

Gel des sols

Première partie

Michel Dysli

Laboratoire de mécanique des sols

D-1 f

Programme

Première partie

- **Indices de gel et de dégel**
- **Réchauffement du climat**
- **Paramètres météorologiques**

Deuxième partie

- **Phénomène du gel des sols**

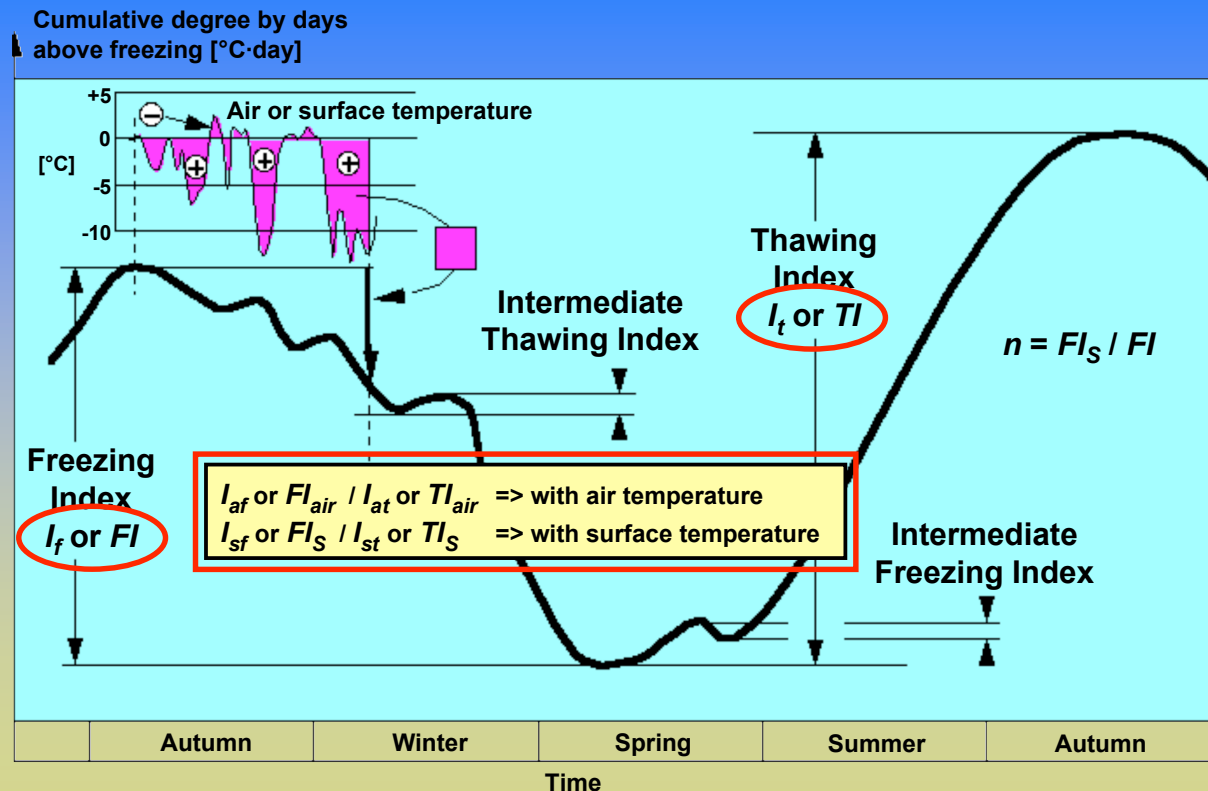
Troisième partie

- **Dimensionnement des infrastructures et superstructures**
- **Pergélisols (permafrost)**
- **Bibliographie**

- **Exercice**

D-2 f

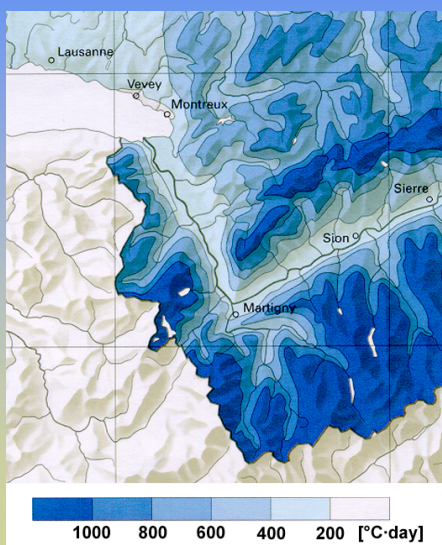
Indices de gel et de dégel (1)



D-3 f

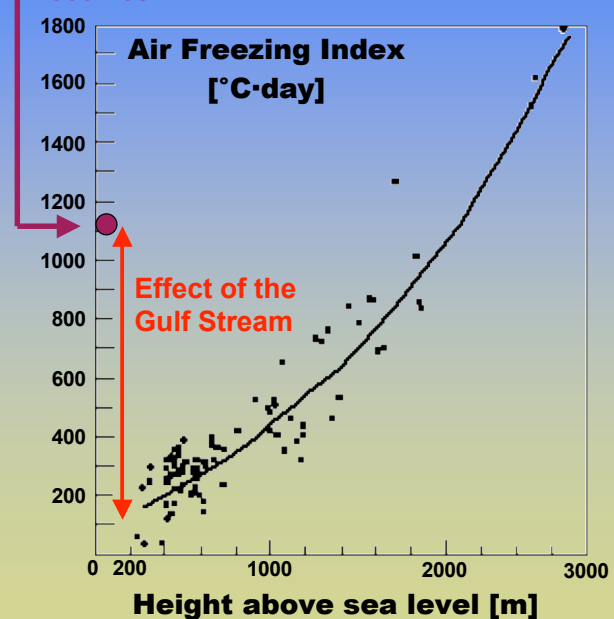
Indices de gel et de dégel (2)

Complicated map of Freezing Indices



Air Freezing Indices versus Height

Quebec
Nicolet station
2000-2001



D-4 f

Indices de gel et de dégel (3)

Définition de l'indice de gel de dimensionnement
= en général, indice de gel de surface FI_s

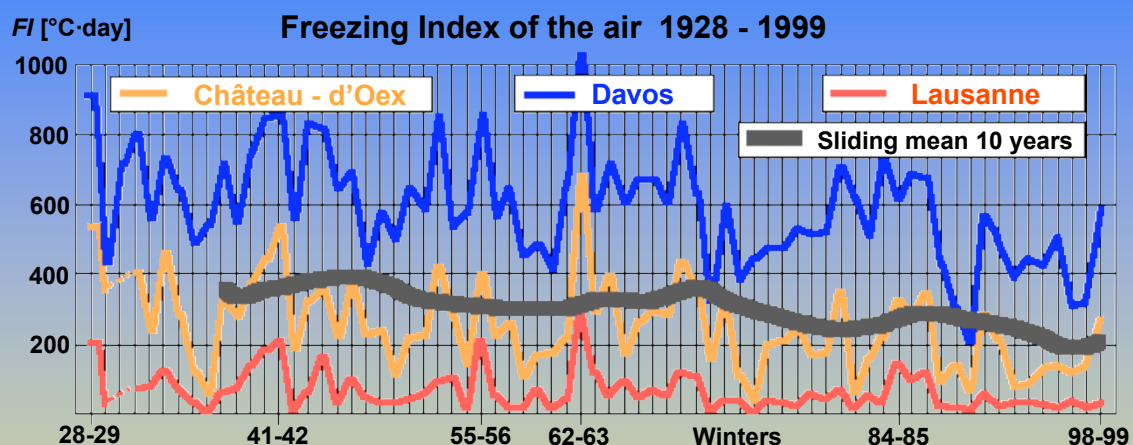
Quelques solutions :

- Comme la profondeur du gel n'a pas le même effet sur toutes les constructions, usage d'un indice de gel de dimensionnement qui est atteint une fois pendant une période de x années (FI_5 , FI_{30} , etc., par exemple, FI_5 étant l'indice de gel qui se produit tous les cinq ans. La Norvège et, dans une certaine mesure, la Suède, utilise cette approche.
- Suisse : moyenne des trois hivers les plus froids des 30 dernières années.
- Dans les régions à faible indice de gel, pour tenir compte de l'alternance des périodes de gel-dégel pendant un hiver, il est nécessaire de définir des règles qui permettent de déterminer un indice de gel significatif qui conduit à une évaluation correcte de la profondeur maximale du gel. La Suisse utilise de telles règles depuis 2001.

D-5 f

Réchauffement du climat (1)

Avec le réchauffement du climat, les indices de gel diminuent.



D'où l'importance de la définition de l'indice de gel de dimensionnement

D-6 f

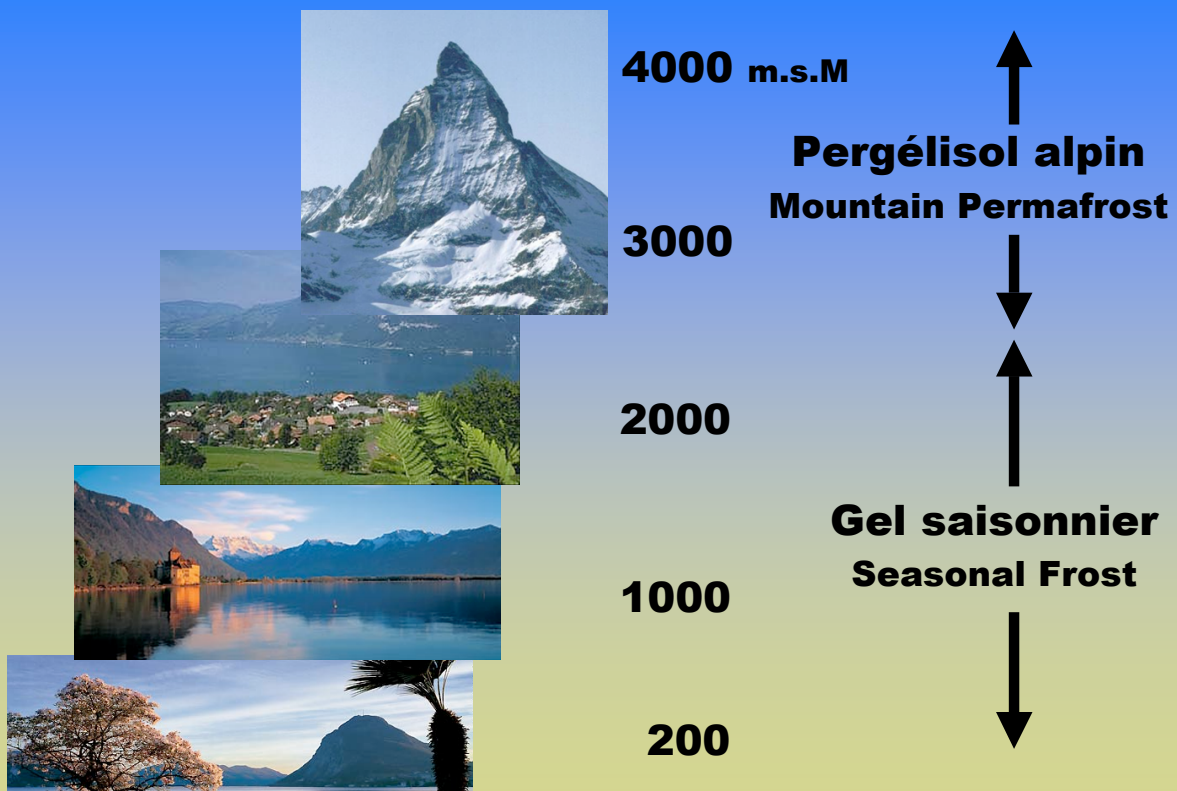
Réchauffement du climat (2)

Le dimensionnement au gel et
dégel des infra et
superstructures est-il encore
nécessaire ?

Petite discussion un peu provocatrice

D-7 f

Réchauffement du climat (3)



D-8 f

Réchauffement du climat (4)

Les effets du réchauffement du climat dépendent des régions sur la Terre

Exemple :

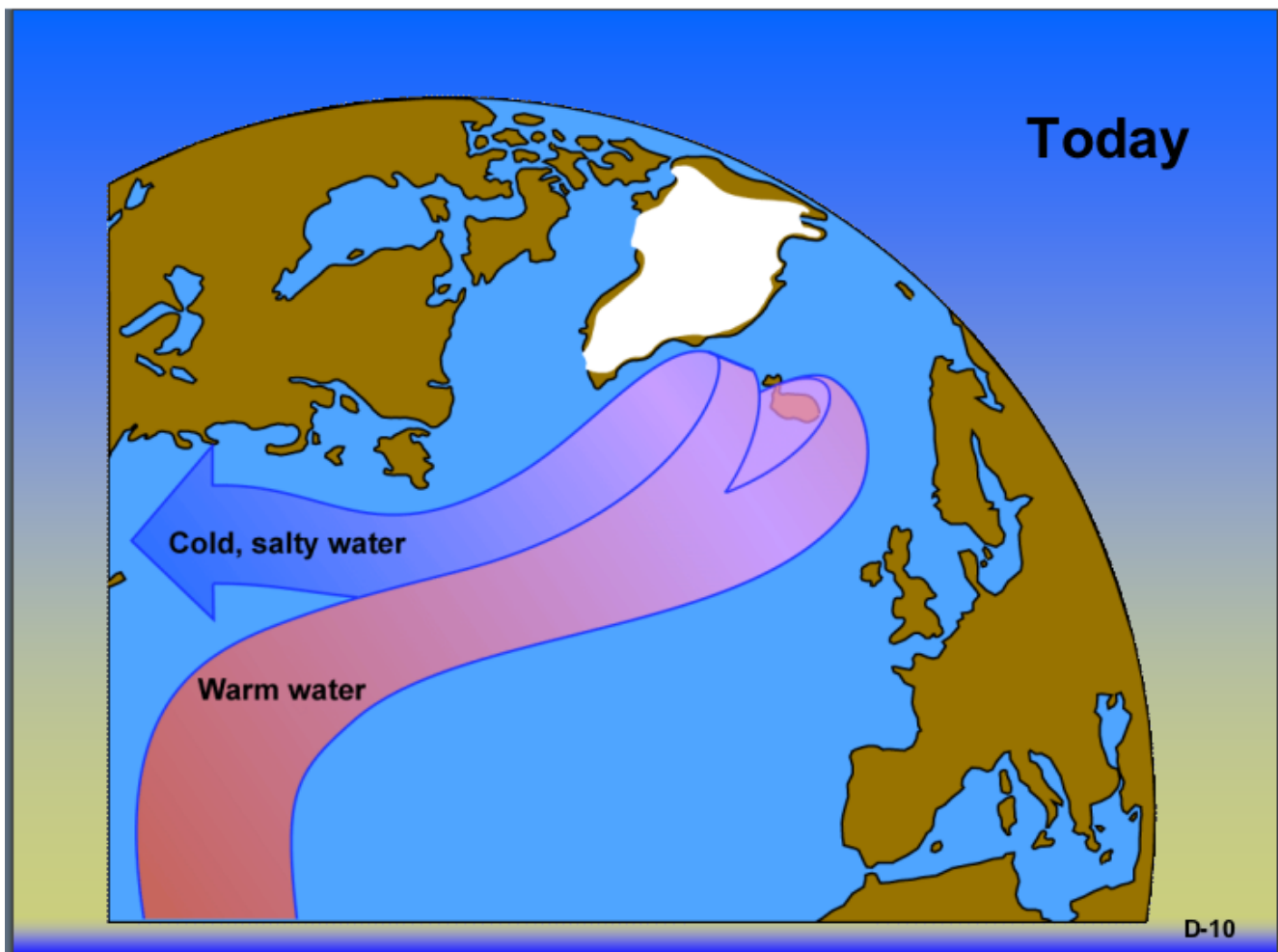
Le centre et le nord de l'Europe sont anormalement chauds. Le responsable est le Gulf Stream. L'indice de gel de l'air de Montréal est d'environ 1000 °C·jour et, à la même latitude, celui de Genève est seulement d'environ 170 °C·jour.

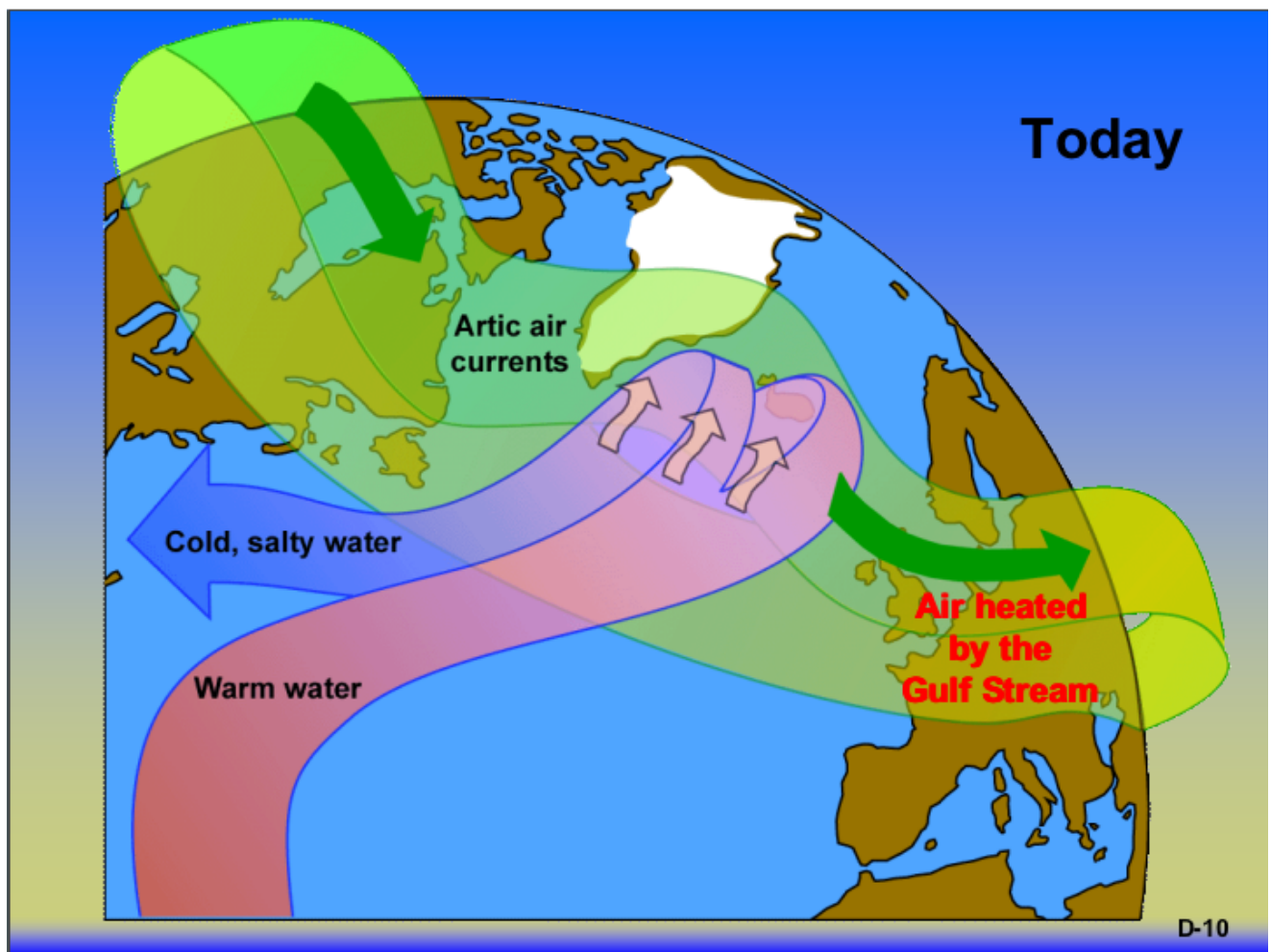
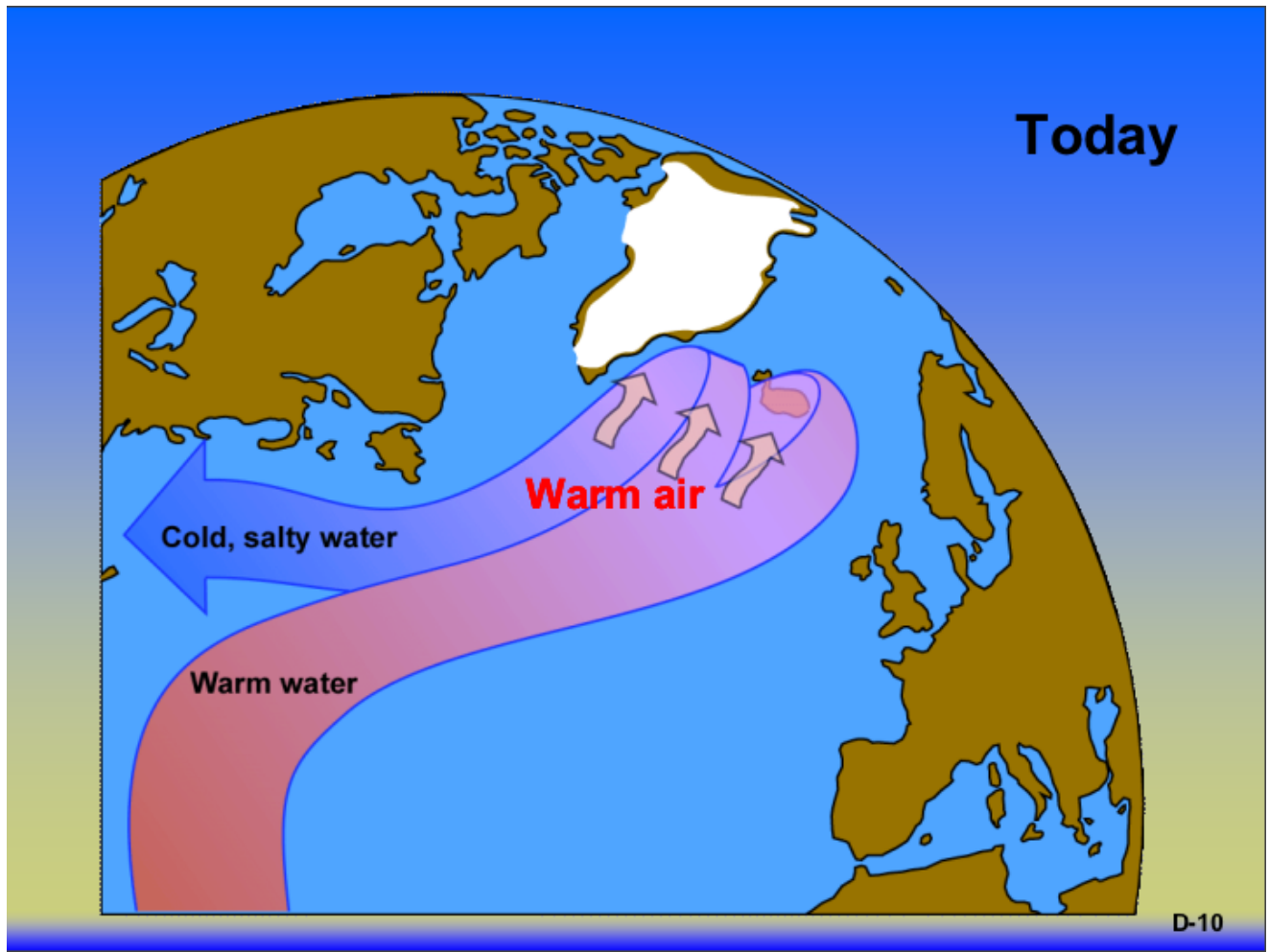
Une nouvelle théorie prédit que la fonte de la calotte glaciaire du Groenland conduit à un approfondissement du Gulf Stream (eau douce plus légère que l'eau salée de l'océan). Ainsi l'action du Gulf Stream sur les côtes de l'Europe va diminuer.

Résultat : Après environ un siècle de réchauffement du climat, la température du centre et du nord de l'Europe va diminuer ...

Les spécialistes européens du gel des sols ont encore un avenir !

D-9 f





**During
global warming**



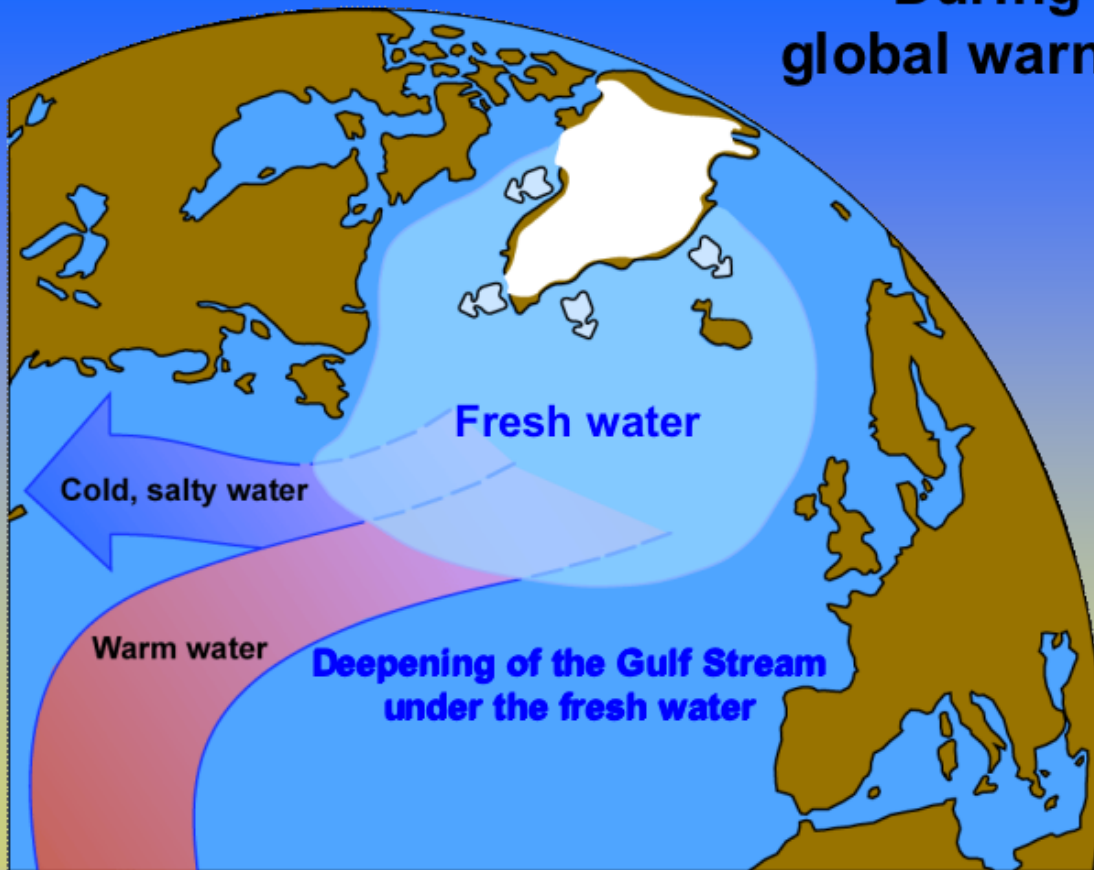
D-10

**During
global warming**



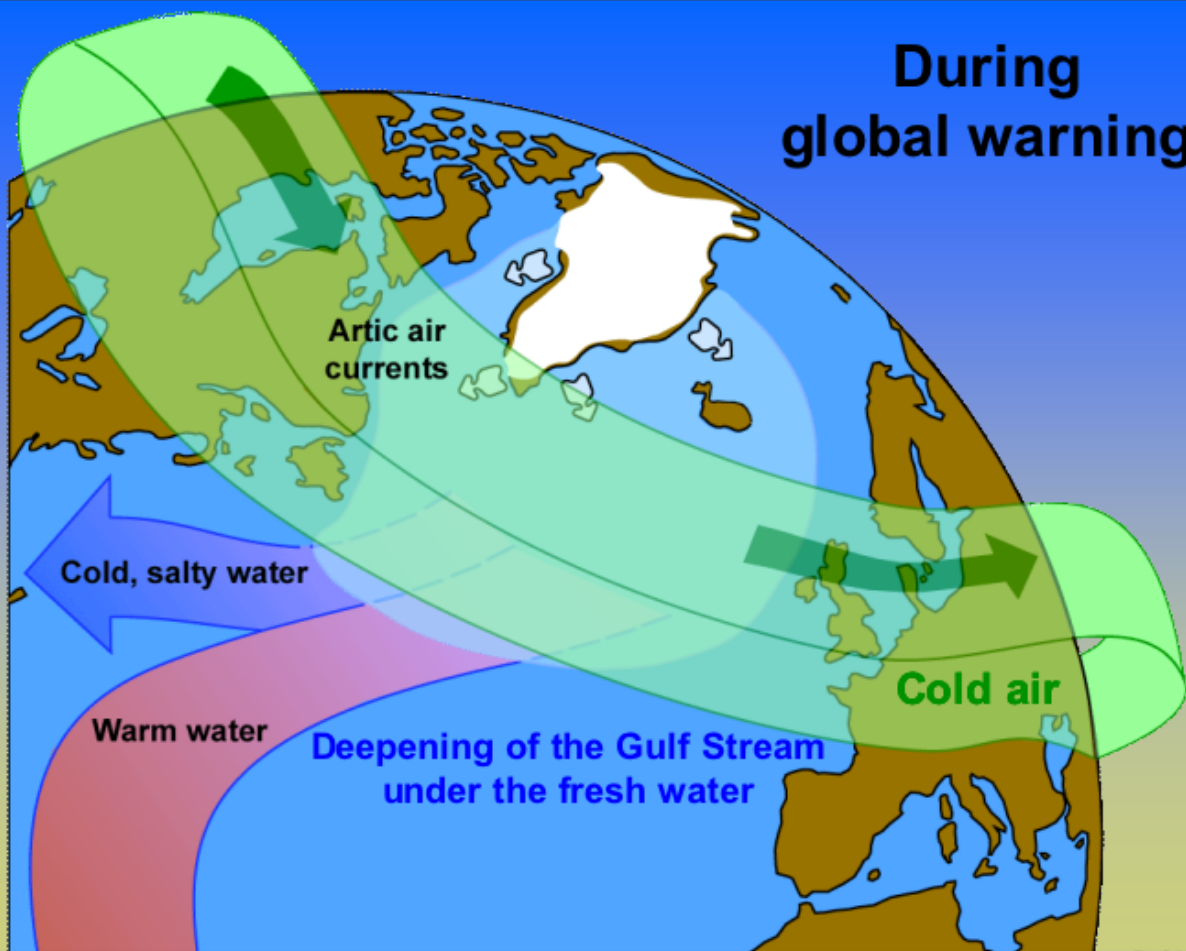
D-10

**During
global warming**



D-10

**During
global warming**



D-10 f

Paramètres météorologiques (1)

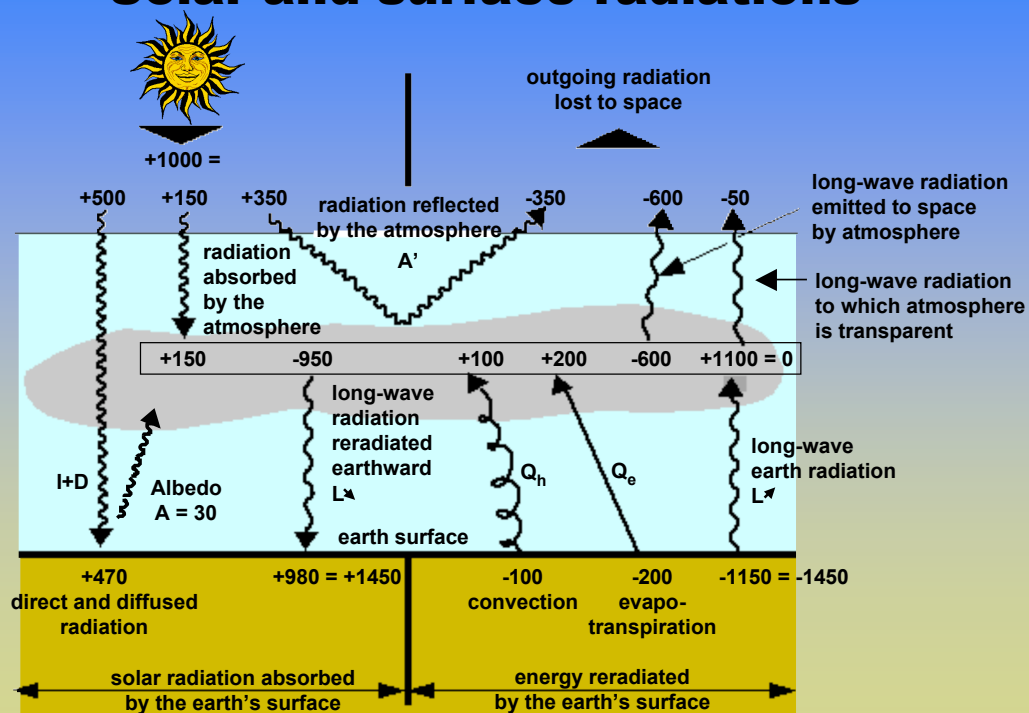
Principaux paramètres météorologiques :

- température de l'air
- radiations solaires
- radiation de la surface du sol
- vitesse et direction du vent (convection)
- précipitations
- changement de phases (e.g. évaporation, fonte de la glace et de la neige)

D-17 f

Paramètres météorologiques (2)

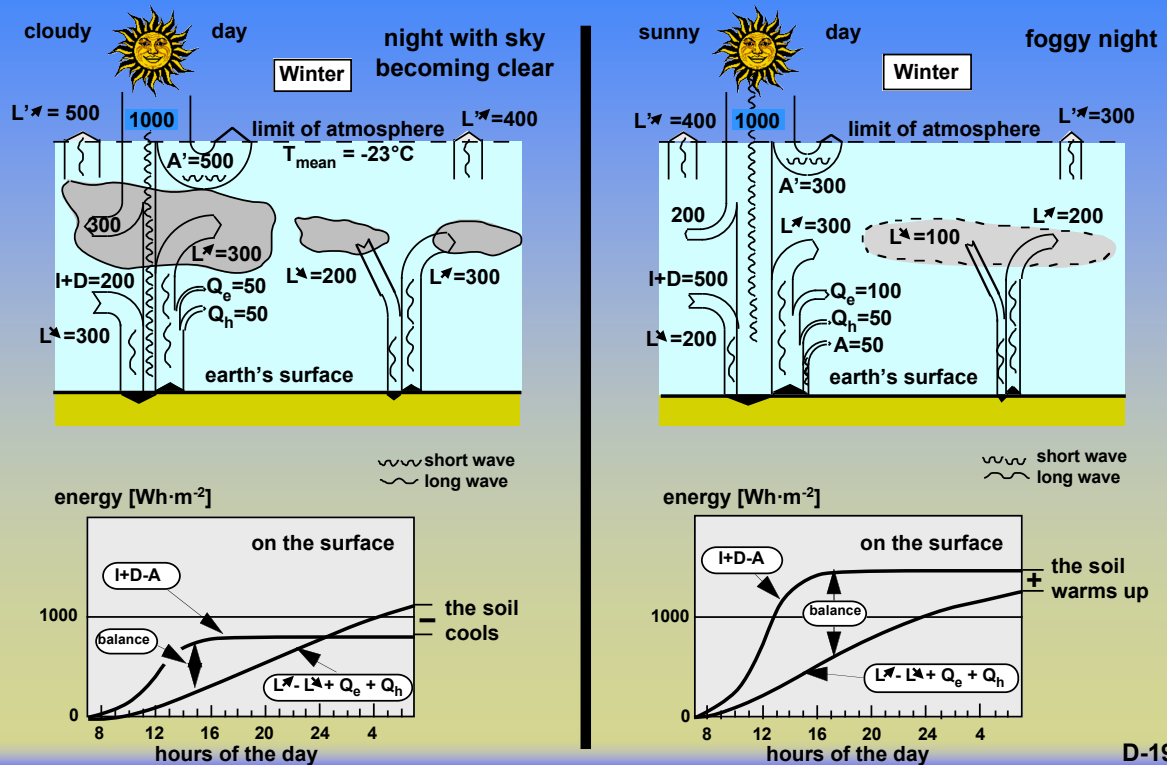
Solar and surface radiations



D-18 f

Paramètres météorologiques (3)

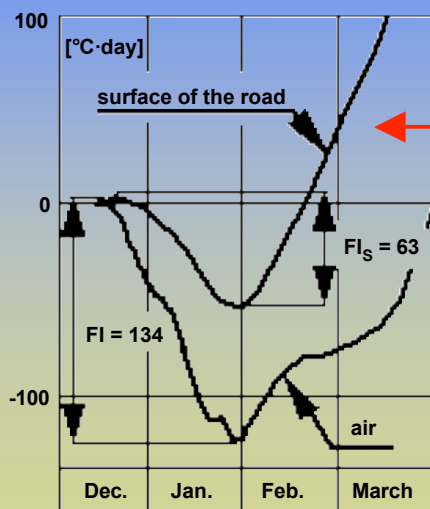
Balance of the radiations over short periods



D-19 f

Paramètres météorologiques (4)

Influence des radiations solaires et des autres paramètres météorologiques sur l'indice de gel de la surface du sol FI_s



Edge of the Swiss prealps, 860 m.a.s.l.
1979 - 1980

Winter	Characteristics	Freezing index of the air FI [°C·day]	Freezing index of the surface FI_s [°C·day]	Ratio n factor
1979-80	Mild and damp	134	63	0.47
1980-81	Cold with heavy snowfall and early arrival at the end of November	359	216	0.60
1982-83	Very mild and damp from January with a cold and rainy month of December	52	29	0.56

FI_s est l'indice de gel de dimensionnement

D-20 f

Paramètres météorologiques (5)

Radiations solaires en fonction de la latitude

L'importance relative entre l'indice de gel de l'air FI et celui de la surface FI_s du sol dépend de la latitude. Pour des latitudes nord entre 40° et 55° les radiations solaires et celles émises par la surface du sol sont les facteurs climatiques les plus importants. Plus au nord ($> 55^\circ$), l'importance des radiations solaires diminue et ce sont des paramètres comme le vent qui deviennent prépondérants.

Qui plus est, dans ces régions, l'indice de gel de la surface du sol devient plus grand que celui de l'air. L'énergie irradiée par la surface du sol est plus grande que celle reçue de l'espace $\Rightarrow n = FI_s / FI > 1$.

D-21 f

Paramètres météorologiques (6)

Vitesse et direction du vent (convection)

Pendant l'hiver et pour presque toutes les régions, l'effet du vent sur l'indice de gel de la surface du sol est négligeable. Par exemple, de nombreuses mesures en Suisse l'ont démontré.

Il n'est pas négligeable en haute montagne, sur certains caps et pour des latitudes nord $> 55^\circ$.

C'est heureux, car le coefficient de convection de surface est une valeur très difficile à évaluer.

D-22 f

Paramètres météorologiques (7)

Evaluation de l'indice de gel de surface

Deux solutions :

- Utilisation du classique facteur n : $FI_S = n \cdot FI_{air}$

Cependant, le facteur n est un multiplicateur alors que le phénomène qui produit la différence entre les deux indices résulte d'un bilan énergétique qui est modélisé par une somme. Ainsi :

- Utiliser l'Indice de radiations : $FI_S = FI_{air} - RI$

n ainsi que $RI = f(I + D + L_{\downarrow} - L_{\uparrow} - Q_e - Q_h)$ sont déterminés par mesures et corrélations.

D-23 f

Paramètres météorologiques (8)

Utilisation du facteur n

Surtout en Europe, les valeurs n sont souvent mal utilisées : 0.9 to 0.8, car les conditions climatiques sont très variables.

Cependant, si les valeurs n sont bien connues, comme au nord du continent américain, leur usage conduit à des résultats satisfaisants. Voir en particulier les nombreux articles de V. Lunardini du CRREL.

Exemples du facteur n :

Surface	Location	Freeze		Thaw		Reference
		n_f	FI	n_t	TI	
Pavement free of snow and ice	Fairbanks, Alaska	0.9	-	-	-	U.S. Army 1966
Concrete pavement	Fairbanks, Alaska	0.74 ± 0.08	5042	1.93 ± 0.25	3055	U.S. Army 1950
	63/64 Bekeley, USA	0.35	259	-	-	Moulton 1968
	64/65 Bekeley, USA	0.27	125	-	-	"
	65/66 Bekeley, USA	0.53	239	-	-	"
	63/64 Benwood, USA	0.54	206	-	-	"
	64/65 Benwood, USA	0.36	880	-	-	"
	Hanover NH, USA	0.62	1363	-	-	Berg 1977
Asphalt pavement	Fairbanks, Alaska	0.72	5042	2.18	3055	U.S. Army 1950
	Lakselv, Norway	1.26	1908	-	-	Heiersted 1975
	Os, Norway	1.02	2034	-	-	"

D-24 f

Paramètres météorologiques (9)

Evaluation de l'indice de radiations

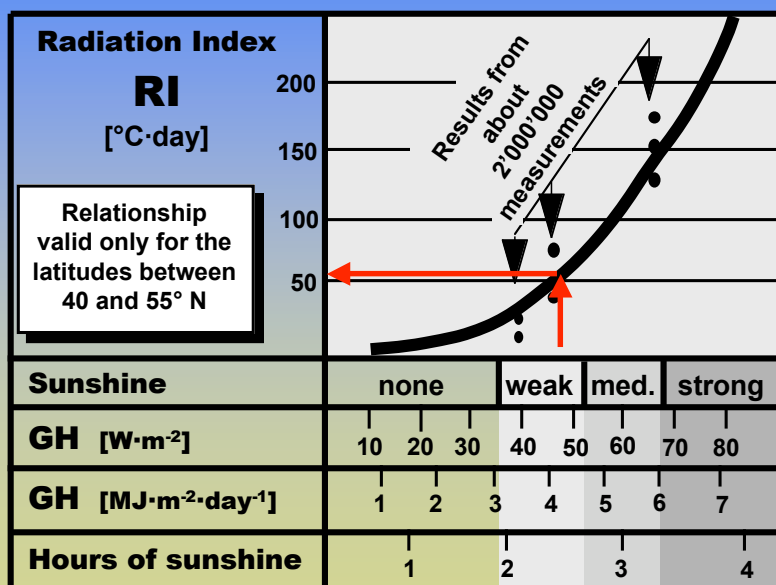
L'utilisation de l'indice de radiation est surtout recommandé dans les régions montagneuses où les conditions climatiques sont très variables. Aujourd'hui, l'indice de radiation est seulement déterminé pour les régions alpines entre 40 et 45° N, ceci sur la base nombreuses mesures.

D-25 f

Paramètres météorologiques (10)

Evaluation de l'indice de radiations

Norme suisse SN 670 140a



D-26 f

Gel des sols

Deuxième partie

Michel Dysli

Laboratoire de mécanique des sols

D-1 f

Programme

Première partie

- **Indices de gel et de dégel**
- **Réchauffement du climat**
- **Paramètres météorologiques**

Deuxième partie

- **Phénomène du gel des sols**

Troisième partie

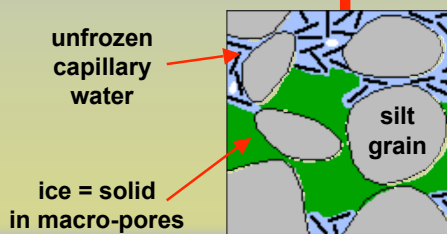
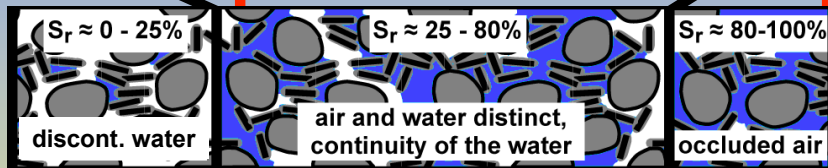
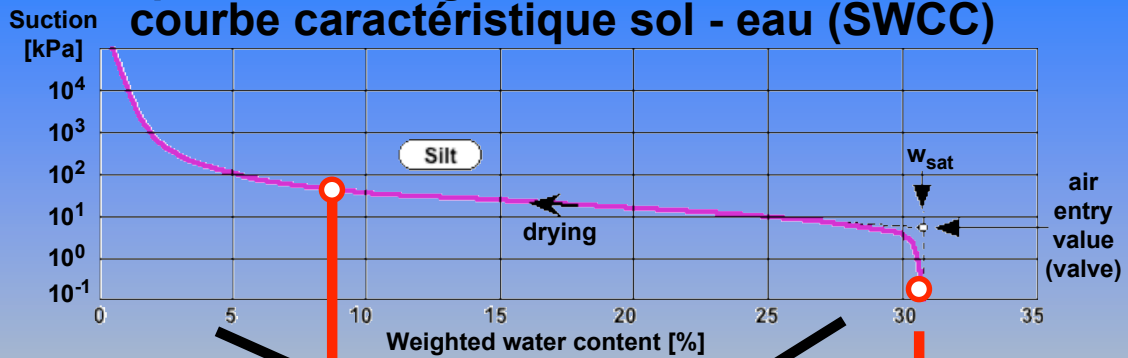
- **Dimensionnement des infrastructures et superstructures**
- **Pergélisols (permafrost)**
- **Bibliographie**

- **Exercice**

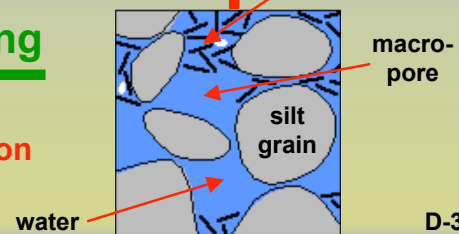
D-2 f

Phénomène du gel des sols (1)

Tout le problème du gel des sols est contenu dans la courbe caractéristique sol - eau (SWCC)

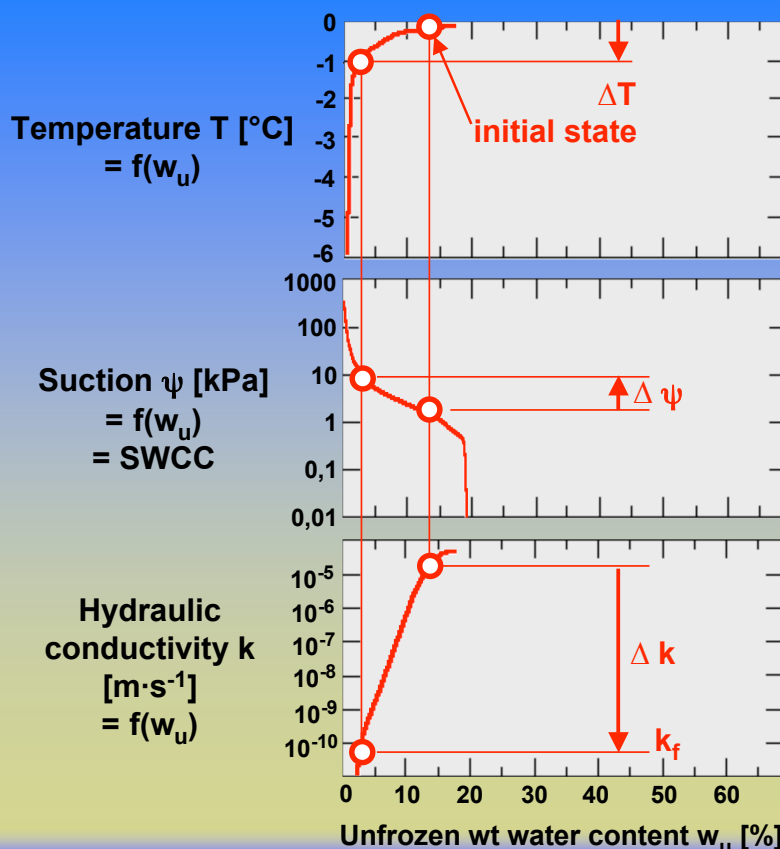


Freezing
= quick
unsaturation



D-3 f

Phénomène du gel des sols (2)



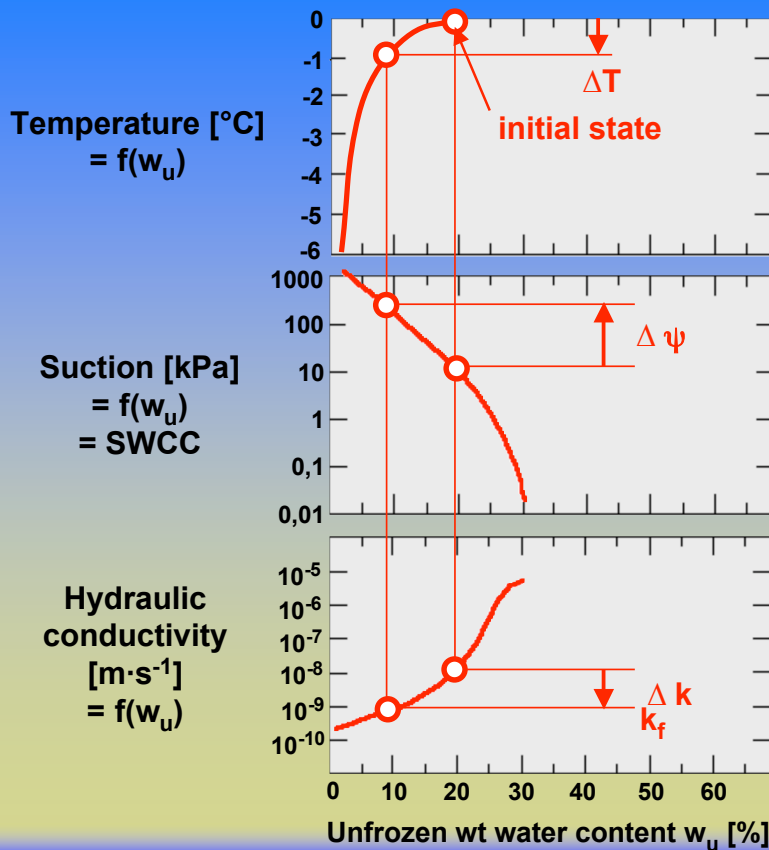
**Gélinivité des
sols**

**Sand ?
Not frost-
susceptible**

**k_f is too small for
the formation of
ice lenses during
a winter.**

D-4 f

Phénomène du gel des sols (3)



Gélivité des sols

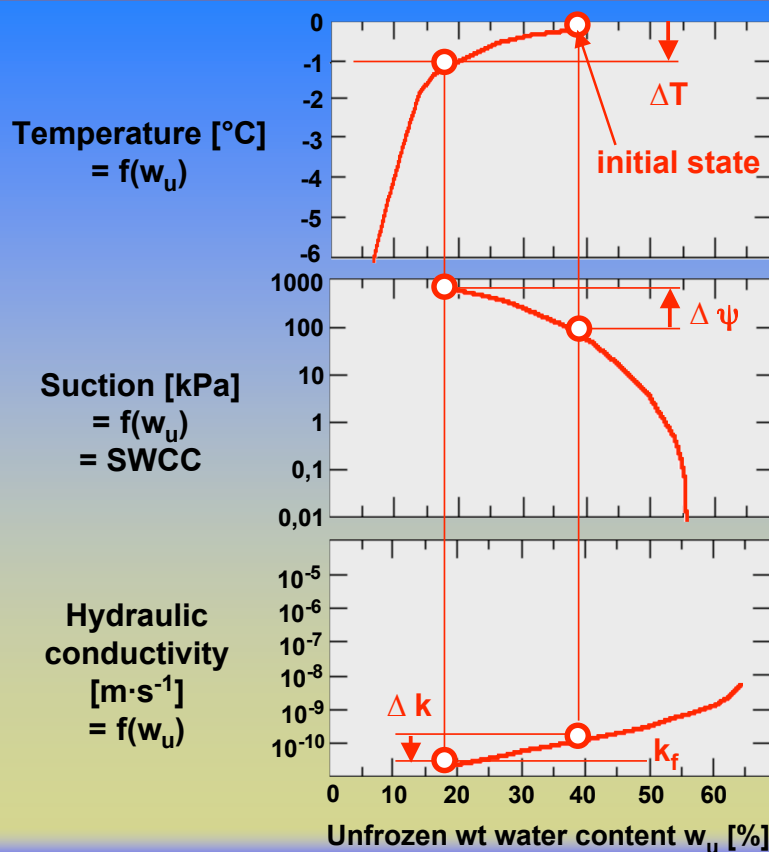
Silt ?

Frost-susceptible

k_f is compatible with the formation of ice lenses during a winter.

D-5 f

Phénomène du gel des sols (4)



Gélivité des sols

Clay ?

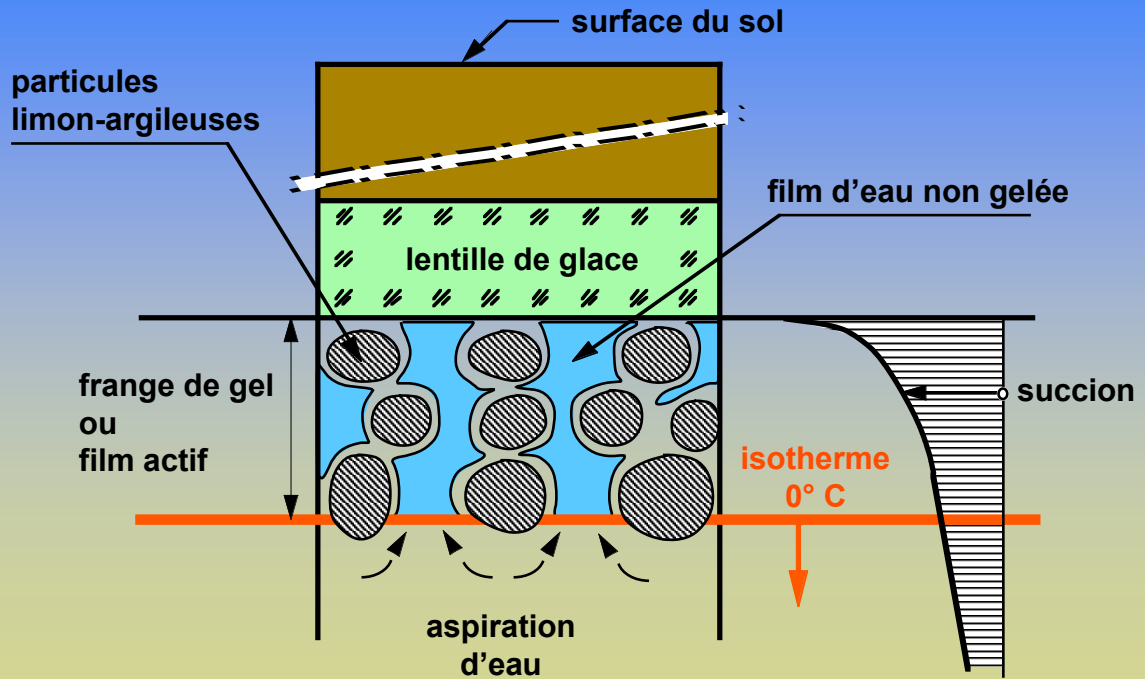
Not frost-susceptible

k_f is too small for the formation of ice lenses during a winter.

D-6 f

Phénomène du gel des sols (5)

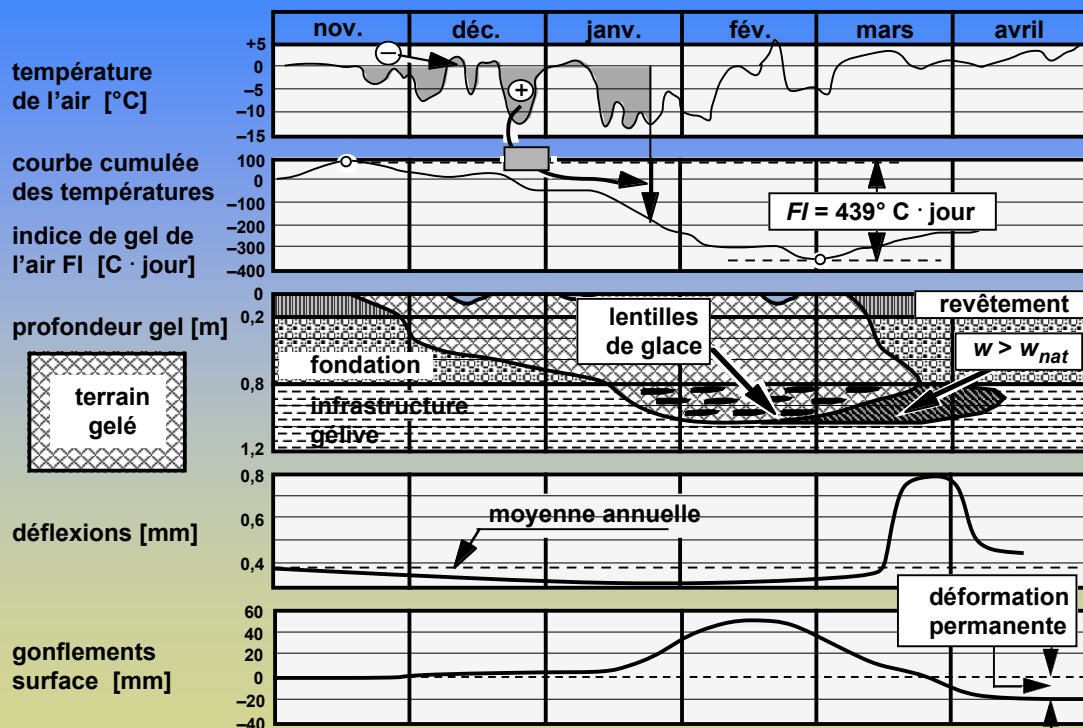
Frange de gel



D-7 f

Phénomène du gel des sols (6)

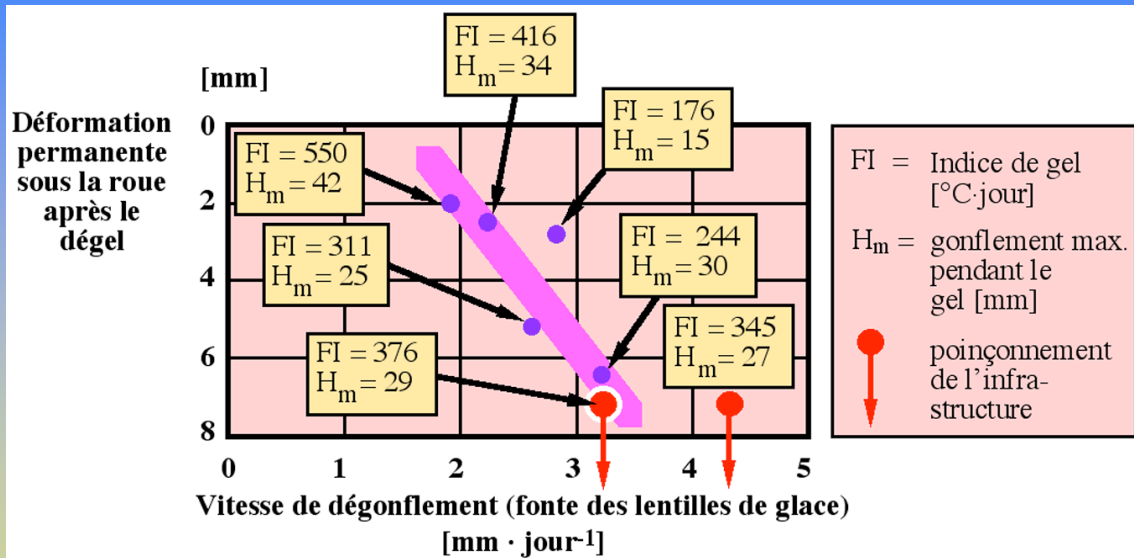
Gel et dégel sous une route



D-8 f

Phénomène du gel des sols (7)

Influence de la vitesse du dégel sur la capacité portante



D-9 f

Phénomène du gel des sols (8)

Vidéo de la formation de lentilles de glace

Avec un endoscope (exemple)

D-10 f

Vidéo de la fonte de lentilles de glace

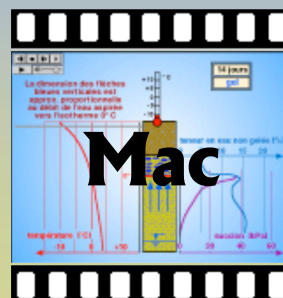
Avec un endoscope
(exemple)

D-13 f

Animation du phénomène du gel et du dégel des sols

PC =>

Animation frost en PCH.exe



15 min.

D-14 f

Phénomène du gel des sols (11)

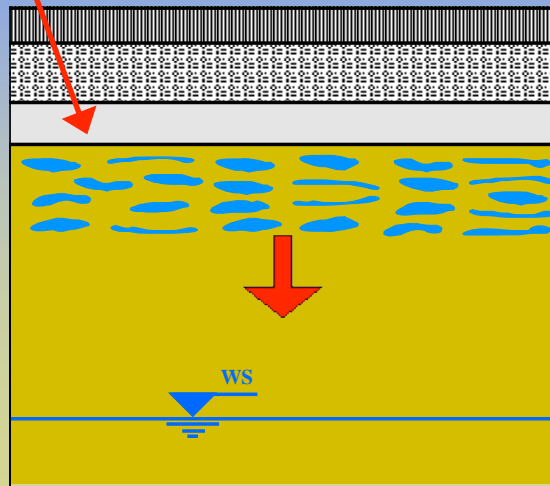
Où va l'eau de fonte des lentilles de glace sous une chaussée ?

Le problème :

Est-ce que la couche de drainage est utile ?

Dégel du printemps

Climat tempéré à froid:
gonflements modérés



Toute l'eau de fonte des lentilles est réaspirée vers le bas. Aucun écoulement vers la couche de drainage.

D-15 f

Phénomène du gel des sols (12)

Comportement probable

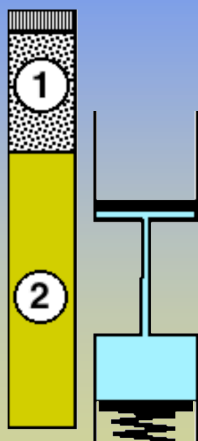
Avant
le gel

Gel

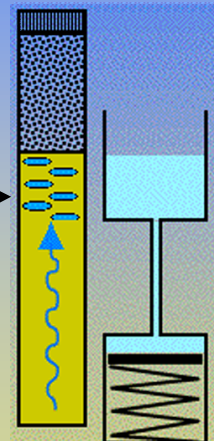
Dégel

① super-structure

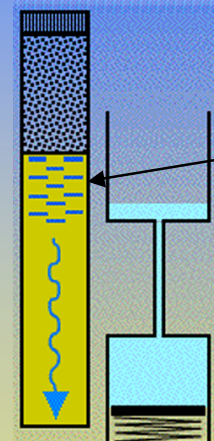
② limon gélif



ressort
détendu



ressort se
tendant
lentilles
de glace



ressort se
détendant

eau
interstitielle
résultant de
la fonte des
lentilles

D-16 f

Phénomène du gel des sols (13)

Profondeur du gel : équations générales

Equation de Fourier :
$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = -q^B = \frac{C}{\partial T / \partial t}$$

Conditions aux limites : $T|_{S1} = T_e$ $k_n \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{S2} = q^S$

température
de l'air

- radiations solaires
- convection
- évaporation
- etc.

La chaleur latente de fusion de la glace L est introduite par une relation spéciale $C = f(T)$ autour de 0°C .

$T =$	température	$T_e =$	température environnement sur surface S1
$k = f(T) =$	conductivité thermique	$q^S =$	flux thermique entrant sur la surface S2 (flux thermique concentré, convection, radiations solaires)
$q_B =$	chaleur générée par unité de volume	$k_n =$	conductivité thermique normale à la surface
$C =$	capacité thermique volumique		
$t =$	temps		

D-17 f

Phénomène du gel des sols (14)

Profondeur du gel : équations simplifiées

Solution de Stephan (1890)

$$X = \sqrt{\frac{2 \cdot k}{L} \cdot T_s^- \cdot t_g}$$

Stephan avec indice de gel de la surface

$$X = 416 \sqrt{\frac{k \cdot F I_S}{L}}$$

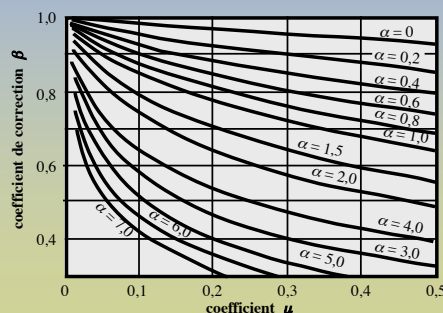
Solution de Berggren (1943)

$$X = \beta \cdot 416 \sqrt{\frac{F I_S}{L / k_m}}$$

Relation de Aldrich et Painter (1953)

Dans la solution de Berggren, introduction de couches avec des propriétés thermiques différentes

$X =$	profondeur du gel [m]
$k =$	conductivité thermique du sol [$\text{J} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]
$k_m =$	conductivité thermique moyenne [$\text{J} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$] = $(k_u + k_f)/2$
$k_u =$	conductivité thermique du sol non gelé
$k_f =$	conductivité thermique du sol gelé
$L =$	chaleur latente [$\text{J} \cdot \text{m}^{-3}$]
$T_s^- =$	température négative surface sol [$^\circ \text{C}$]
$t_g =$	durée du gel [s]
$\beta =$	coefficient de correction de Berggren



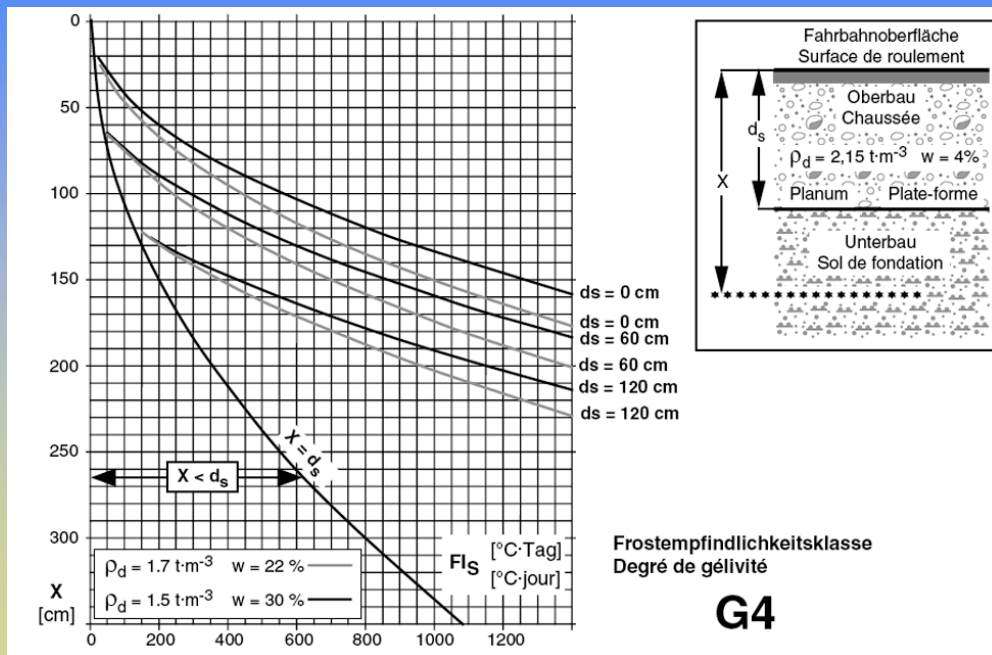
$$\alpha [-] = T_s / |T_s^-|$$

$$\mu [-] = \left(\frac{C_m}{L} \right) \cdot |T_s^-|$$

D-18 f

Phénomène du gel des sols (15)

Exemple abaque estimation profondeur du gel (normes suisses)



Gel des sols

Troisième partie

Michel Dysli

Laboratoire de mécanique des sols

D-1 f

Programme

Première partie

- **Indices de gel et de dégel**
- **Réchauffement du climat**
- **Paramètres météorologiques**

Deuxième partie

- **Phénomène du gel des sols**

Troisième partie

- **Dimensionnement des infrastructures et superstructures**
- **Pergélisols (permafrost)**
- **Bibliographie**

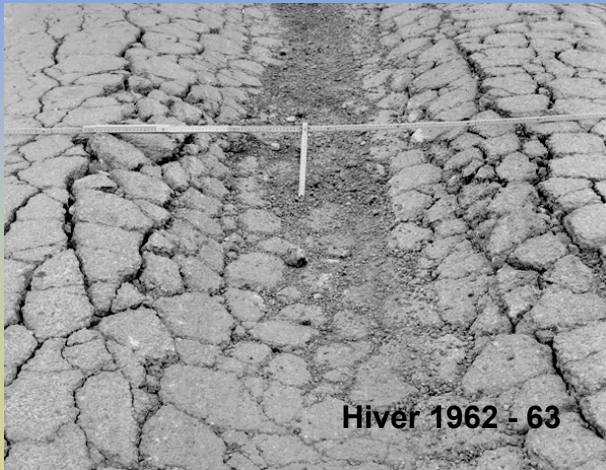
- **Exercice**

D-2 f

Dimensionnement au gel des infra et superstructures (1)

Un mauvais dimensionnement d'une fondation peut conduire à des dégâts très importants dans les gélisols (gel saisonnier) comme dans les pergélisols (permafrost).

Route suisse



Bâtiment sur un pergélisol



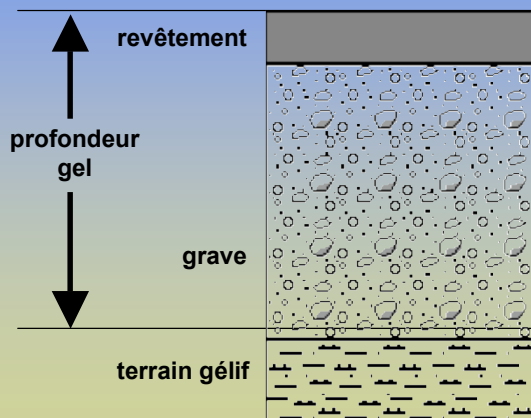
D-3 f

Dimensionnement au gel des infra et superstructures (2)

Routes et voies ferrées

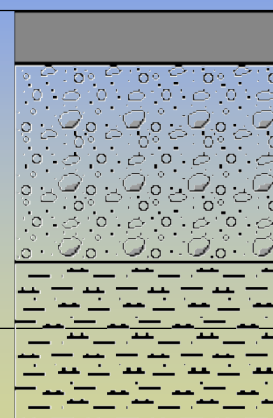
Deux approches :

Mise hors gel



Méthode coûteuse utilisée seulement dans certains cas particuliers

Dimensionnement à la diminution de la portance au dégel



Méthode générale

D-4 f

Routes et voies ferrées

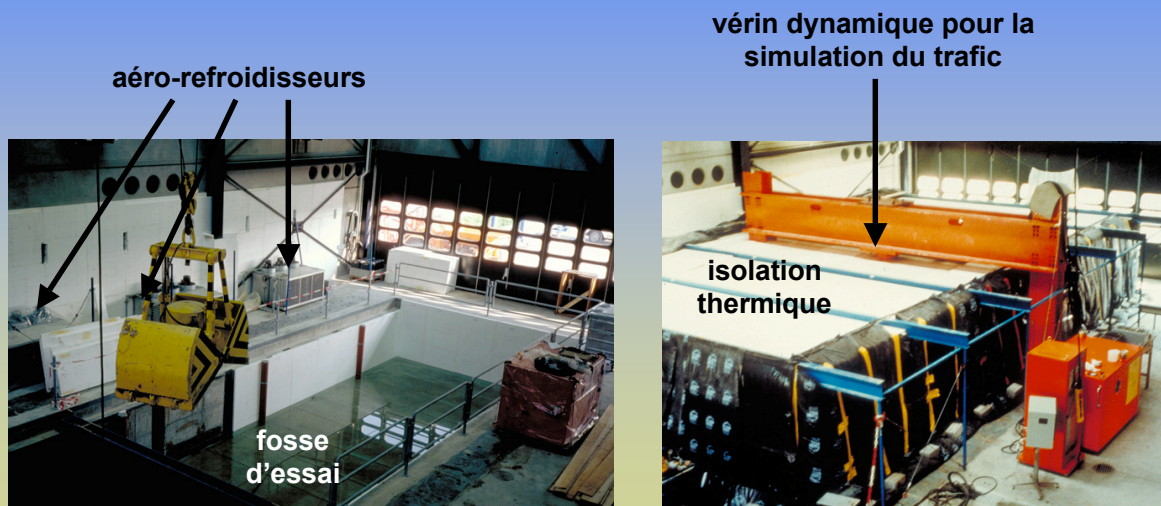
Deux méthodes de dimensionnement :

- Méthode empirique basée, le plus souvent, sur des essais en vraie grandeur : essais AASHO aux USA, essais dans la halle fosses d'Ecublens (EPFL) pour la Suisse => exercice no 5.
- Méthode analytique basée sur le calcul de la réponse théorique de la structure, soumise à une sollicitation, avec une association de cette réponse au comportement de chaussées d'essai. Elle se base en particulier sur des modèles d'endommagement (de performance). Les effets du gel et du dégel sont intégrés dans la méthode.

D-5 f

Routes et voies ferrées

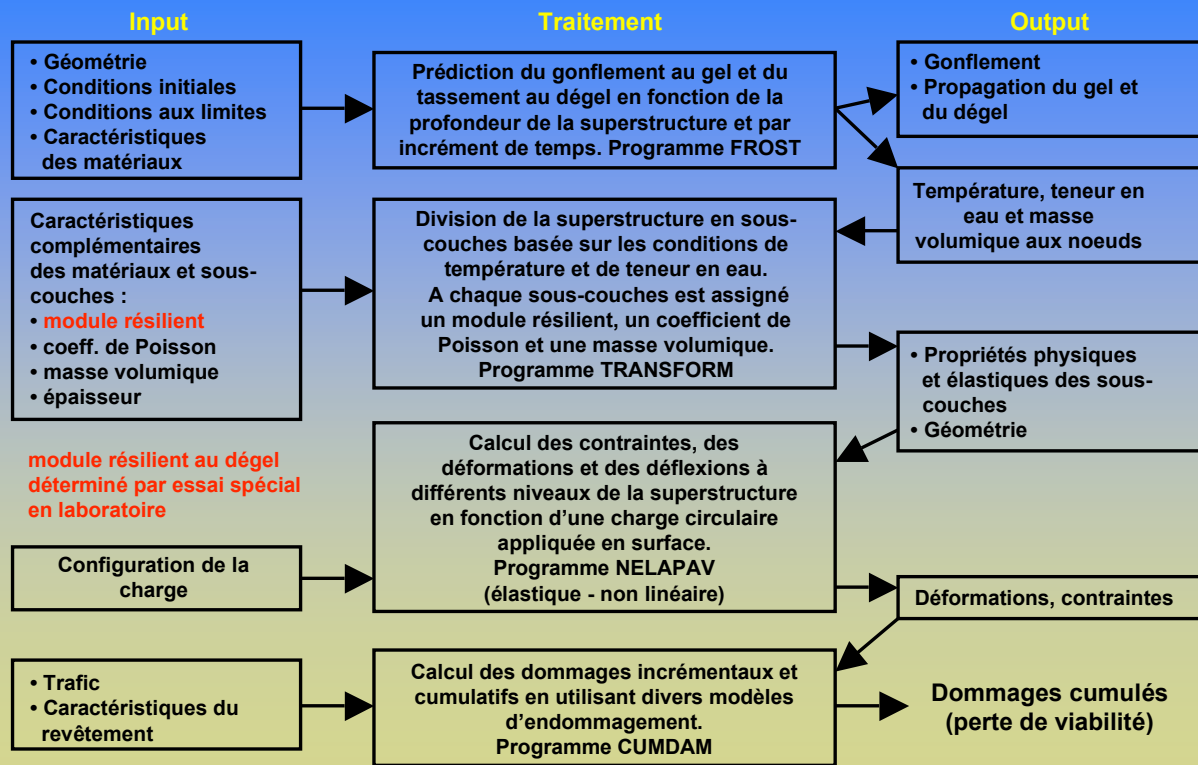
Exemple de la mise au point d'une méthode empirique : essais dans la halle fosses d'Ecublens



D-6 f

Dimensionnement au gel des infra et superstructures (5)

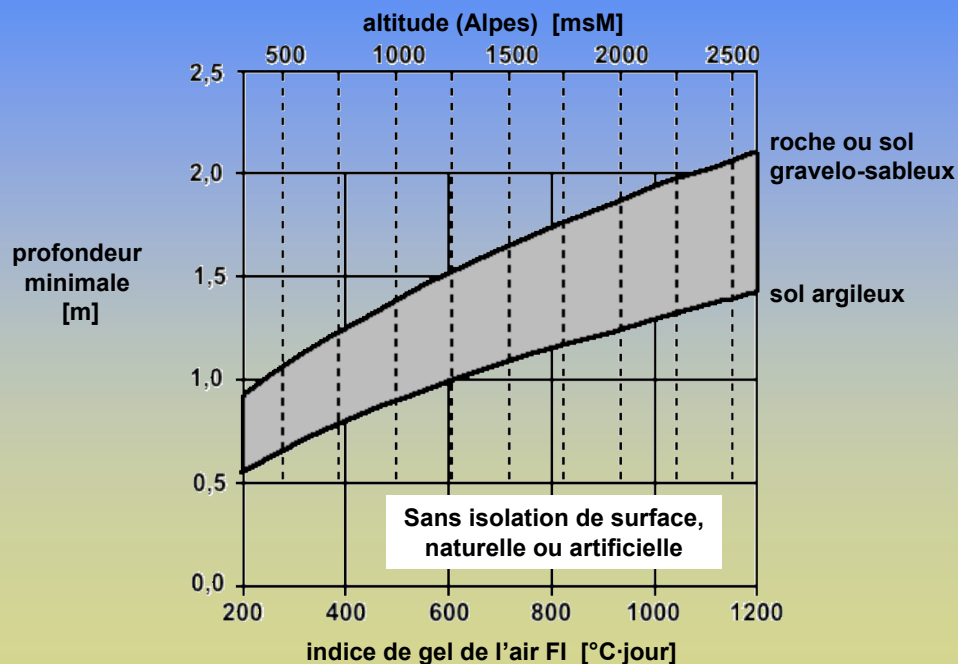
Routes : Méthode analytique : procédure du CRREL



D-7 f

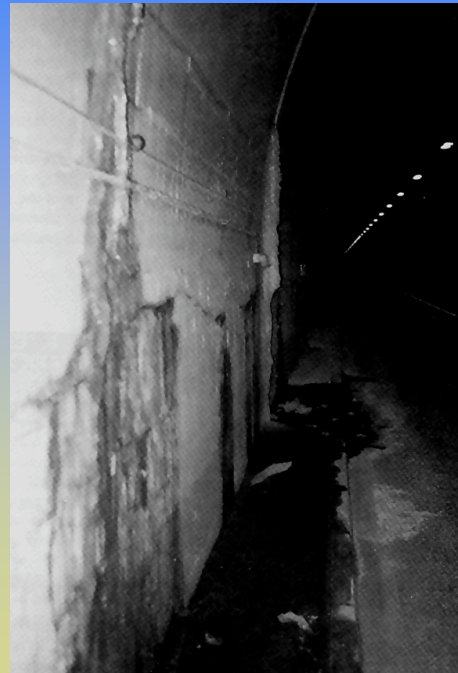
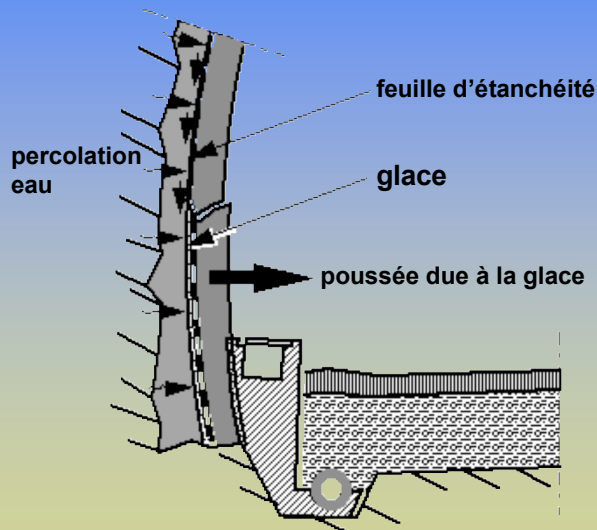
Dimensionnement au gel des infra et superstructures (6)

Canalisations de distribution d'eau en montagne (gélisol) - profondeur minimale



D-8 f

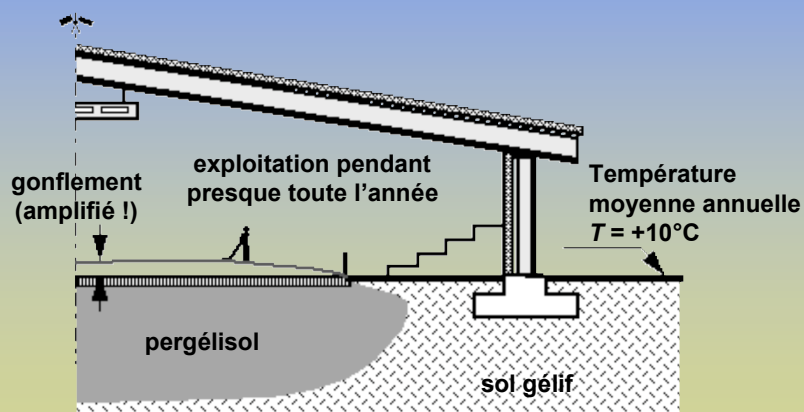
Tunnel ventilé (routier) en montagne



D-9 f

Patinoire artificielle

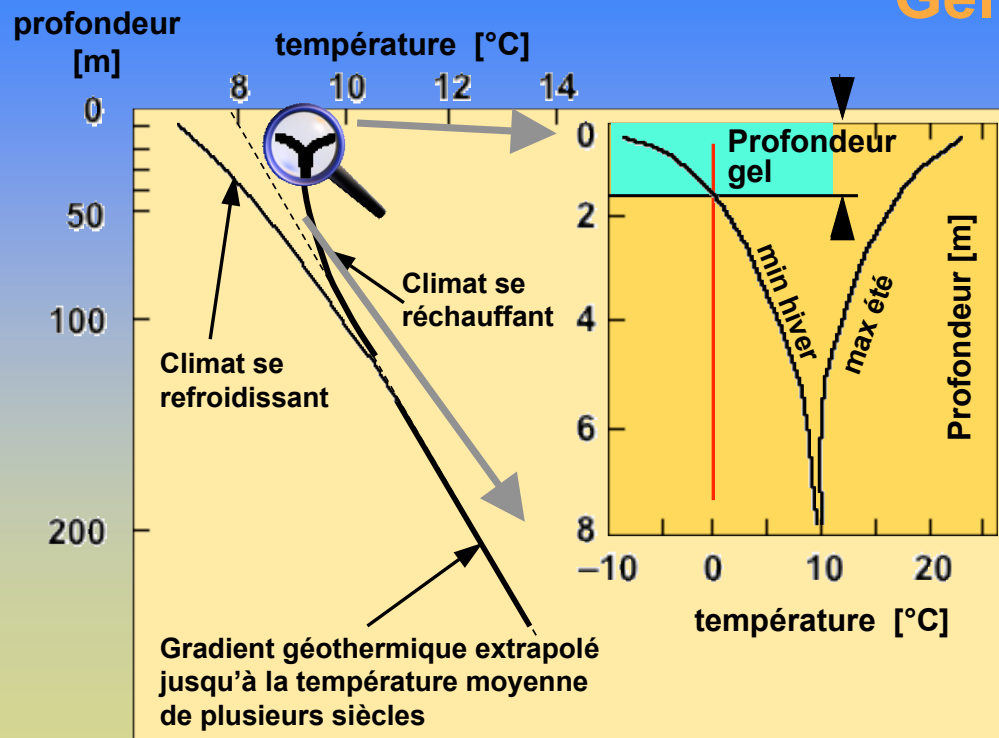
Attention, une patinoire artificielle, exploitée plus de 8 mois par an, peut créer un pergélisol et, si le sol est gélif, les gonflements résultant peuvent la rendre inutilisable ...



D-10 f

Les pergélisols (1)

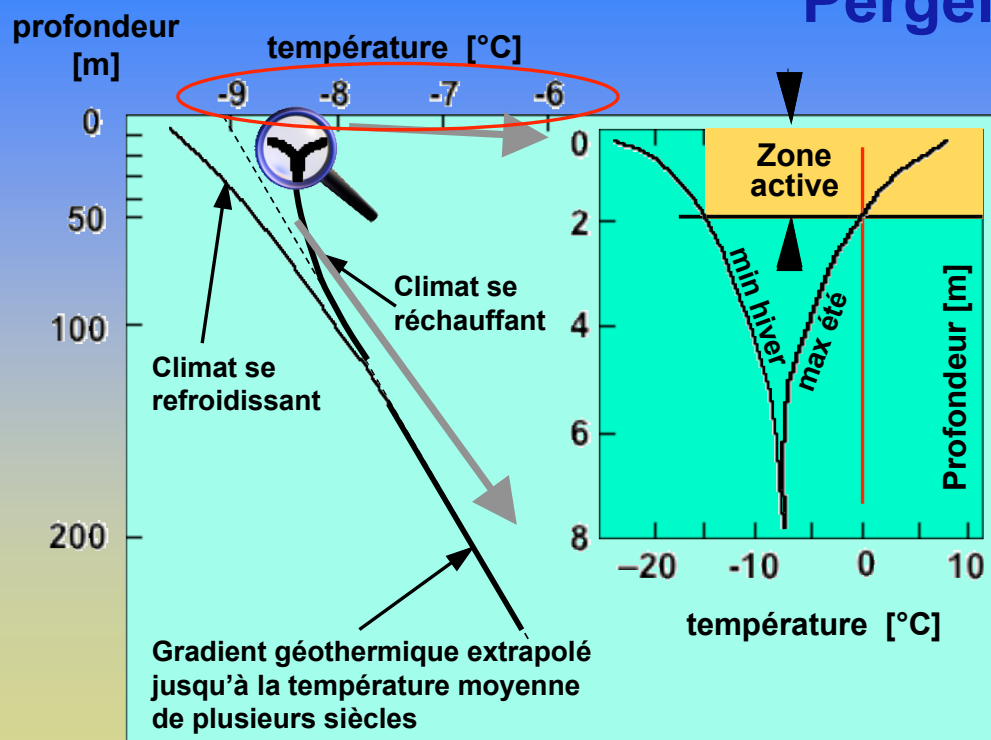
Gélisol



D-11f

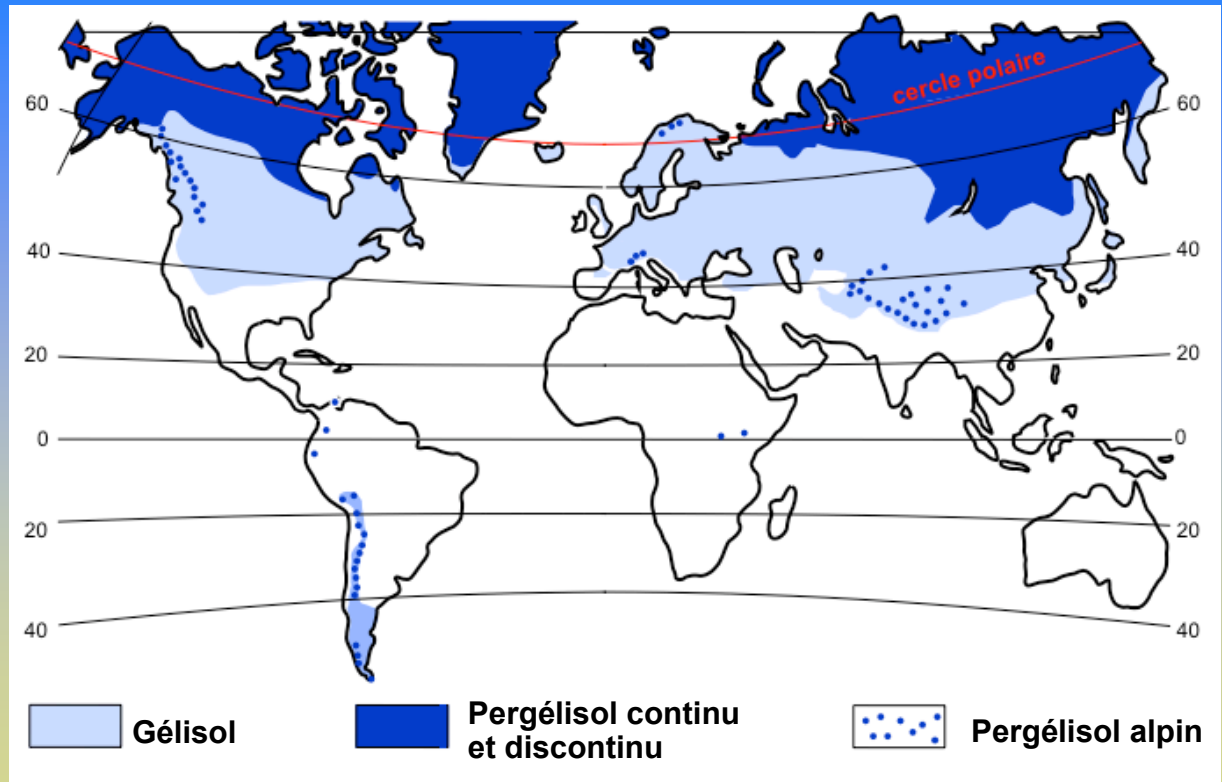
Les pergélisols (2)

Pergélisol



D-12f

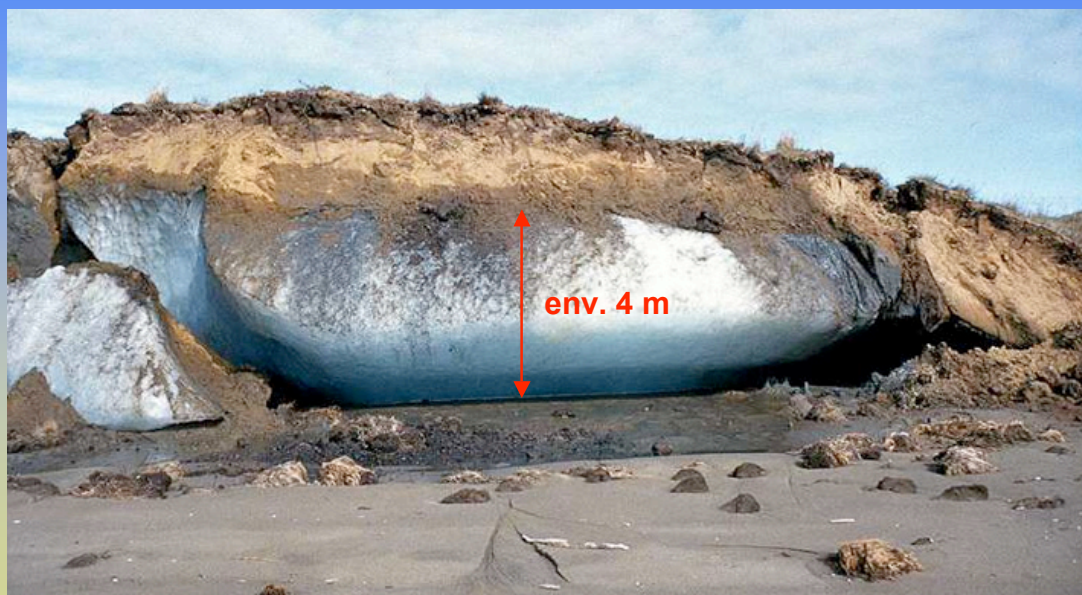
Les pergélisols (3)



D-13 f

Les pergélisols (4)

Les lentilles de glace peuvent atteindre plusieurs mètres d'épaisseur dans les pergélisols.



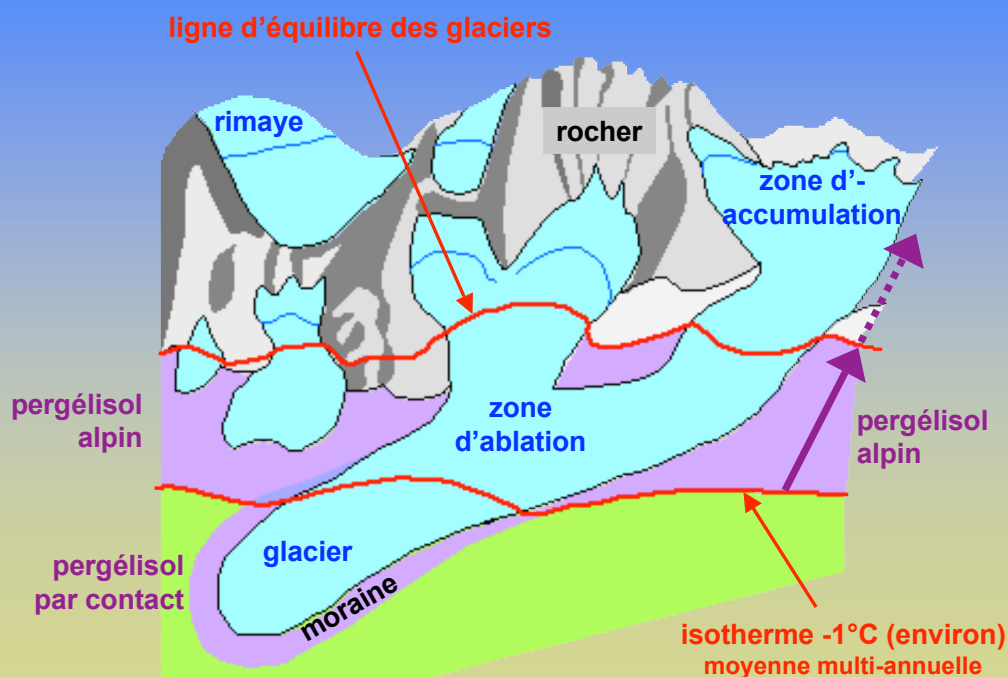
An ice lens in permafrost : Coppermine river, Northwest Territories, Canada

by Matthias Jacob

D-14 f

Les pergélisols alpins (5)

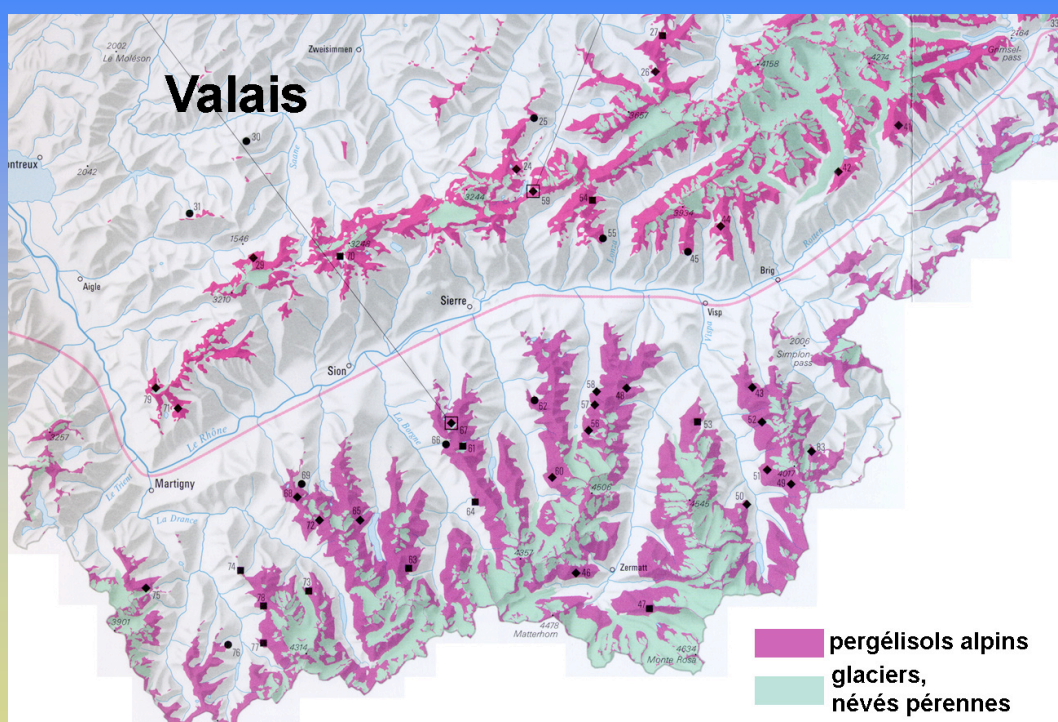
Limites des pergélisols alpins



D-15 f

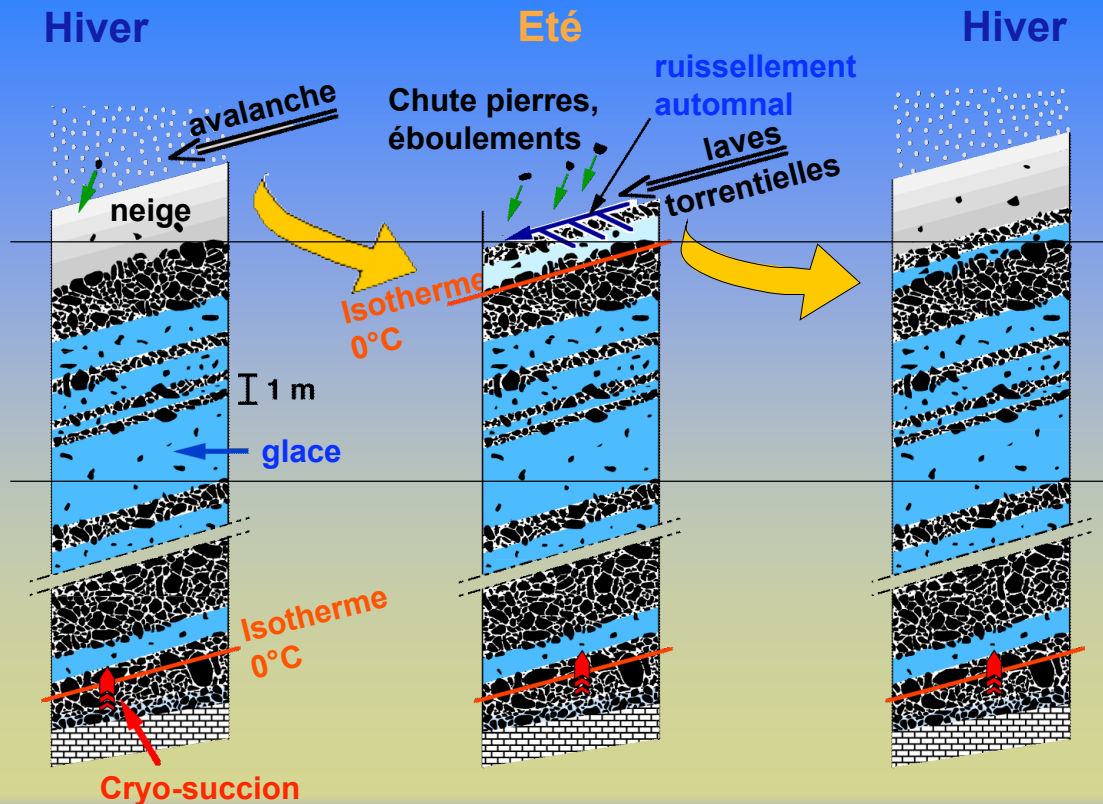
Les pergélisols alpins (6)

Exemple de limites de pergélisols alpins



D-16 f

Formation des pergélisols alpins (7)



D-17 f

Les pergélisols alpins (8)

Glaciers rocheux

Glacier rocheux = pergélisol alpin en mouvement ou ayant été en mouvement

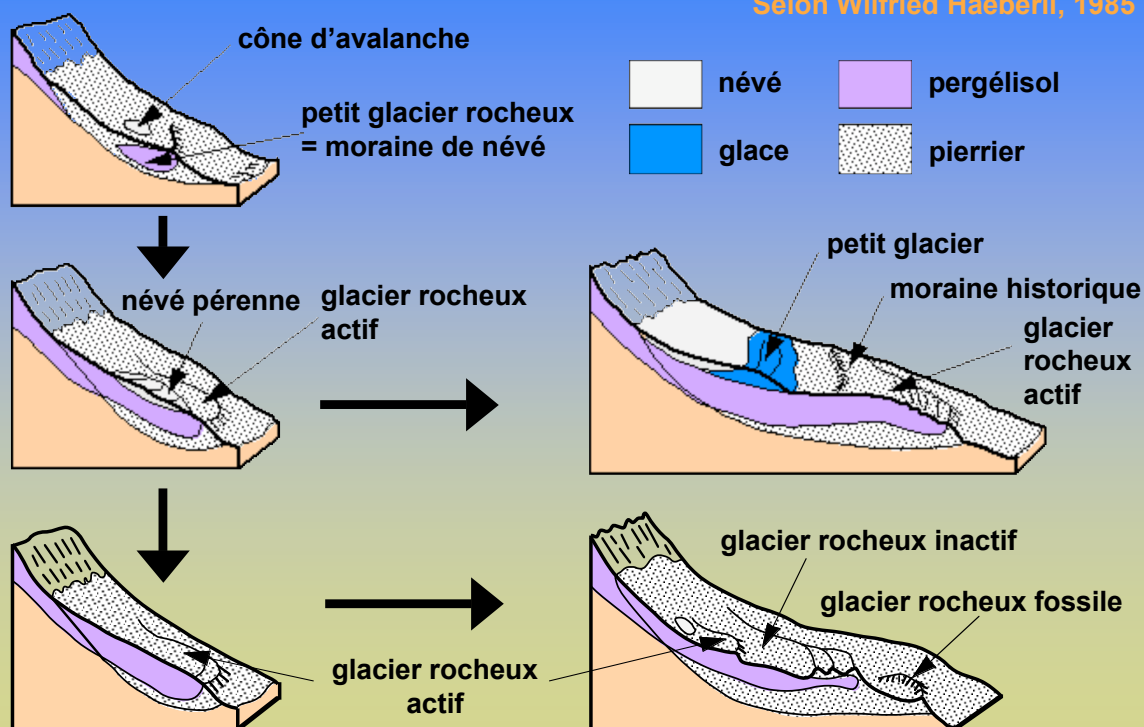
- Actif :** aujourd'hui en mouvement; contient un volume important de glace
- Inactif :** plus ou pas encore en mouvement; contient un peu de glace
- Fossile :** ancien pergélisol sans glace ayant conservé une partie de la structure du pergélisol

D-18 f

Les pergélisols alpins (9)

Formation des glaciers rocheux

Selon Wilfried Haeberli, 1985



D-19 f

Les pergélisols alpins (10)

Glacier rocheux du vallon d'Arbole (région Aoste - Mt Emilius)

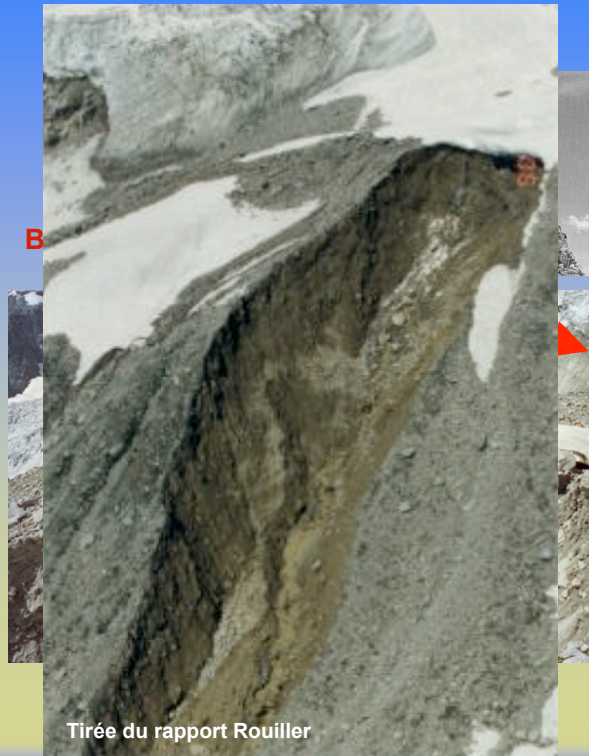


actif

D-20 f

Les pergélisols alpins (11)

Laves torrentielles probablement dues à la fonte d'un pergélisol alpin - La Fouly, 10 juillet 1990



Légers
dégâts

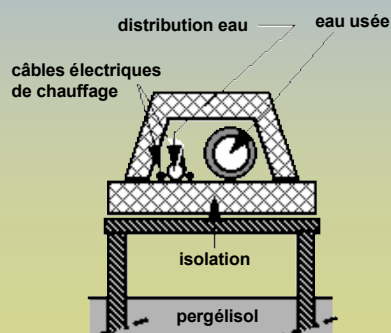
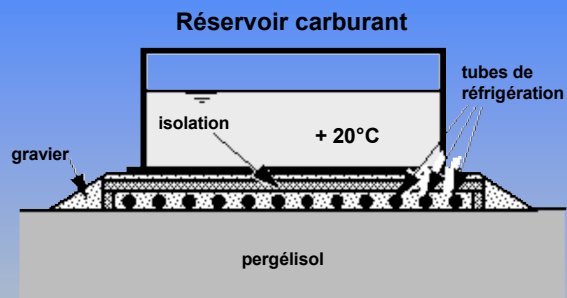
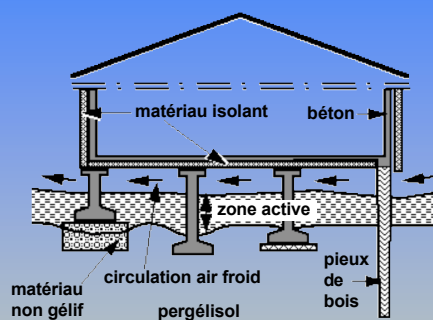


Laves vers 1600 msm

D-21 f

Constructions sur les pergélisols (12)

Principe : éviter que le pergélisol (alpin ou autre) ne fonde, surtout par la chaleur provenant de la construction.



Bivouac en haute montagne
Pour cabane importante :
fondation en béton armé

D-22 f

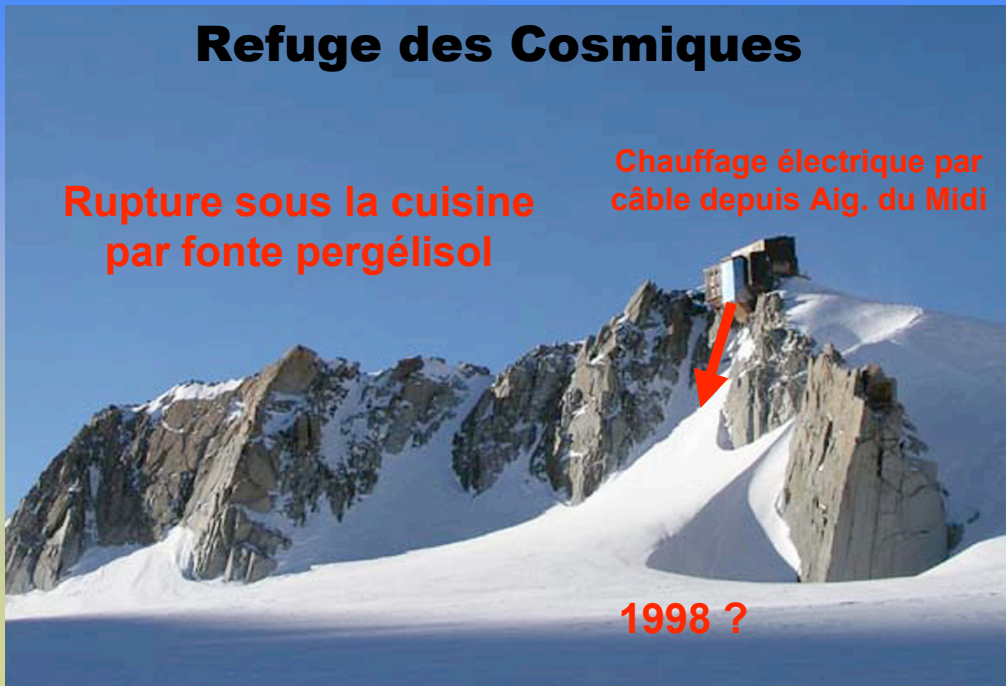
Constructions sur les pergélisols (13)

Refuge des Cosmiques

Rupture sous la cuisine
par fonte pergélisol

Chauffage électrique par
câble depuis Aig. du Midi

1998 ?



D23 f

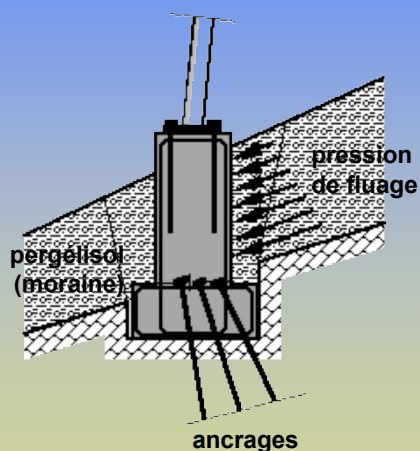
Constructions sur les pergélisols (14)

Téléphérique, ancrages

station supérieure téléphérique

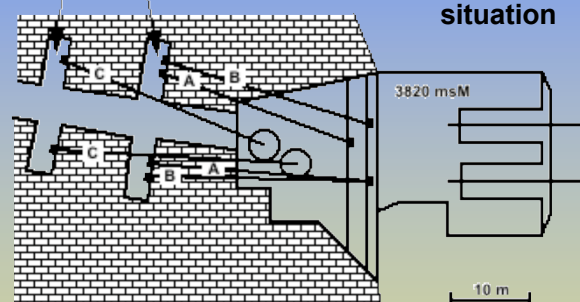
L'injection des ancrages est
impossible car le coulis gèle

fondation pylône



galeries transversales

situation



- A ancrages des câbles de traction
- B ancrages de la charpente métallique
- C ancrages des câbles porteurs

D24 f

Bibliographie

Andersland O.B., Ladanyi B., 2004, *Frozen Ground Engineering*, 2nd Edition, John Wiley & Sons, Inc.

Dysli M. 1991, *Le gel et son action sur les sols et les fondations*. Presse polytechnique et universitaire romande, 250 p., 1991. Prix Henri-Courbot 1993.

Dysli M., Lunardini V., Stenberg L., 1997, Related effects on frost action: Freezing and solar radiation indices. *Proc. Int. Symp. on Ground Freezing and Frost Action in Soils, Lukeå, Sweden*, pp. 3-23.

Gel des sols

Supplément sur le verglas

Michel Dysli

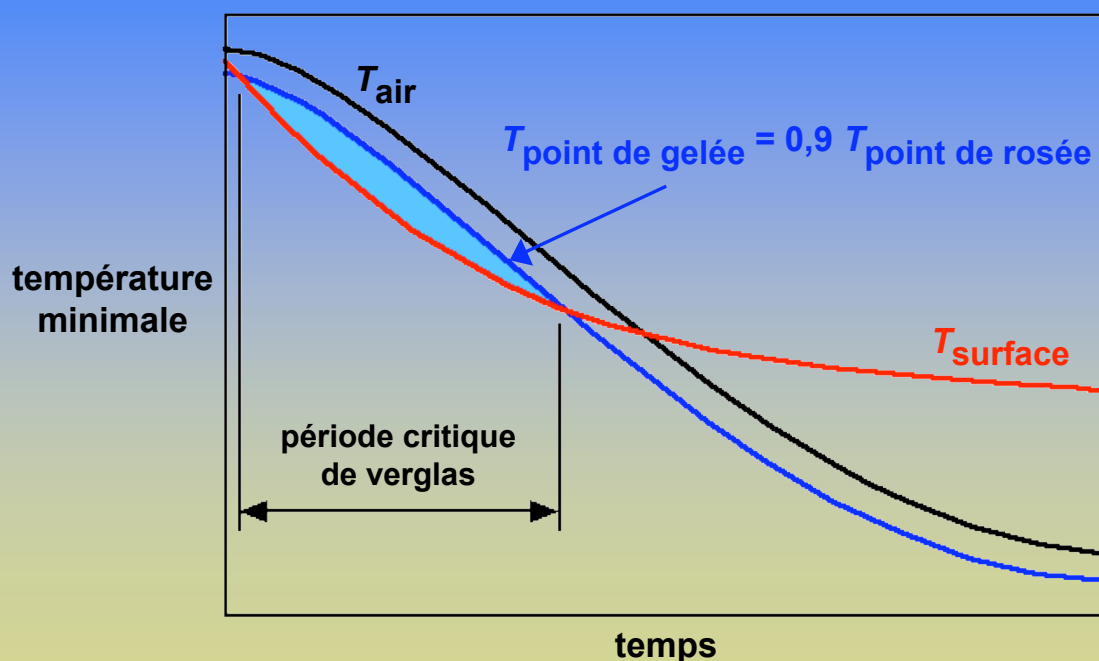
Laboratoire de mécanique des sols

D-1 f

Principaux paramètres intervenant dans la formation du verglas : dénommé aussi givre (compacté par la trafic) givrage


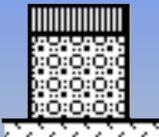



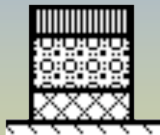






- la température de l'air,
- la teneur en eau de l'air (degré hygrométrique),
- la distribution des diamètres des gouttelettes d'eau en surfusion dans l'air (eau dont la température est inférieure à 0° C mais qui est maintenue sous forme liquide par la tension superficielle),
- la température de la surface de la route ou du sol,
- les propriétés chimiques de la surface de la route qui peuvent transformer la nature de l'eau des gouttelettes,
- la capacité thermique des matériaux sous la surface de la route.

D-2 f



Risque de formation du verglas

Le risque de formation du verglas dépend aussi fortement de la **capacité thermique et de la conductivité du support de la surface**, soit des différentes couches d'une superstructure routière ou aéroportuaire. On parle alors de la **sensibilité au verglas**

sensibilité au verglas 	faible	moyenne	grande	très grande	
type de superstructure				 enrobés drainant !	
				 pont	
	 revêtement	 grave	 Stabilisation au ciment	 isolation	 béton

D-5 f

Lutte contre le verglas (1)

Moyens temporaires : fondants chimiques et abrasifs

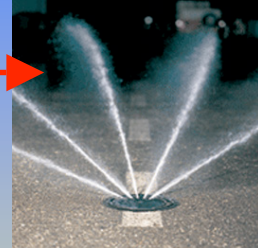
FONDANTS SOLIDES	prévention	NaCl 5-15 g · m ⁻²				
			NaCl + CaCl ₂ 10-20 g · m ⁻²			
	verglas formé	NaCl 10-15 g · m ⁻²		NaCl + CaCl ₂ → 30 g · m ⁻²		
			NaCl + CaCl ₂ 15-25 g · m ⁻²	NaCl + CaCl ₂ → 40 g · m ⁻²		
FONDANTS LIQUIDES	prévention	glycol, méthanol				
	verglas formé	glycol, méthanol				
ABRASIFS		sable 0,05-2 mm, gravillon 3-10 mm surtout pour verglas formé				
		100-300 g · m ⁻²				
températures [° C]		0	-5	-10	-15	-20

D-6 f

Lutte contre le verglas (2)

Moyens permanents :

- bonne géométrie de surface permettant un bon écoulement de l'eau
- revêtement de grande rugosité
- aspersion de fondant liquide, verticalement ou latéralement



Presque tous les autres moyens utilisés ces derniers vingt ans ont été abandonnés car : trop coûteux (chauffage électrique de la chaussée), présentant de gros inconvénients (Verglimit qui était trop glissant en été) ou pas assez efficaces.

Le chauffage électrique de la chaussée est encore utilisé sur les ponts dans les régions très froides. On l'utilise aussi, dans les Alpes suisses, pour les rampes de garages souterrains.

D-7 f

Lutte contre le verglas (3)

Moyens indirects :

- Pneus à clous : encore autorisés en Suisse mais quasiment plus utilisés ($V_{\max} = 80 \text{ km/h}$). Ils sont par contre encore utilisés dans les pays du nord. En Finlande, même les camions en sont pourvus.

Les pneus à clous ont été une catastrophe pour les routes suisses : des centaines de millions de CHF de dégâts !

- Le meilleur moyen indirect est le rail ...
Un train n'a jamais déraillé à cause du verglas !

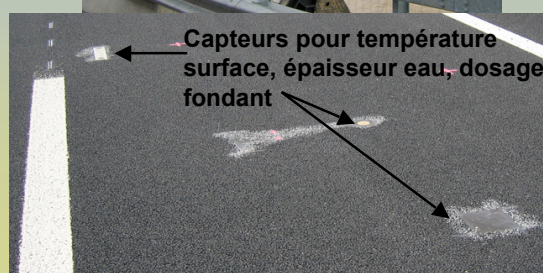
D-8 f

Prévision du verglas

Le long des routes, stations de mesure de paramètres tels que :

- la température de l'air,
- le degré hygrométrique de l'air,
- les précipitations,
- éventuellement la hauteur de neige,
- la température de la surface de la route,
- la conductivité électrique de la surface de la route qui permet de connaître le degré d'humidité du revêtement,
- la température de la surface de la route après un réchauffement ou un refroidissement intermittent du capteur qui permet de mieux juger de l'état momentané de la surface du revêtement.

avec liaison sur un ordinateur et un logiciel signalant les conditions dangereuses (alarme).



D-9 f

Fin supplément verglas

D-10 f