des essieux

► Type de superstructure

► Formule exacte de K_i pour un revêtement souple

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

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

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

Compliqué !

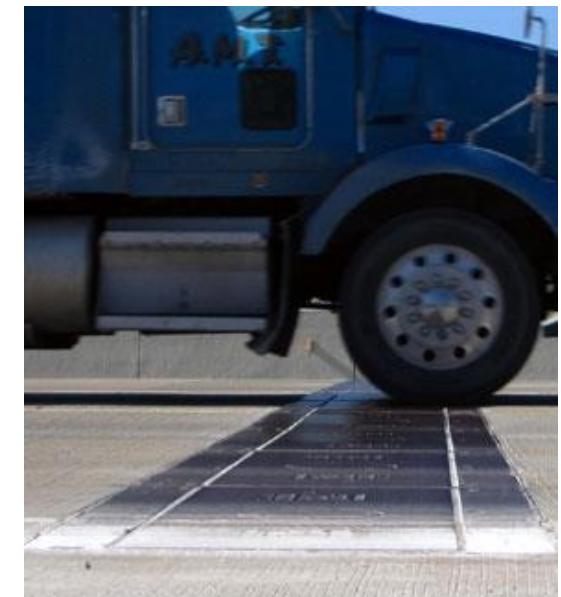
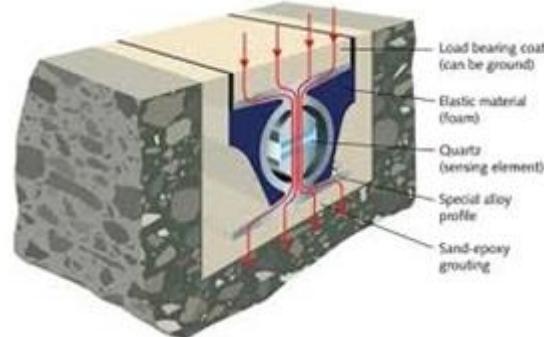
Facteur d'équivalence

Charge d'essieu (<i>t</i>)	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

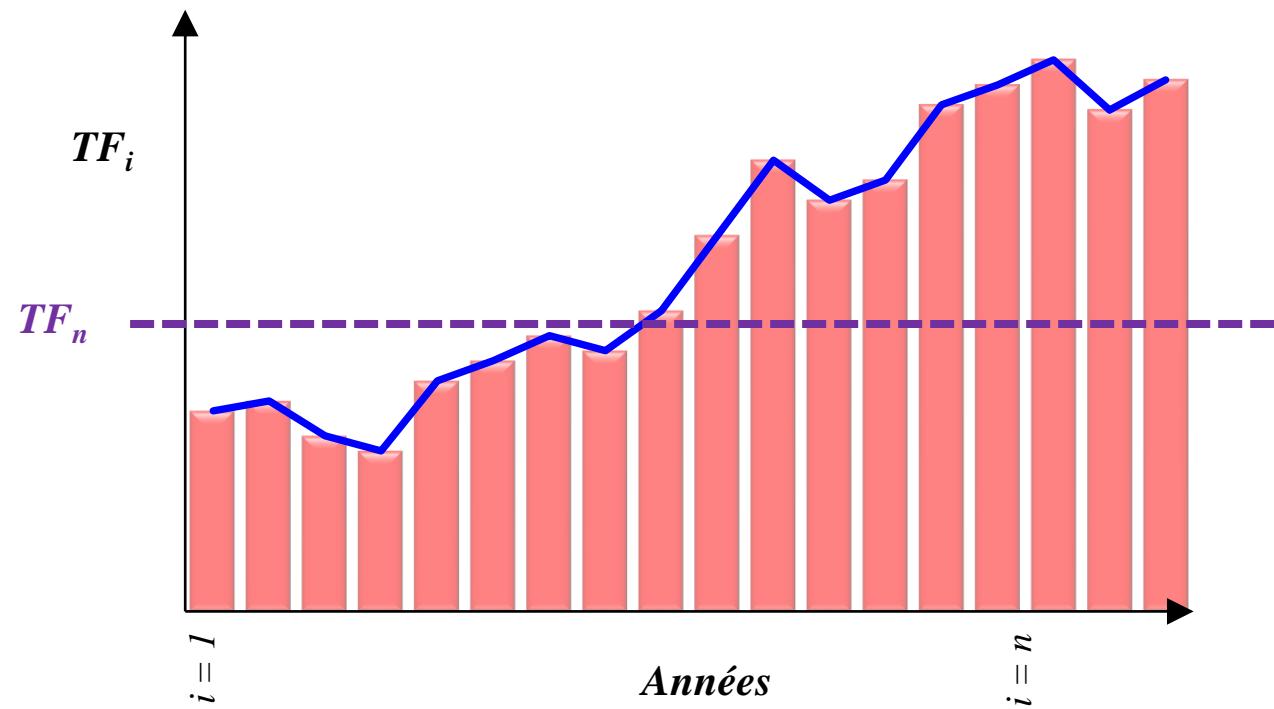


Détermination de TF

► Evolution générale

- Durée de vie de **20 ans** en général
- Ne pas oublier l'accroissement du trafic !

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



Détermination de TF

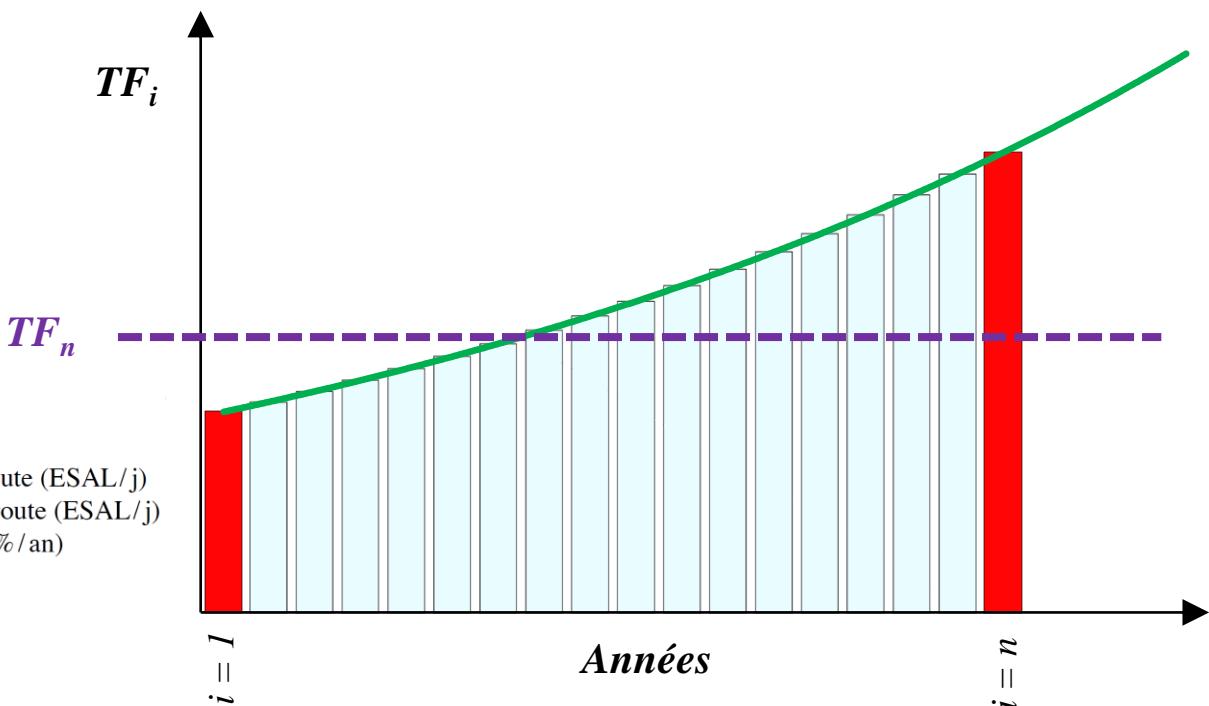
► Evolution généralement rencontrée

- » 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
 TF_1
 t_c
 n

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



Répartition entre voies

- ▶ Charge pondérée en un endroit donné de la chaussée
- ▶ Distribution moyenne



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)
$T1_{20}$	très léger	≤ 30	$\leq 220'000$
$T2_{20}$	léger	30 à 100	220'000 à 730'000
$T3_{20}$	moyen	100 à 300	730'000 à 2'200'000
$T4_{20}$	lourd	300 à 1'000	2'200'000 à 7'300'000
$T5_{20}$	très lourd	1'000 à 3'000	7'300'000 à 22'00'000
$T6_{20}$	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 ME₁ (MN/m ²)	Module E_{v1} (MN/m ²)	CBR (%)	k (MN/m ³)	Type de sol
S0	portance très faible	< 6	< 4,5	< 3	< 15	sols très fins
S1	portance faible	6 à 15	4,5 à 11,25	3 à 6	15 à 30	sols fins (limons et argiles)
S2	portance moyenne	15 à 30	11,25 à 22,5	6 à 12	30 à 60	sols à granulométrie moyenne (sables)
S3	portance élevée	30 à 60	22,5 à 45	12 à 25	60 à 100	sables et sols grossiers
S4	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

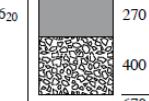
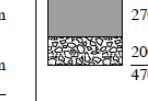
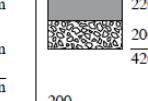
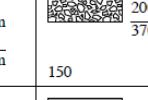
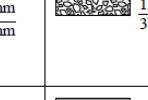
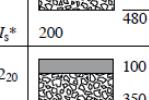
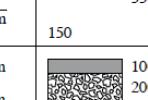
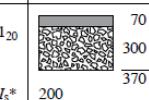
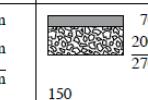
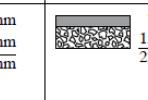
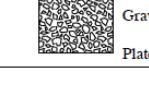
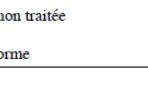
► 6 types de superstructure

► Classes de portance S2 à S4

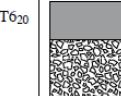
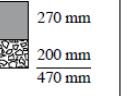
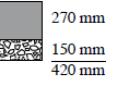
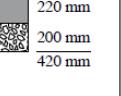
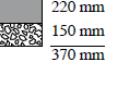
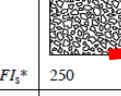
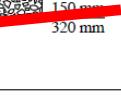
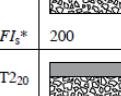
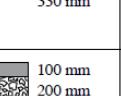
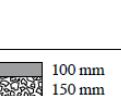
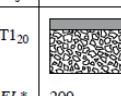
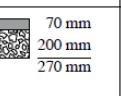
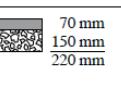
Type de chaussée	Libellé
Chaussée souple et semi-rigide	
1	Couches en enrobé bitumineux sur grave non traitée
2	Couches en enrobé bitumineux sur couche de fondation à chaud AC F et grave non traitée
3	Couches en enrobé bitumineux sur couche de fondation à chaud AC F
4	Couches en enrobé bitumineux sur 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						
Tr ₂₀	Dimensionnement de la portance			Dimensionnement au gel		
	S2	S3	S4	Indices de gel	Facteur de dimensionnement <i>f</i>	
T6 ₂₀	 <i>FI_s*</i> 300	 200	 270 mm			
T5 ₂₀	 <i>FI_s*</i> 250	 200	 220 mm	< 400 400...600 > 600	0,50 0,50 0,55	0,60 0,60 0,65
T4 ₂₀	 <i>FI_s*</i> 250	 150	 170 mm			
T3 ₂₀	 <i>FI_s*</i> 200	 150	 130 mm			
T2 ₂₀	 <i>FI_s*</i> 200	 150	 100 mm	< 400 400...600 > 600	0,45 0,45 0,50	0,55 0,55 0,60
T1 ₂₀	 <i>FI_s*</i> 200	 150	 70 mm			
 Couche(s) en enrobé bitumineux Grave non traitée Plate-forme			<i>FI_s*</i> Indices critiques de gel selon le chiffre 29			

Catalogue des types de superstructure

Type de chaussée 1 Couche(s) en enrobé bitumineux sur grave non traitée									
Ti ₂₀	Dimensionnement de la portance			Dimensionnement au gel					
	S2	S3	S4	Indices de gel	Facteur de dimensionnement <i>f</i>				
				<i>FI_s</i>	G3	G4			
T6 ₂₀	 270 mm 400 mm 670 mm	 270 mm 200 mm 470 mm	 270 mm 150 mm 420 mm	<i>FI_s*</i> 300 <i>FI_s*</i> 250 <i>FI_s*</i> 250 <i>FI_s*</i> 200 <i>FI_s*</i> 150 <i>FI_s*</i> 150	< 400 400...600 > 600	0,50 0,50 0,55	0,60 0,60 0,65		
T5 ₂₀	 220 mm 400 mm 620 mm	 220 mm 200 mm 420 mm	 220 mm 150 mm 370 mm						
T4 ₂₀	 170 mm 400 mm 570 mm	 170 mm 200 mm 500 mm	 170 mm 150 mm 320 mm						
T3 ₂₀	 130 mm 350 mm 480 mm	 130 mm 200 mm 330 mm	 130 mm 150 mm 280 mm						
T2 ₂₀	 100 mm 350 mm 450 mm	 100 mm 200 mm 300 mm	 100 mm 150 mm 250 mm						
T1 ₂₀	 70 mm 300 mm 370 mm	 70 mm 200 mm 270 mm	 70 mm 150 mm 220 mm						
 Couche(s) en enrobé bitumineux			<i>FI_s*</i> Indices critiques de gel selon le chiffre 29						
 Grave non traitée									
 Plate-forme									

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 AC, AC T, AC MR Splittmastix-asphalt SMA Asphalte coulé MA	4,0	3,4	2,8	2,4
Couche de roulement et de liaison				
Enrobé drainant PA	2,6	2,2	1,8	1,6
Couche de base				
Enrobés bitumineux à module élevé AC EME C1 ¹⁾	4,4	3,8	2,8	2,4
Enrobés bitumineux à module élevé AC EME C2 ¹⁾	5,6	5,0		
Couche de fondation				
Enrobé bitumineux AC F	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 ²⁾
Grave ronde	1,0	1,0	1,0	0,6²⁾

Exemple : calcul de SN

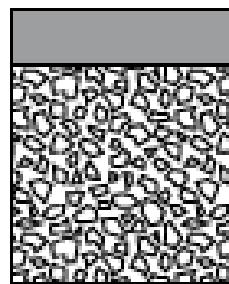
► Chaussée avec 3 couches

► 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 Faïençage / Déformation
Couche de roulement, de liaison et de base				
Enrobés bitumineux AC, AC T, AC MR Splitmastic-asphalt SMA Asphalte coulé MA	4,0	3,4	2,8	2,4
Couche de roulement et de liaison				
Enrobé drainant PA	2,6	2,2	1,8	1,6
Couche de base				
Enrobés bitumineux à module élevé AC EME C1 ¹⁾	4,4	3,8	2,8	2,4
Enrobés bitumineux à module élevé AC EME C2 ¹⁾	5,6	5,0		
Couche de fondation				
Enrobé bitumineux AC F	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 ²⁾
Grave ronde	1,0	1,0	1,0	0,6 ²⁾



Couche(s) en enrobé bitumineux

Grave non traitée

Plate-forme

Valeur de structure nécessaire

- ▶ Dimensionnement selon T_{i20}
- ▶ Dépend de 2 paramètres
 - » Classe de trafic pondéral / Classe de portance
- ▶ Donnée en cm de grave ronde non traitée

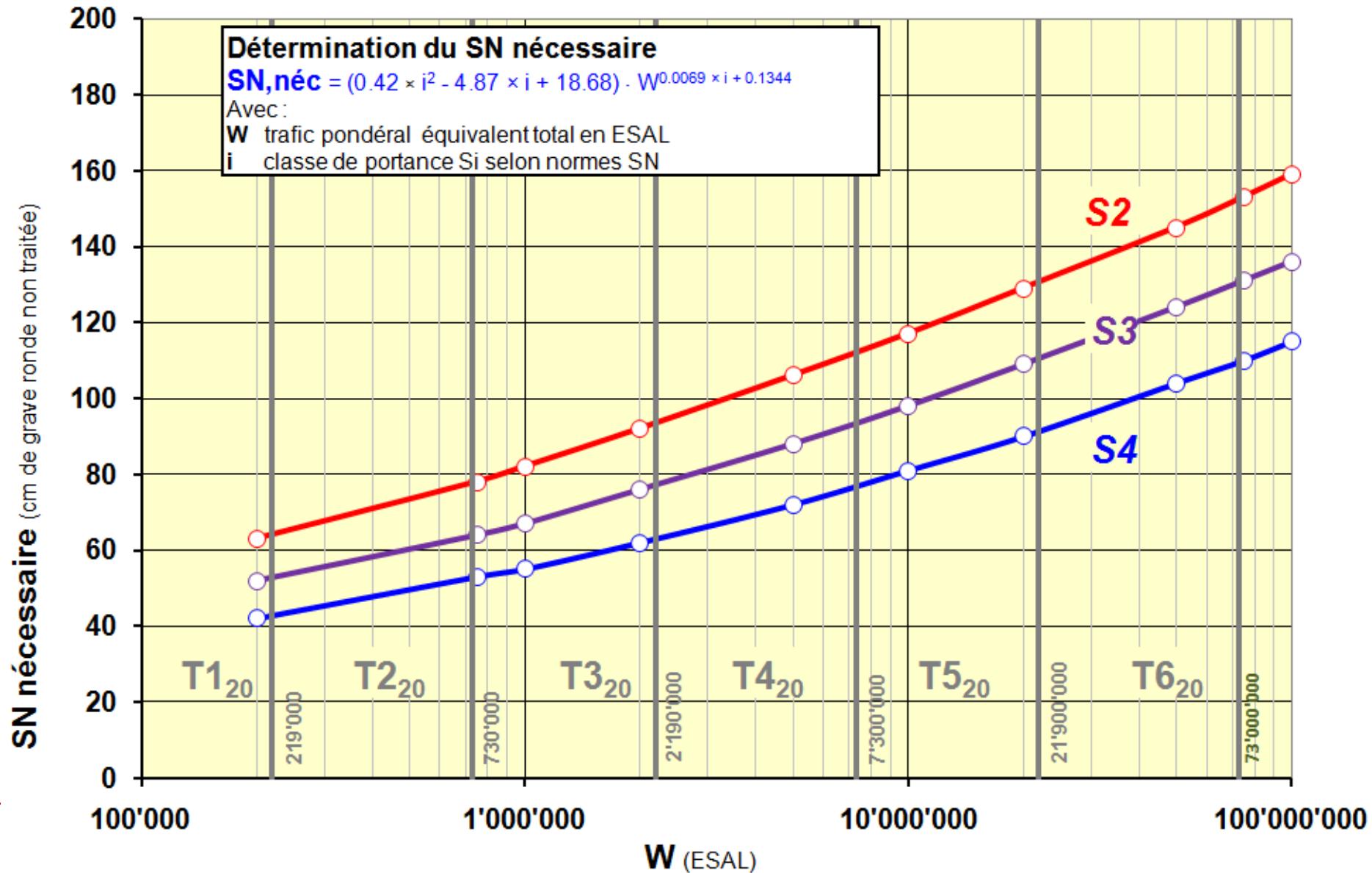
Classe de trafic pondéral	Classe de portance Si		
	S2	S3	S4
T_{120}	59	50	41
T_{220}	73	59	50
T_{320}	87	73	59
T_{420}	105	87	73
T_{520}	123	105	87
T_{620}	145	123	105

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
- ▶ $TF_{20} = 450 \text{ ESAL/j}$
- ▶ 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)
$T1_{20}$	très léger	≤ 30	$\leq 220'000$
$T2_{20}$	léger	30 à 100	220'000 à 730'000
$T3_{20}$	moyen	100 à 300	730'000 à 2'200'000
$T4_{20}$	lourd	300 à 1'000	2'200'000 à 7'300'000
$T5_{20}$	très lourd	1'000 à 3'000	7'300'000 à 22'00'000
$T6_{20}$	extrêmement lourd	3'000 à 10'000	22'00'000 à 73'00'000

► **T4₂₀**

Classes de portances

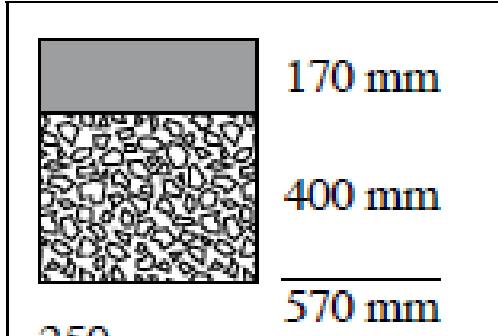
► Sol sableux – CBR 8 %

Classes de portance	Qualification	Module ME₁ (MN/m ²)	Module E_{v1} (MN/m ²)	CBR (%)	k (MN/m ³)	Type de sol
S0	portance très faible	< 6	< 4,5	< 3	< 15	sols très fins
S1	portance faible	6 à 15	4,5 à 11,25	3 à 6	15 à 30	sols fins (limons et argiles)
S2	portance moyenne	15 à 30	11,25 à 22,5	6 à 12	30 à 60	sols à granulométrie moyenne (sables)
S3	portance élevée	30 à 60	22,5 à 45	12 à 25	60 à 100	sables et sols grossiers
S4	portance très élevée	> 60	> 45	> 25	> 100	sols grossiers (graviers)

► **S2**

Catalogue des types de superstructure

► S2 / T4₂₀



Type de chaussée 1 Couche(s) en enrobé bitumineux sur grave non traitée				Indices de gel	Dimensionnement au gel	
Dimensionnement de la portance					G3	G4
T _i ₂₀	S2	S3	S4	FI _s	G3	G4
T ₆ ₂₀	270 mm 400 mm 670 mm FI _s * 300	270 mm 200 mm 470 mm 200	270 mm 150 mm 420 mm	< 400 400...600 > 600	0,50 0,50 0,55	0,60 0,60 0,65
T ₅ ₂₀	220 mm 400 mm 620 mm FI _s * 250	220 mm 200 mm 420 mm 200	220 mm 150 mm 370 mm			
T ₄ ₂₀	170 mm 400 mm 570 mm FI _s * 250	170 mm 200 mm 370 mm 150	170 mm 150 mm 320 mm			
T ₃ ₂₀	130 mm 350 mm 480 mm FI _s * 200	130 mm 200 mm 330 mm 150	130 mm 150 mm 280 mm	< 400 400...600 > 600	0,45 0,45 0,50	0,55 0,55 0,60
T ₂ ₂₀	100 mm 350 mm 450 mm FI _s * 200	100 mm 200 mm 300 mm 150	100 mm 150 mm 250 mm			
T ₁ ₂₀	70 mm 300 mm 370 mm FI _s * 200	70 mm 200 mm 270 mm 150	70 mm 150 mm 220 mm			
Couche(s) en enrobé bitumineux Grave non traitée Plate-forme				FI _s * Indices critiques de gel selon le chiffre 29		

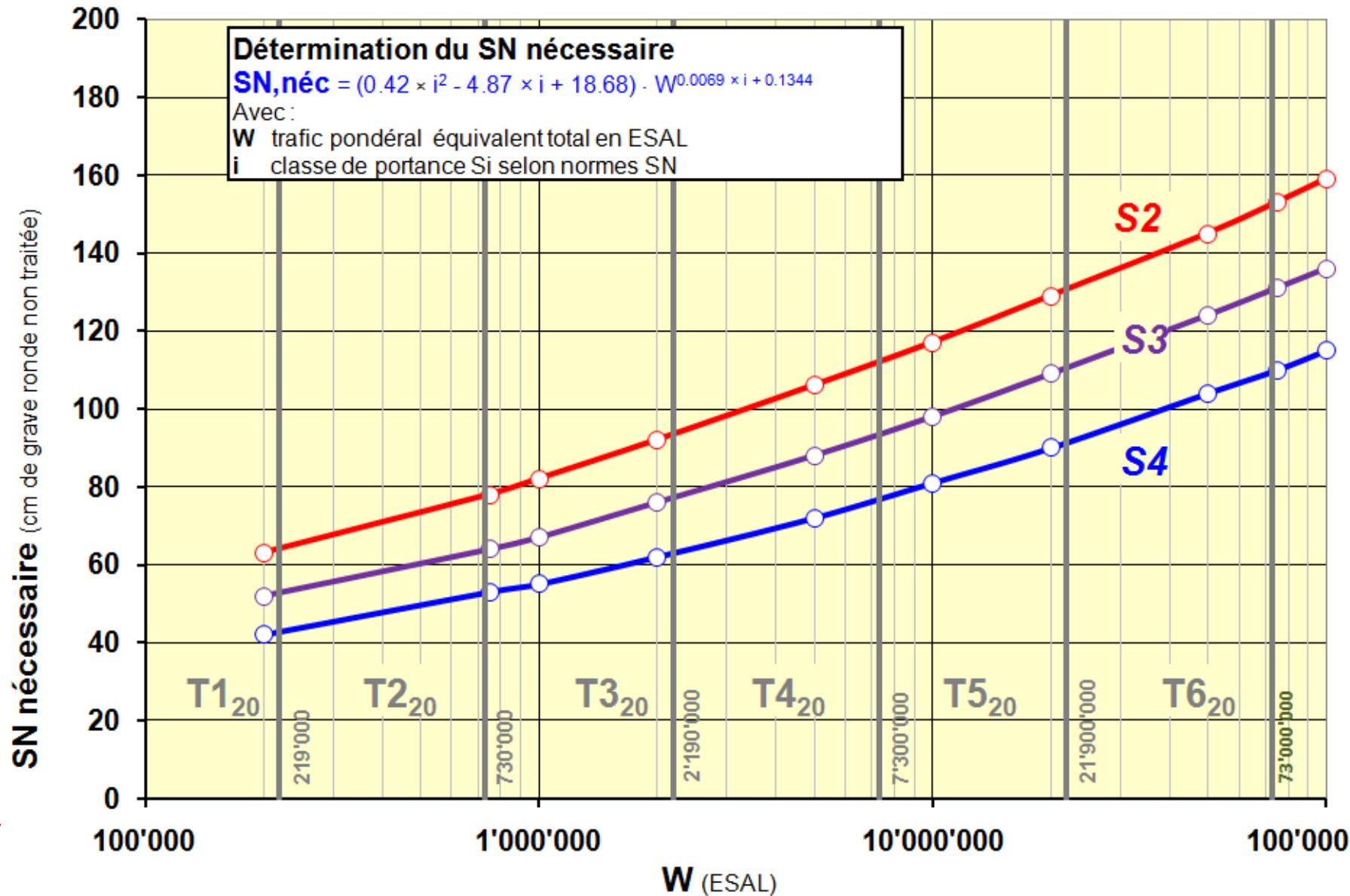
Valeur de structure nécessaire

► S2 / T4₂₀

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

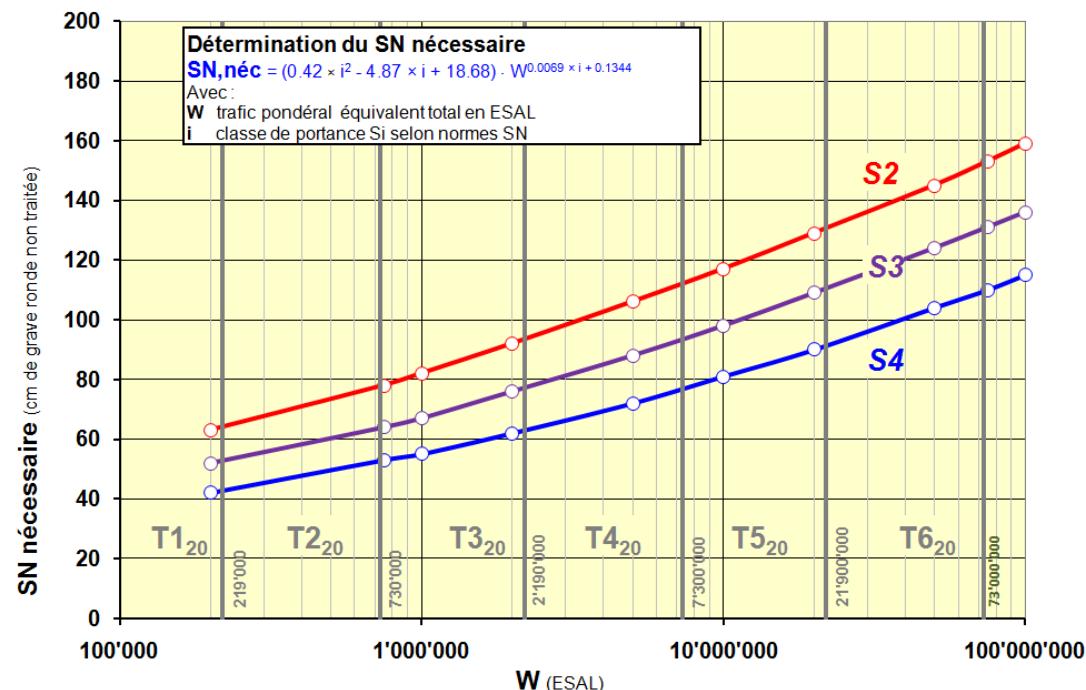
► SN_{néc} = 105 cm g.r.

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
- ▶ $SN_{néc} = 98,2 \text{ cm g.r.}$
- ▶ Selon tableau : 105



Valeur de structure SN selon catalogue

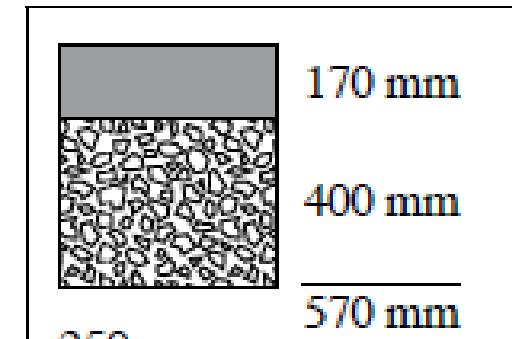
► Matériaux neufs

- 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

- $105 / 98 \text{ cm g.r.}$

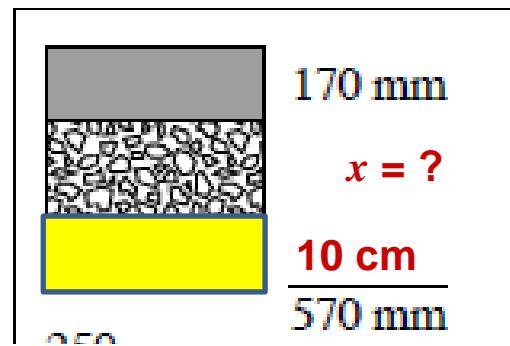
Couches de la chaussée	Matériaux en fonction de l'état des dégradations			
	Nouvelle chaussée	Dégradations légères Perte de matériaux / Fissuration	Dégradations moyennes Perte de matériaux / Fissuration	Dégradations structurelles Faïençage / Déformation
Couche de roulement, de liaison et de base				
Enrobés bitumineux AC, AC T, AC MR Splitmastic-asphalt SMA Asphalte coulé MA	4,0	3,4	2,8	2,4
Couche de roulement et de liaison				
Enrobé drainant PA	2,6	2,2	1,8	1,6
Couche de base				
Enrobés bitumineux à module élevé AC EME C1 ¹⁾	4,4	3,8	2,8	2,4
Enrobés bitumineux à module élevé AC EME C2 ¹⁾	5,6	5,0		
Couche de fondation				
Enrobé bitumineux AC F	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 ²⁾
Grave ronde	1,0	1,0	1,0	0,6 ²⁾



Variante de chaussée

► Stabilisation hydraulique

► 10 cm en bas de fondation



Exemple : variante avec stabilisation

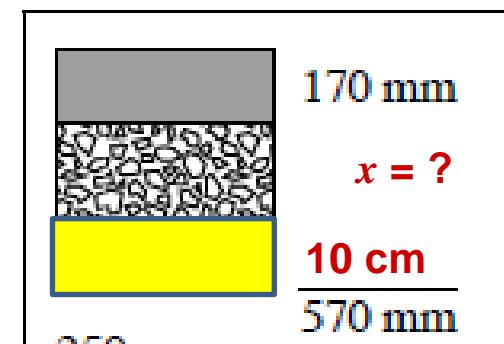
► Matériaux neufs

- AC → $a = 4,0$
- Grave ronde → $a = 1,0$
- Stabilisation hydr. → $a = 2,4$

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

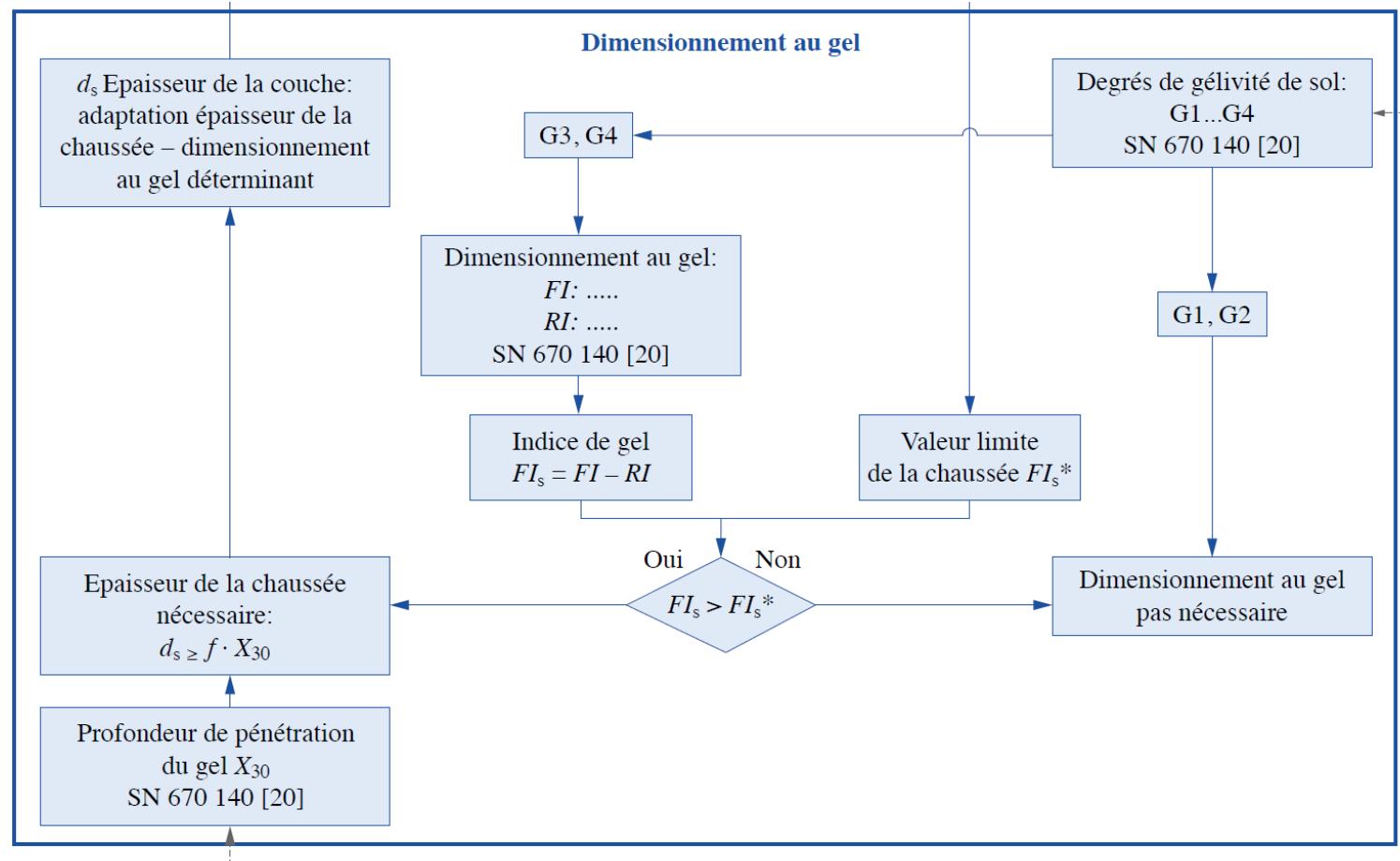
- $17 \times 4,0 + x \times 1,0 + 10 \times 2,4 = 98,2$
- $x = 6,2 \text{ cm} \rightarrow \mathbf{7 \text{ cm}}$
- $\mathbf{SN = 68 + 7 + 24 = 99 \text{ cm g.r.}}$

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 Faïençage / Déformation
Couche de roulement, de liaison et de base				
Enrobés bitumineux AC, AC T, AC MR Splitmastic-asphalt SMA Asphalte coulé MA	4,0	3,4	2,8	2,4
Couche de roulement et de liaison				
Enrobé drainant PA	2,6	2,2	1,8	1,6
Couche de base				
Enrobés bitumineux à module élevé AC EME C1 ¹⁾	4,4	3,8	2,8	2,4
Enrobés bitumineux à module élevé AC EME C2 ¹⁾	5,6	5,0		
Couche de fondation				
Enrobé bitumineux AC F	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 ²⁾
Grave ronde	1,0	1,0	1,0	0,6²⁾



Procédure de dimensionnement

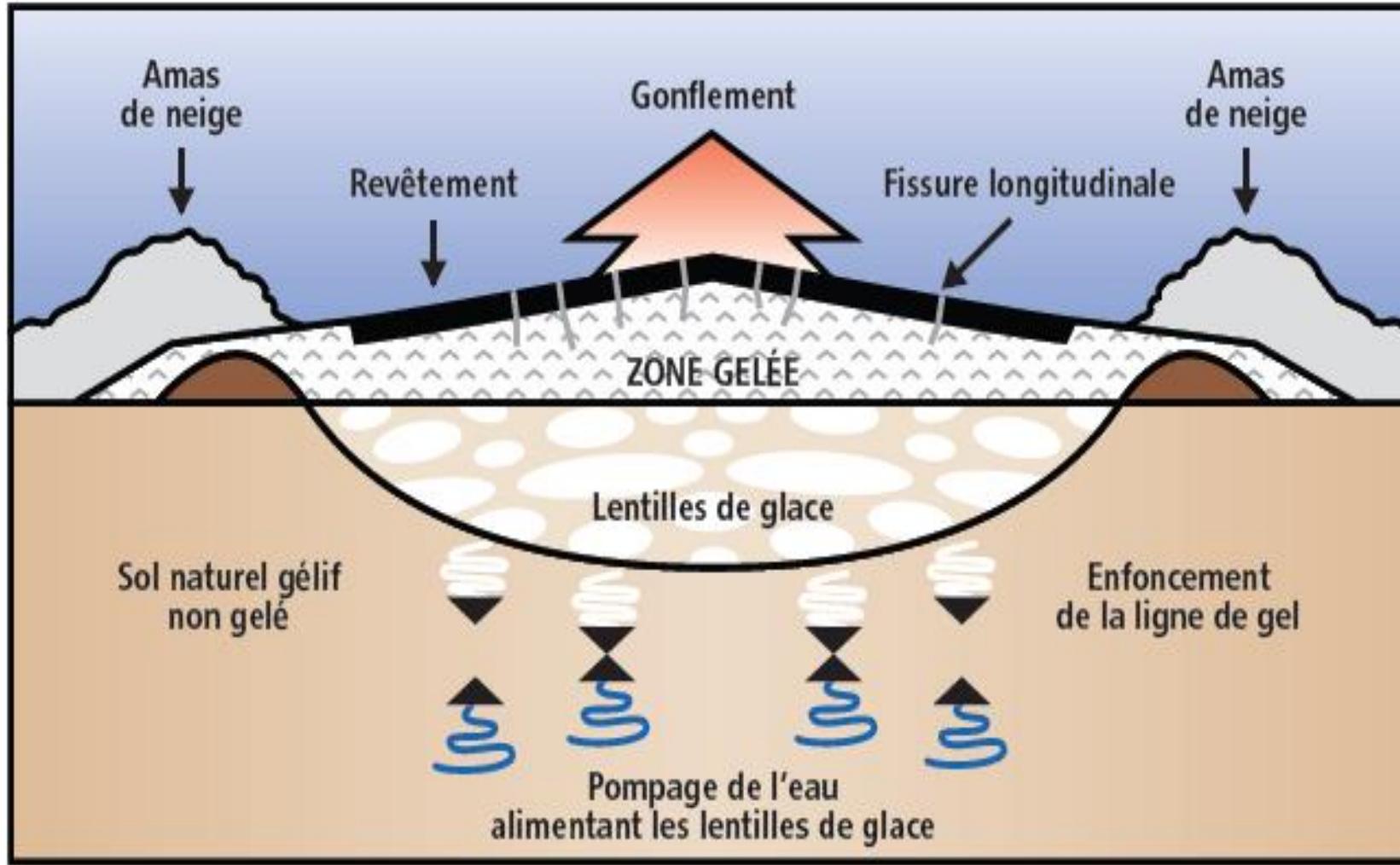
► Dimensionnement au gel



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



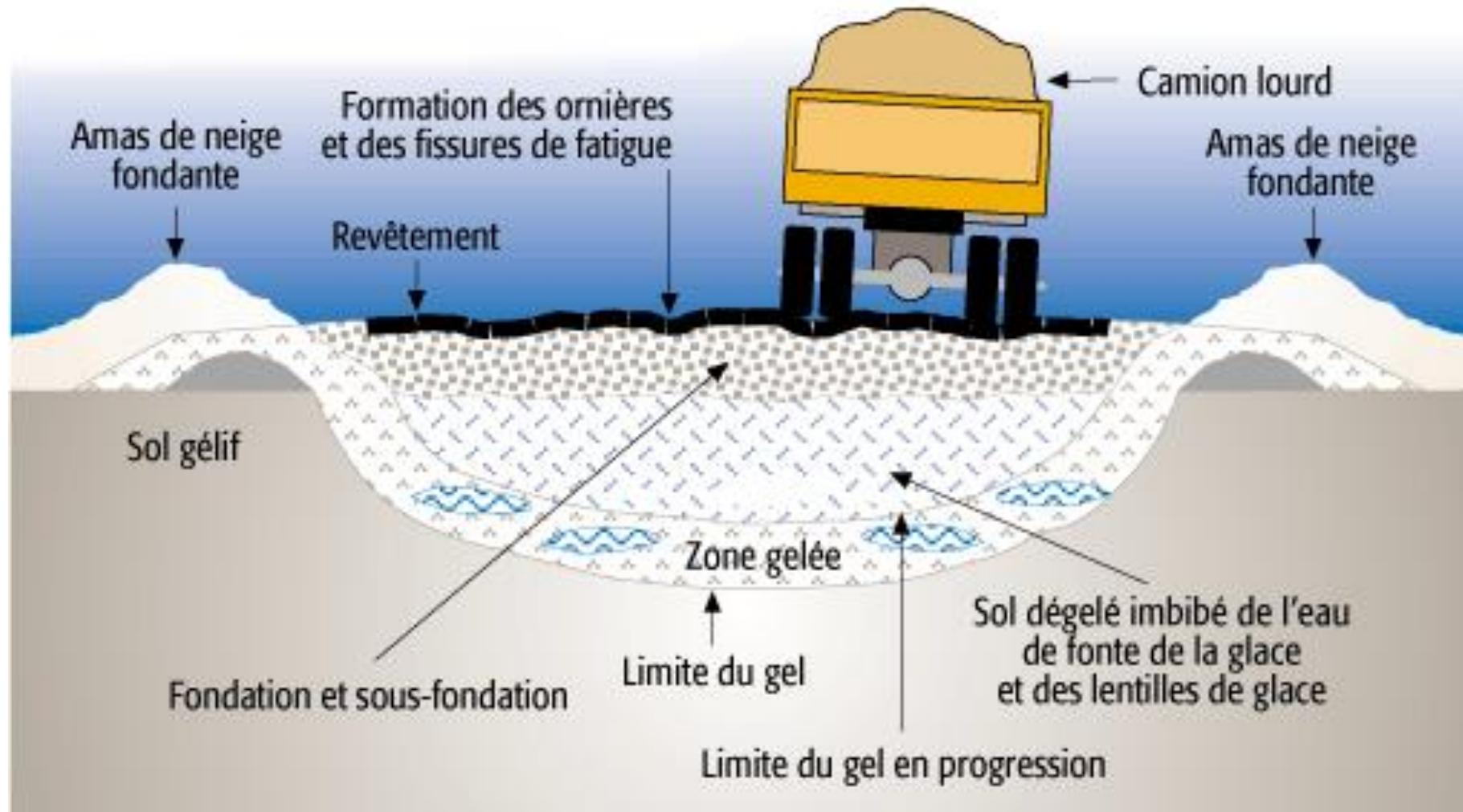
Lentilles de glace



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'infilttrer 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

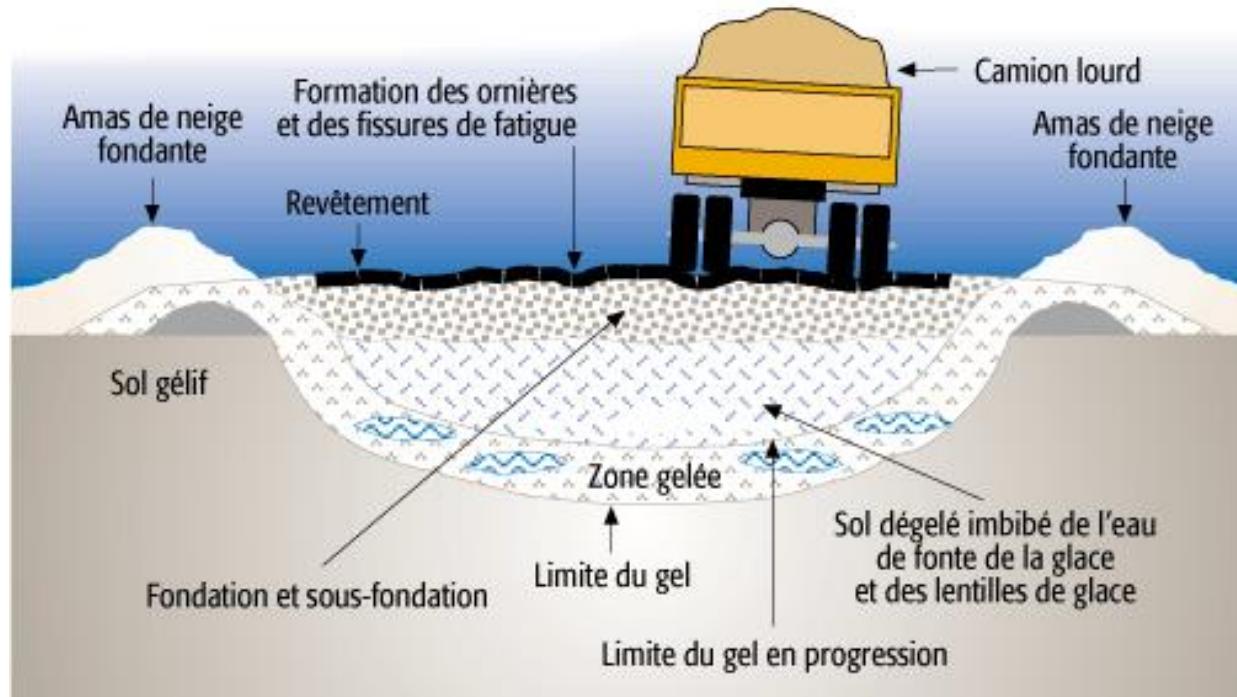


Fissure longitudinale de gel



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



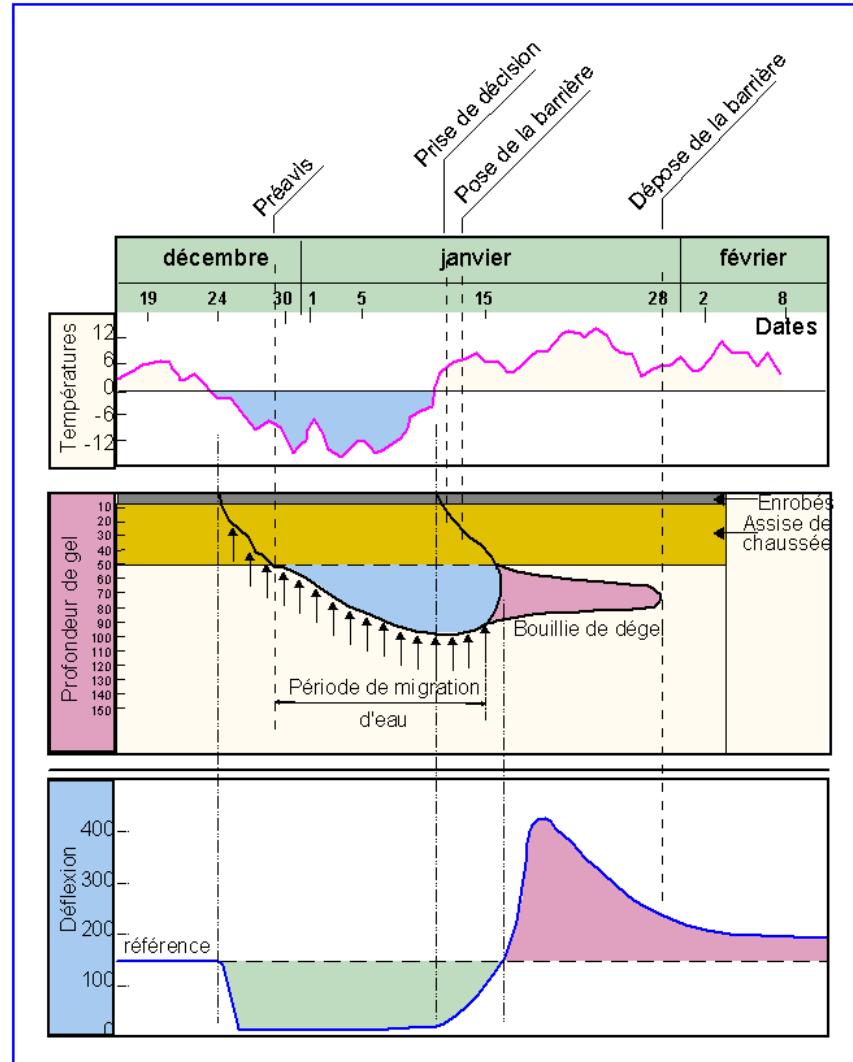
Dégâts dus au dégel



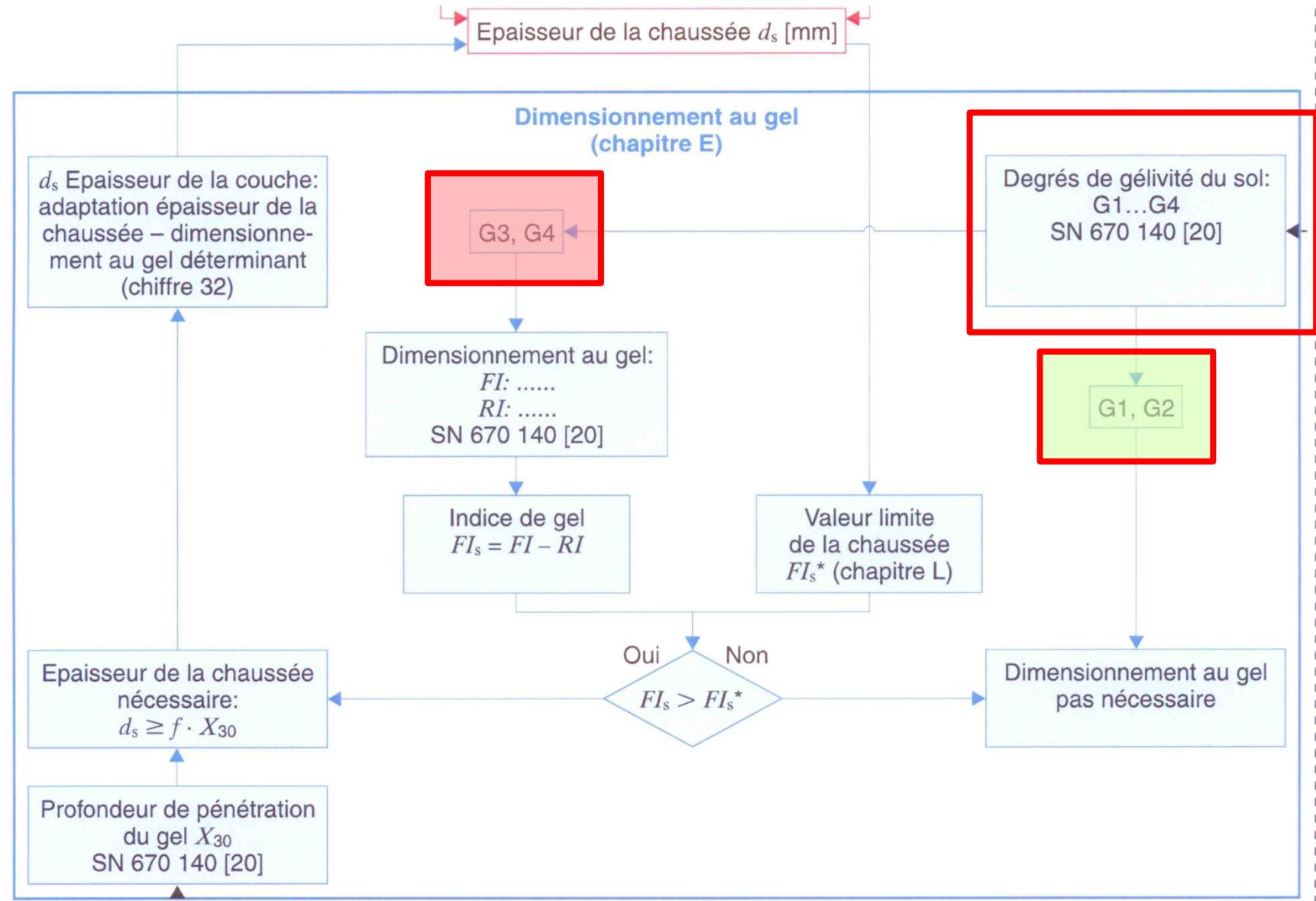
Mesure de la profondeur de gel



Exemple de relevé



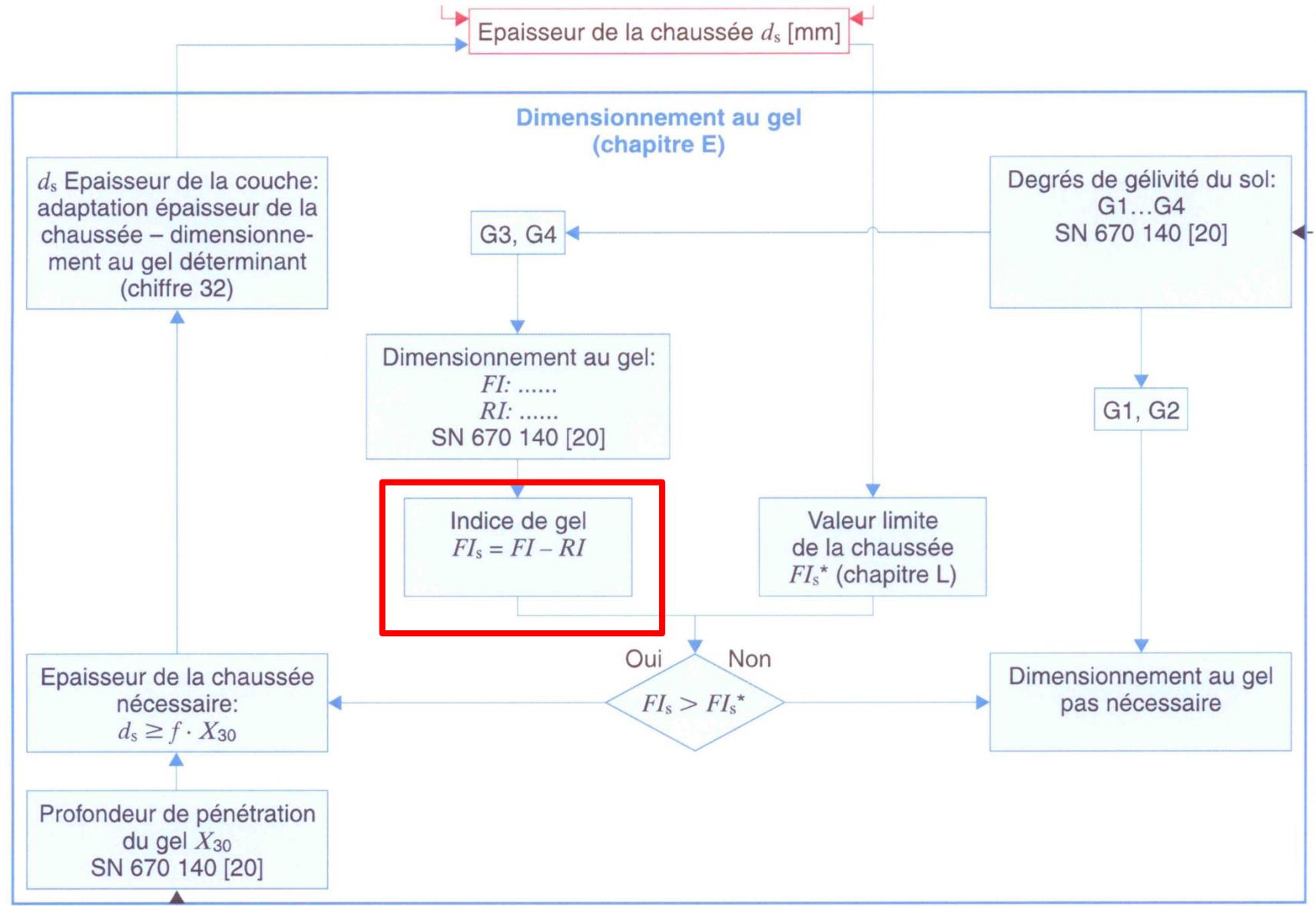
Procédure de dimensionnement



Degré de gélivité des sols

Degré de gélivité	Sols	Fraction plus petite que 0,02 mm (%)	Classification (SN 670 005a et 670 008a)
G1 Très faible	Graviers	3...10 au-dessous de 3% le sol n'est pas gélif	GW,GP,GM,GC
G2 Faible	Graviers	10...20	GM,GC-CL,GM-GC,GM-ML
	Sables	3...15	SW,SP,SM,SC
G3 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
G4 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



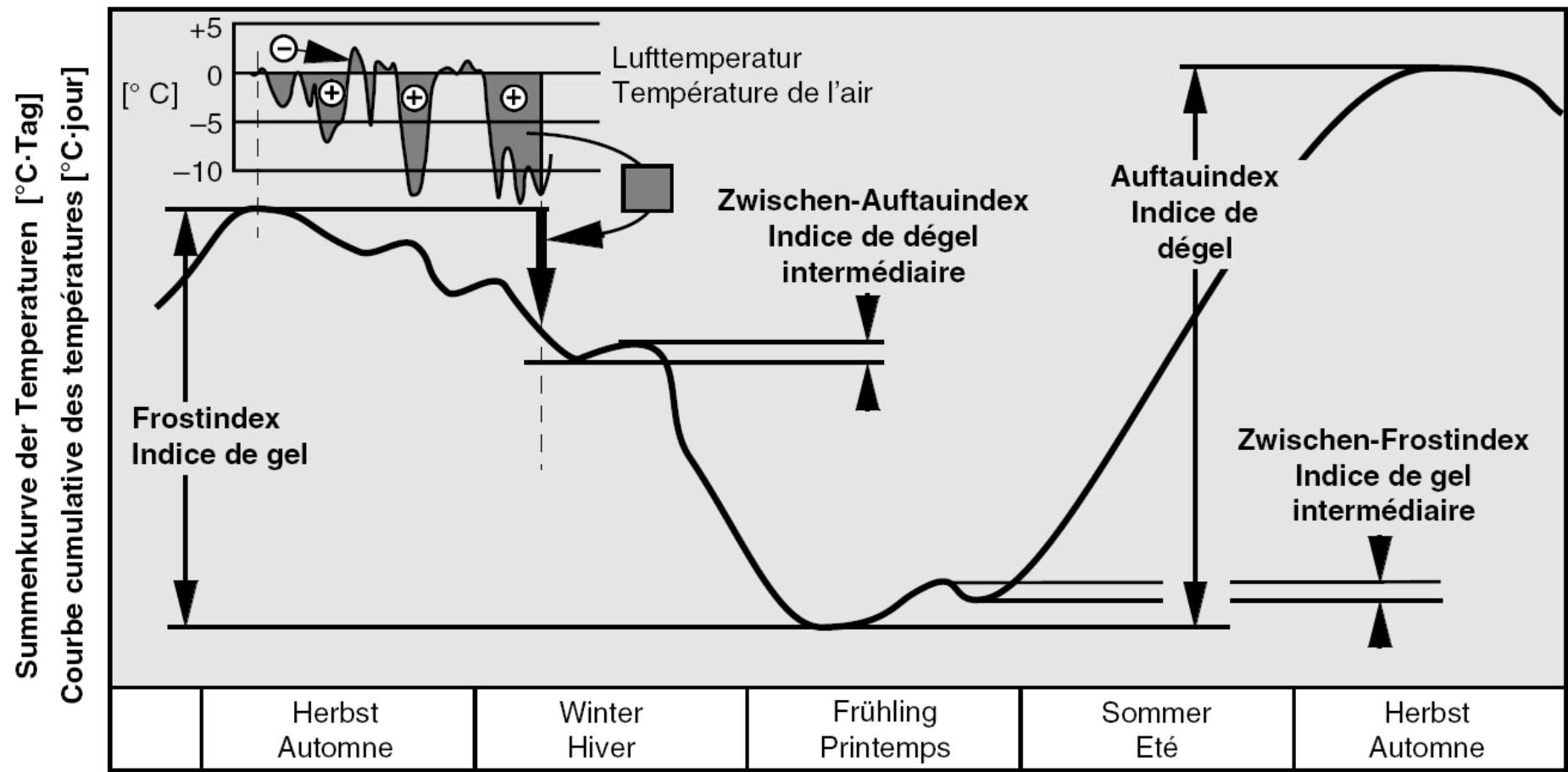
Indice de gel de la route

$$FI_s = FI - RI$$

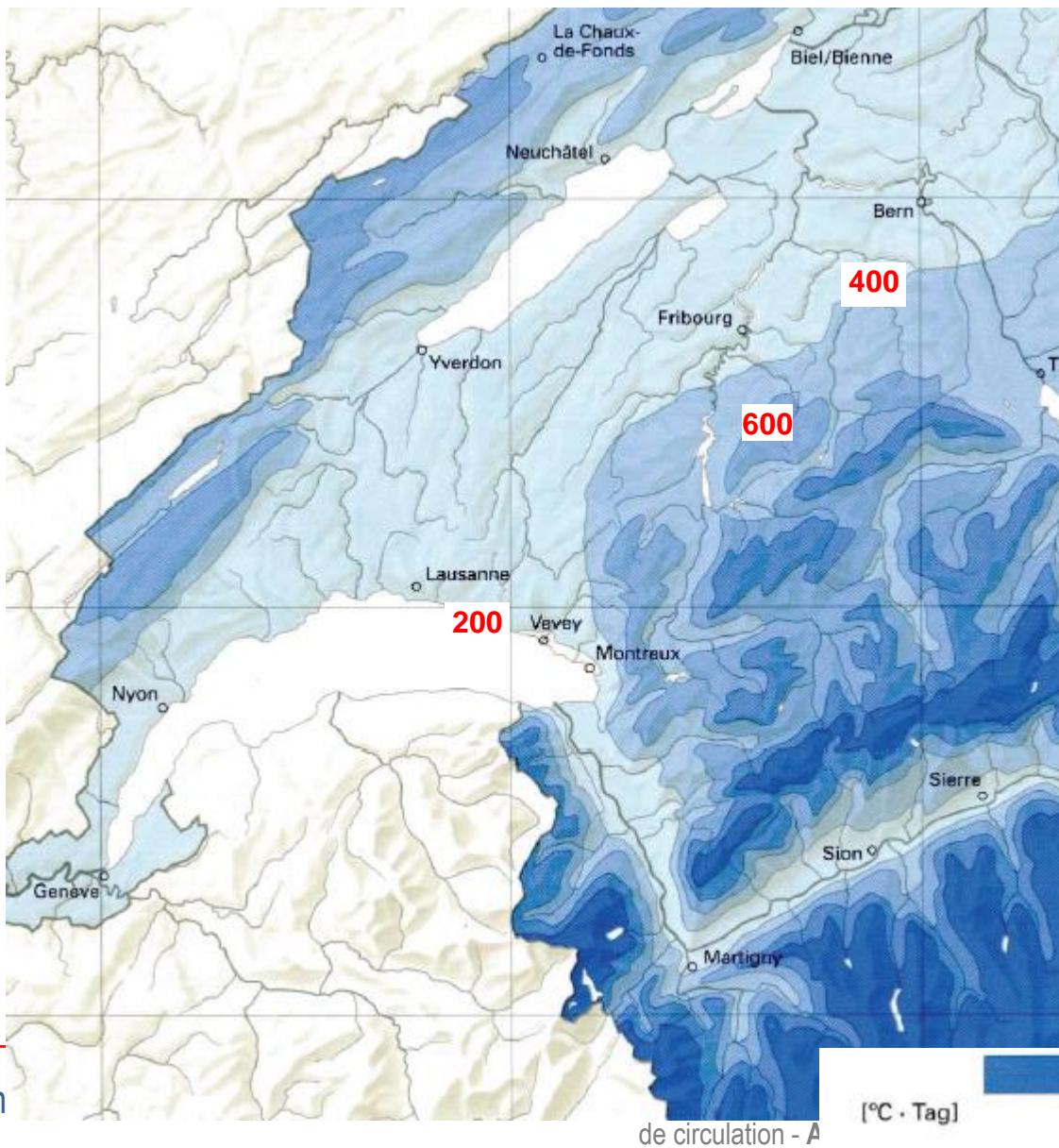
- ▶ **FI_s**
 - » Indice de gel de la route
- ▶ **FI**
 - » Indice de gel de l'air obtenu par des mesures ou par la carte de Suisse des indices de gel de l'air
- ▶ **RI**
 - » Indice de radiation → ensoleillement de la chaussée
- ▶ **Unité** **°C·jour**

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)



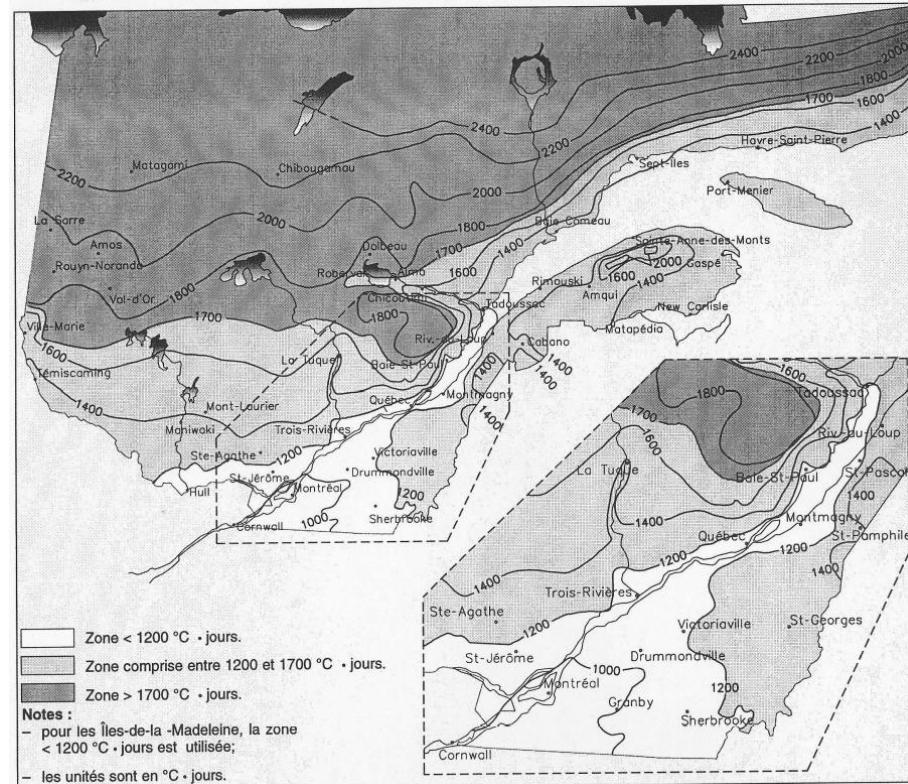
Indice de gel de l'air FI (Québec / France)

► 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



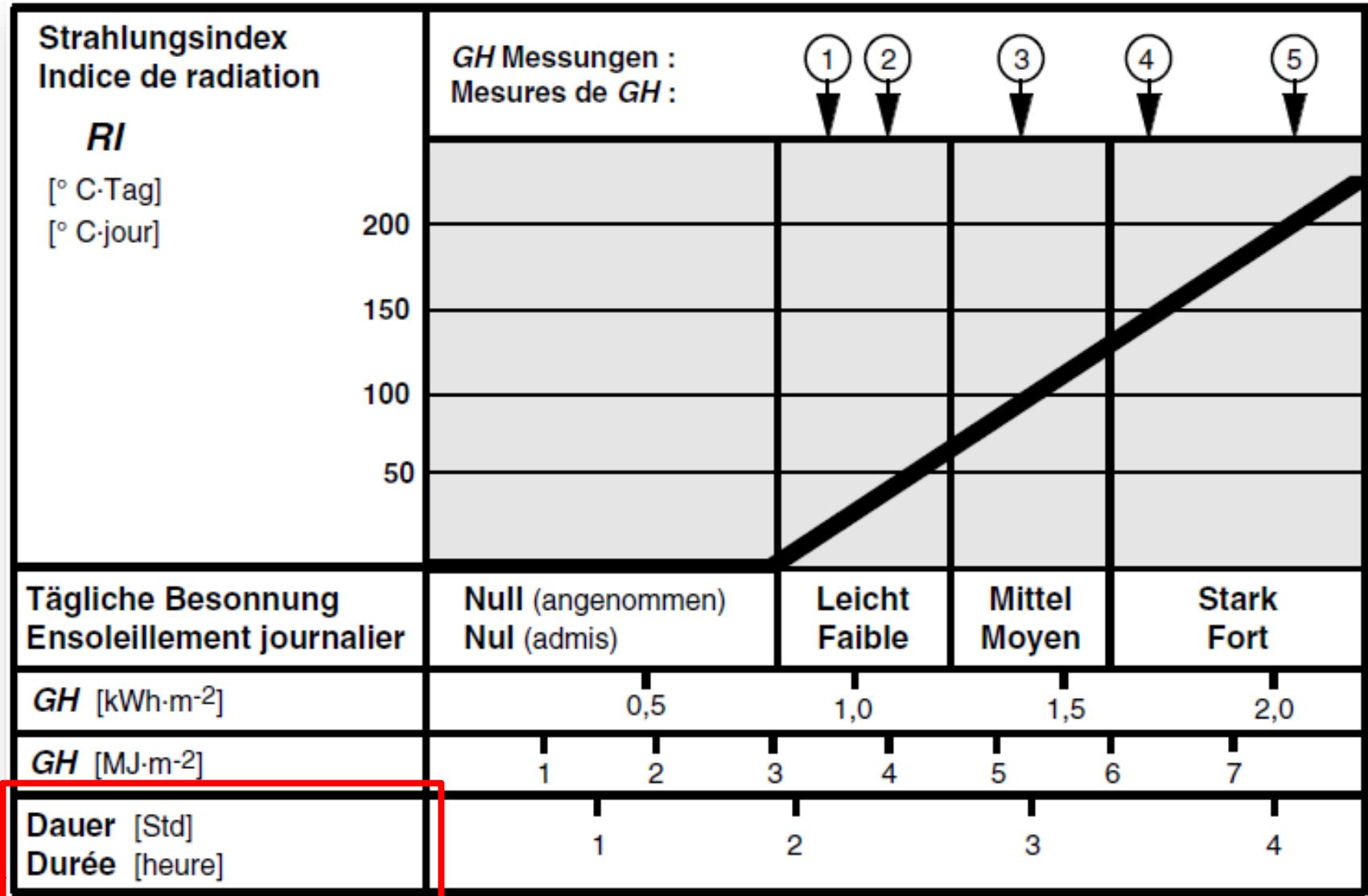
Indice de radiation RI

► Energie fournie par le soleil

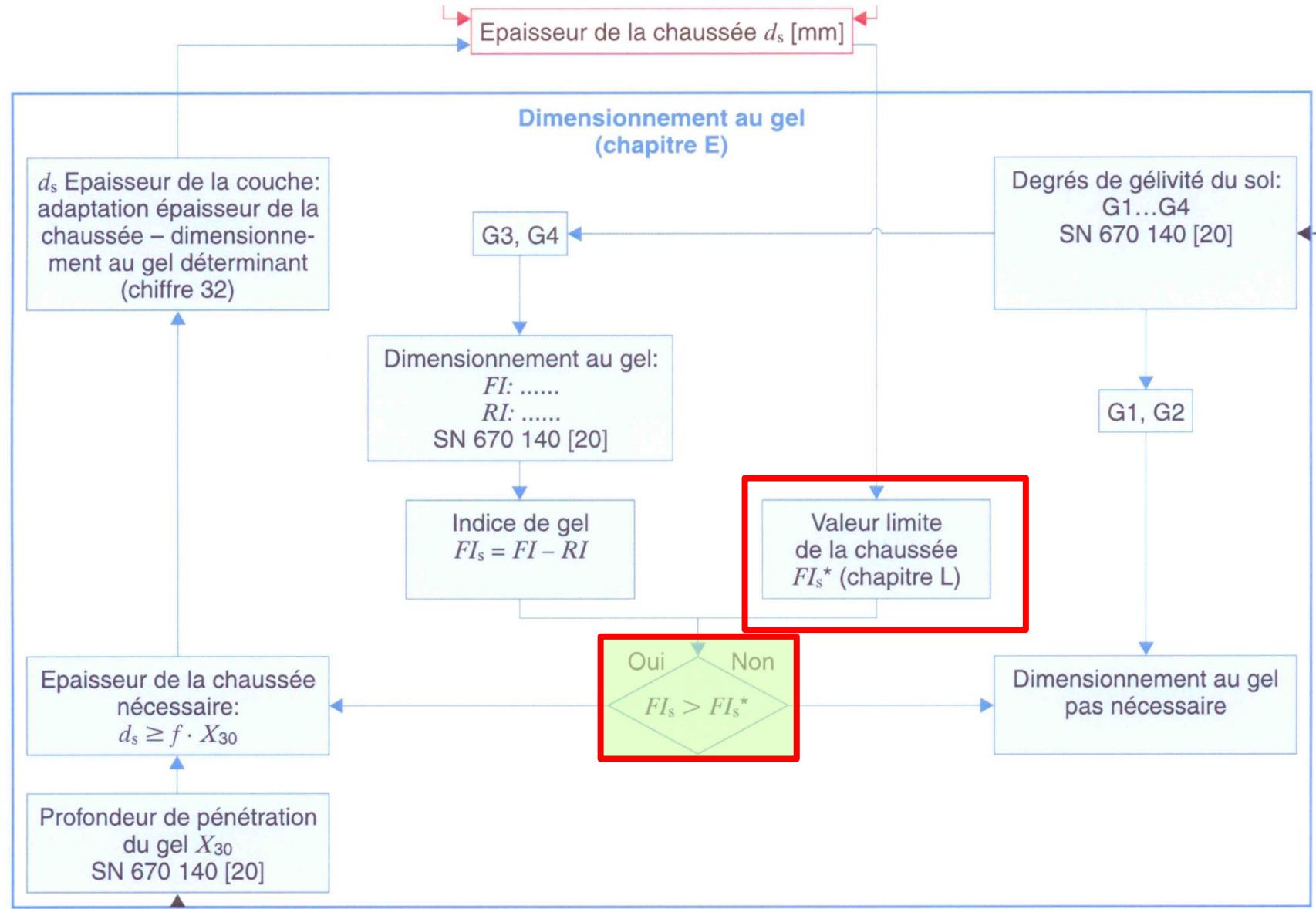
» Différence ubac - adret



Indice de radiation RI



Procédure de dimensionnement



Indice critique de gel de la route

► $F_{I_s}^*$

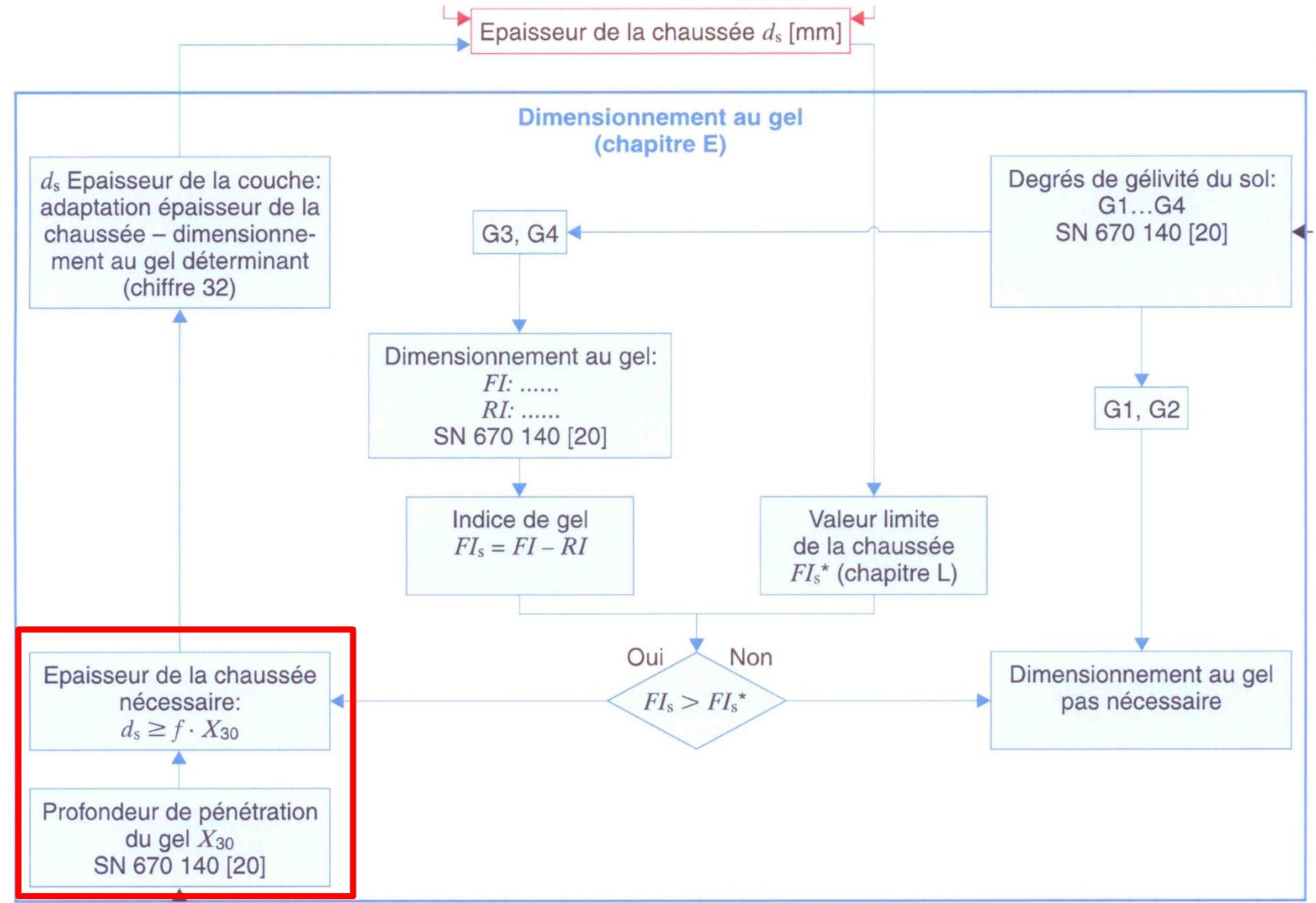
► Indice critique de gel de la surface de la route

Type de chaussée 2		Couche(s) en enrobé bitumineux sur enrobés bitumineux pour couches de fondation AC F et grave non traitée			Tragfähigkeitsdimensionierung Dimensionnement de la portance			Frostdimensionierung Dimensionnement au gel		
Ti ₂₀	S2	S3	S4		Frost- indices <i>Indices de gel</i>	Frostdimensionie- rungsfaktor f <i>Facteur de dimensionnement f</i>	G3	G4		
T6 ₂₀	180 mm 140 mm 300 mm 620 mm	180 mm 110 mm 200 mm 490 mm		$F_{I_s}^*$	300	< 400 400...600 > 600	0,45 0,45 0,50	0,55 0,55 0,60		
	200									
T5 ₂₀	150 mm 110 mm 300 mm 560 mm	150 mm 90 mm 200 mm 440 mm								

Indice critique de gel de la route

- ▶ $Fi_s < Fi_s^*$
 - ⇒ pas de dimensionnement au gel
- ▶ $Fi_s \geq Fi_s^*$
 - ⇒ dimensionnement au gel nécessaire

Procédure de dimensionnement

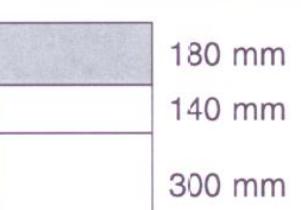
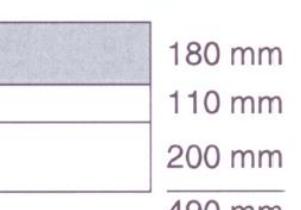
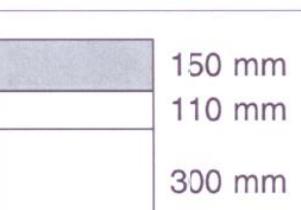
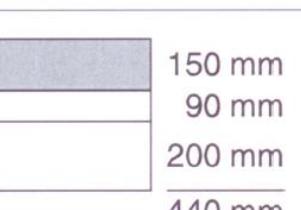


Vérification de la profondeur de gel

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

- ▶ d_s
 - » épaisseur de la chaussée (cm)
- ▶ f
 - » facteur de dimensionnement au gel présentés dans le catalogue des types de chaussée et fct de Ti, Si 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			
Ti ₂₀	S2	S3	S4	Frost- indices Indices de gel	Frostdimensionie- rungsfaktor f Facteur de dimensionnement f	G3	G4
T6 ₂₀	 180 mm 140 mm 300 mm 620 mm	 180 mm 110 mm 200 mm 490 mm	 200	FI_s			
FI_s^*	300	200					
T5 ₂₀	 150 mm 110 mm 300 mm 560 mm	 150 mm 90 mm 200 mm 440 mm		< 400 400...600 > 600	0,45 0,45 0,50	0,55 0,55 0,60	

Profondeur de gel X₃₀

► Relevés *in situ*

► Tabelles

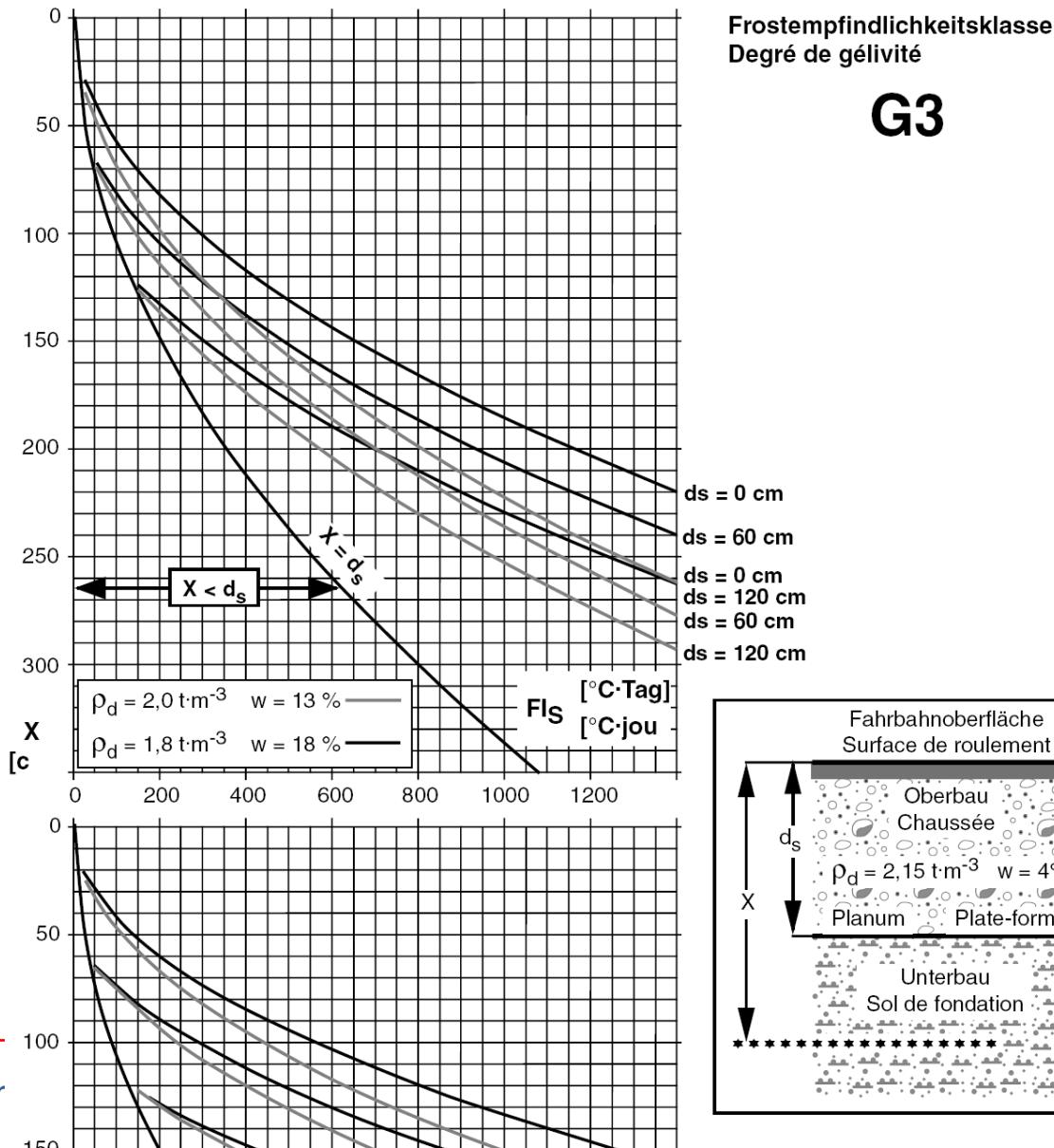
► d_s

► F_i_s

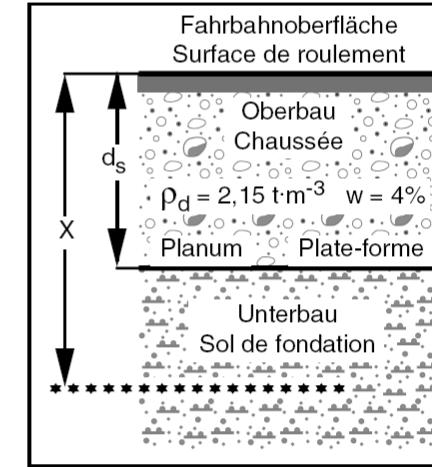
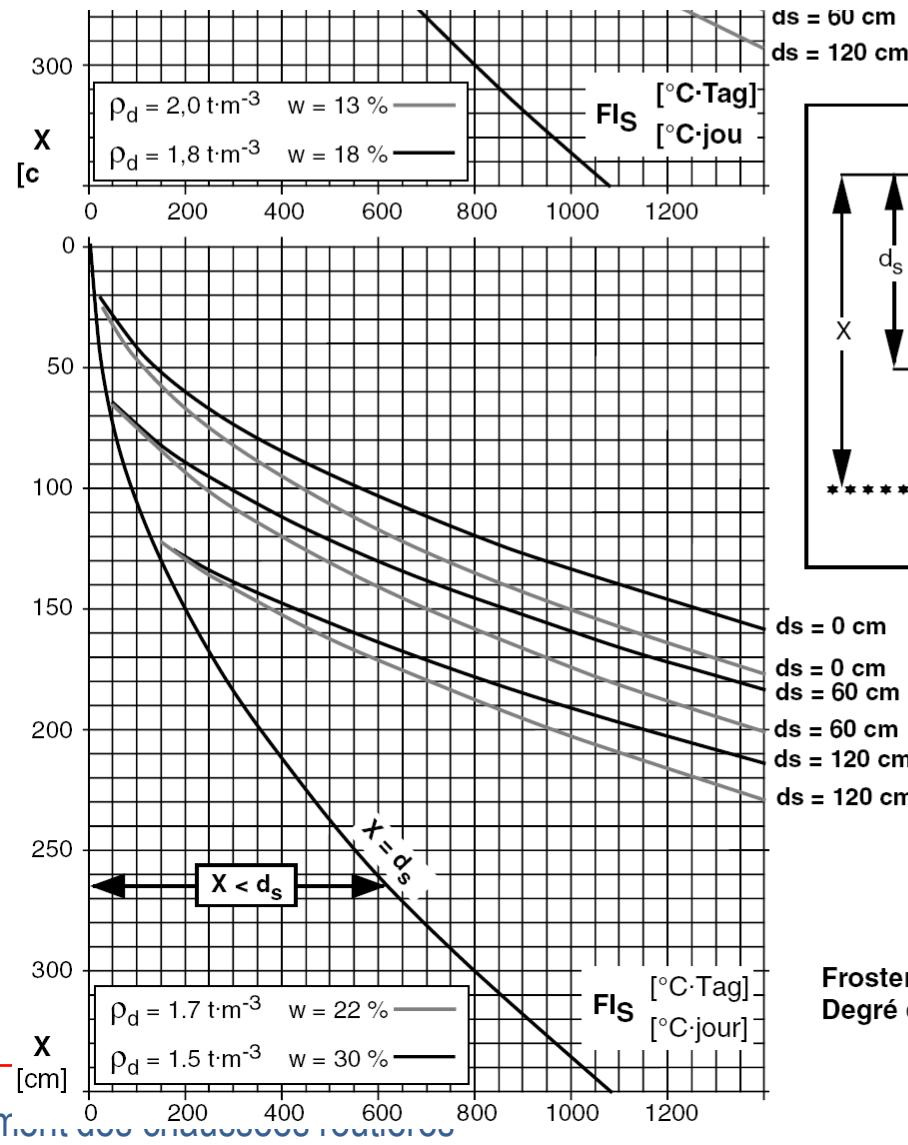
► W

► G_i

Profondeur de gel X_{30}



Profondeur de gel X_{30}



$d_s = 0 \text{ cm}$
 $d_s = 0 \text{ cm}$
 $d_s = 60 \text{ cm}$
 $d_s = 60 \text{ cm}$
 $d_s = 120 \text{ cm}$
 $d_s = 120 \text{ cm}$

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 clémene 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