

Cours climatologie pour ingénieurs et architectes
ENAC EPFL 2006

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

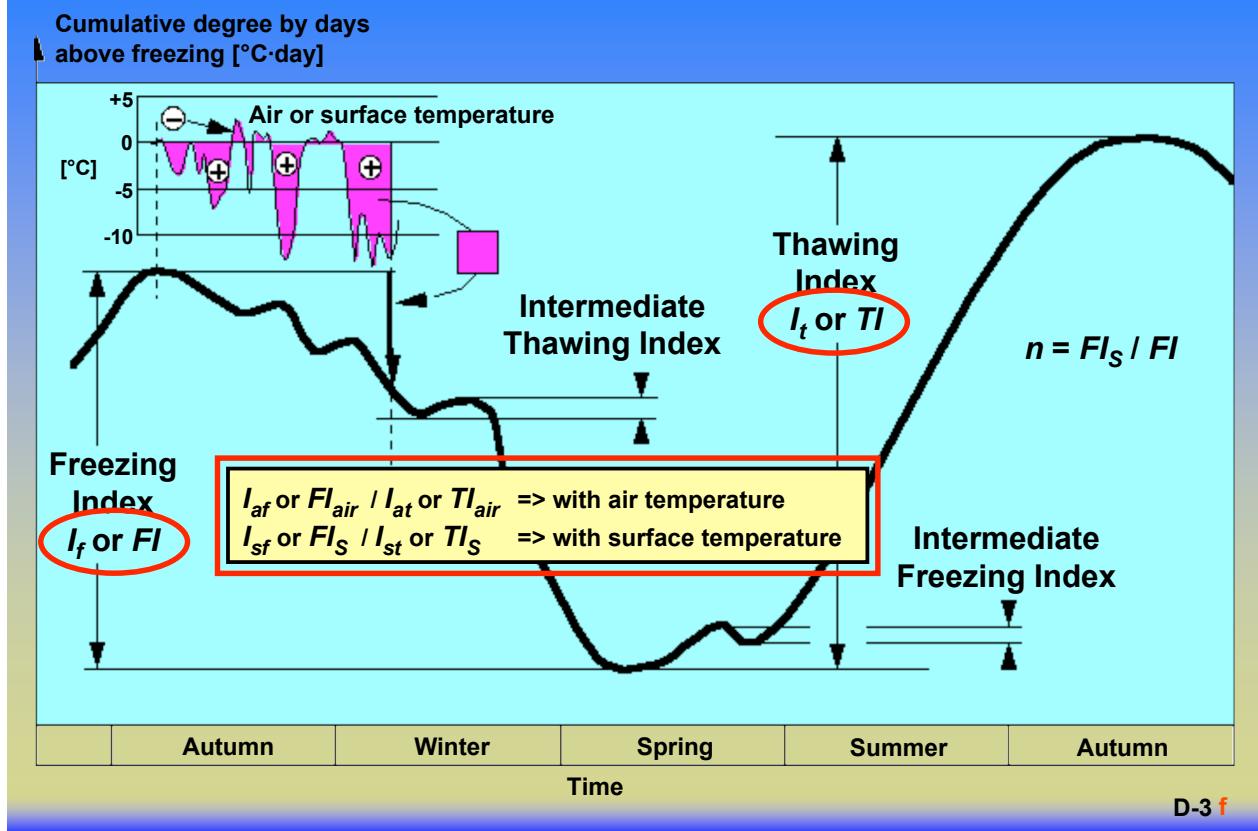
Troisième partie

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

- Exercice

D-2 f

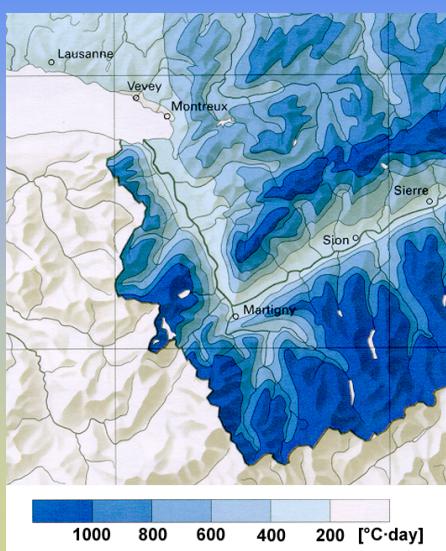
Indices de gel et de dégel (1)



D-3 f

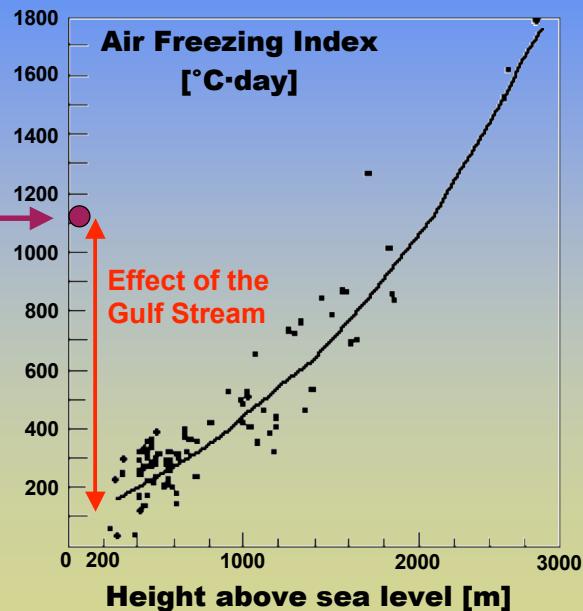
Indices de gel et de dégel (2)

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

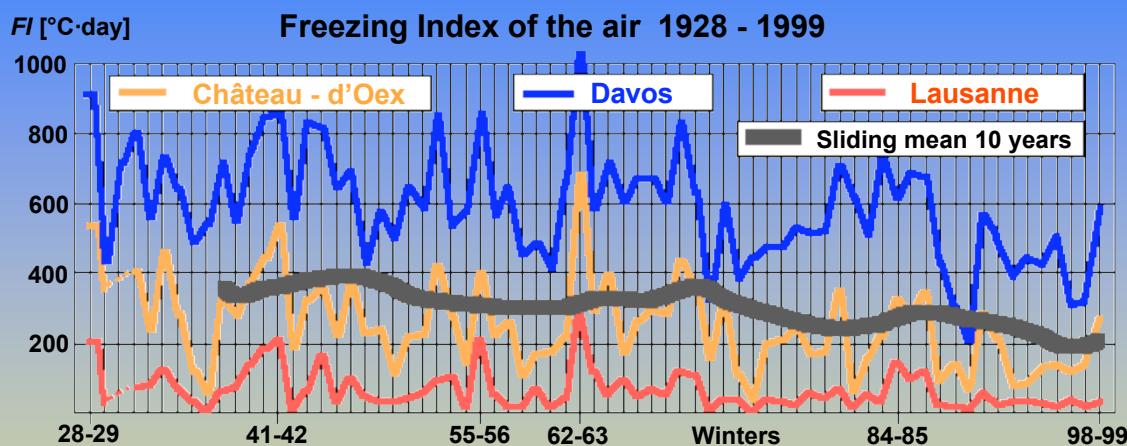
Quelques solutions :

- 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 :

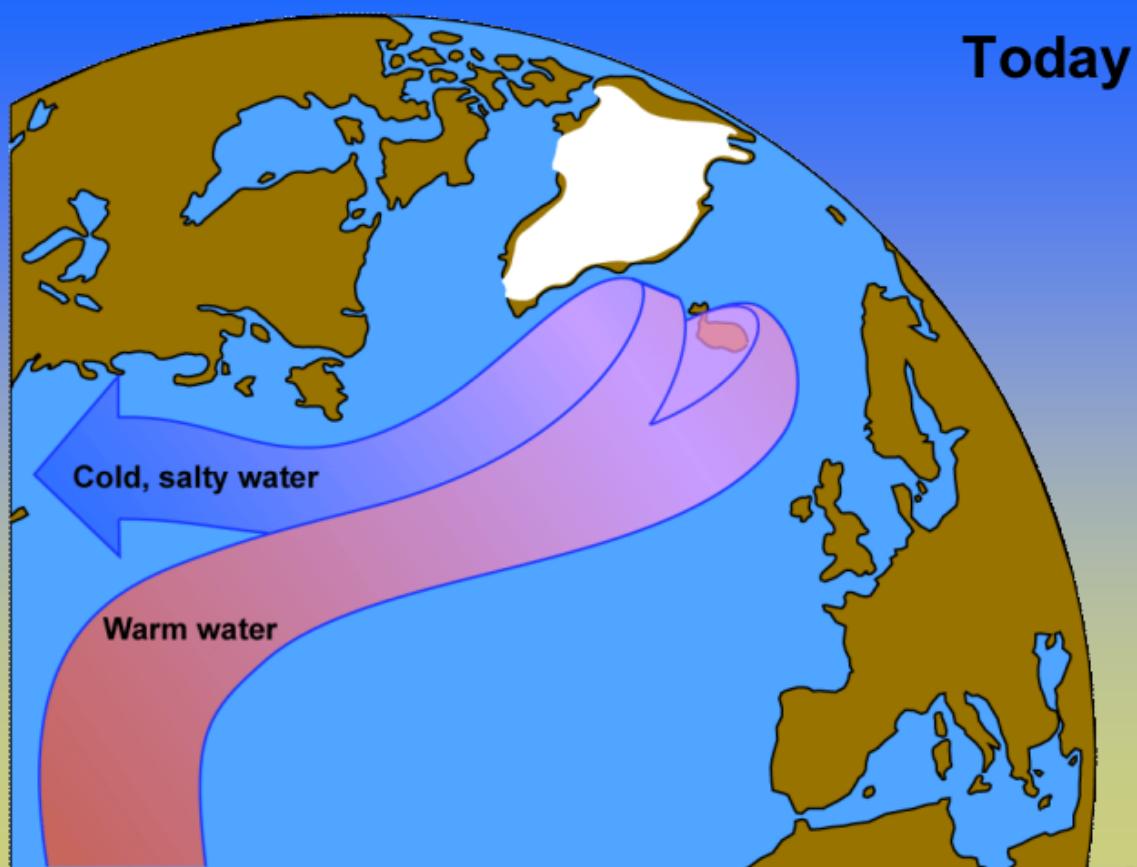
Le centre et le nord de l'Europe sont anormalement chauds. Le responsable est le **Gulf Stream**. L'indice de gel de l'air de Montréal est d'environ $1000^{\circ}\text{C}\cdot\text{jour}$ et, à la même latitude, celui de Genève est seulement d'environ $170^{\circ}\text{C}\cdot\text{jour}$.

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.

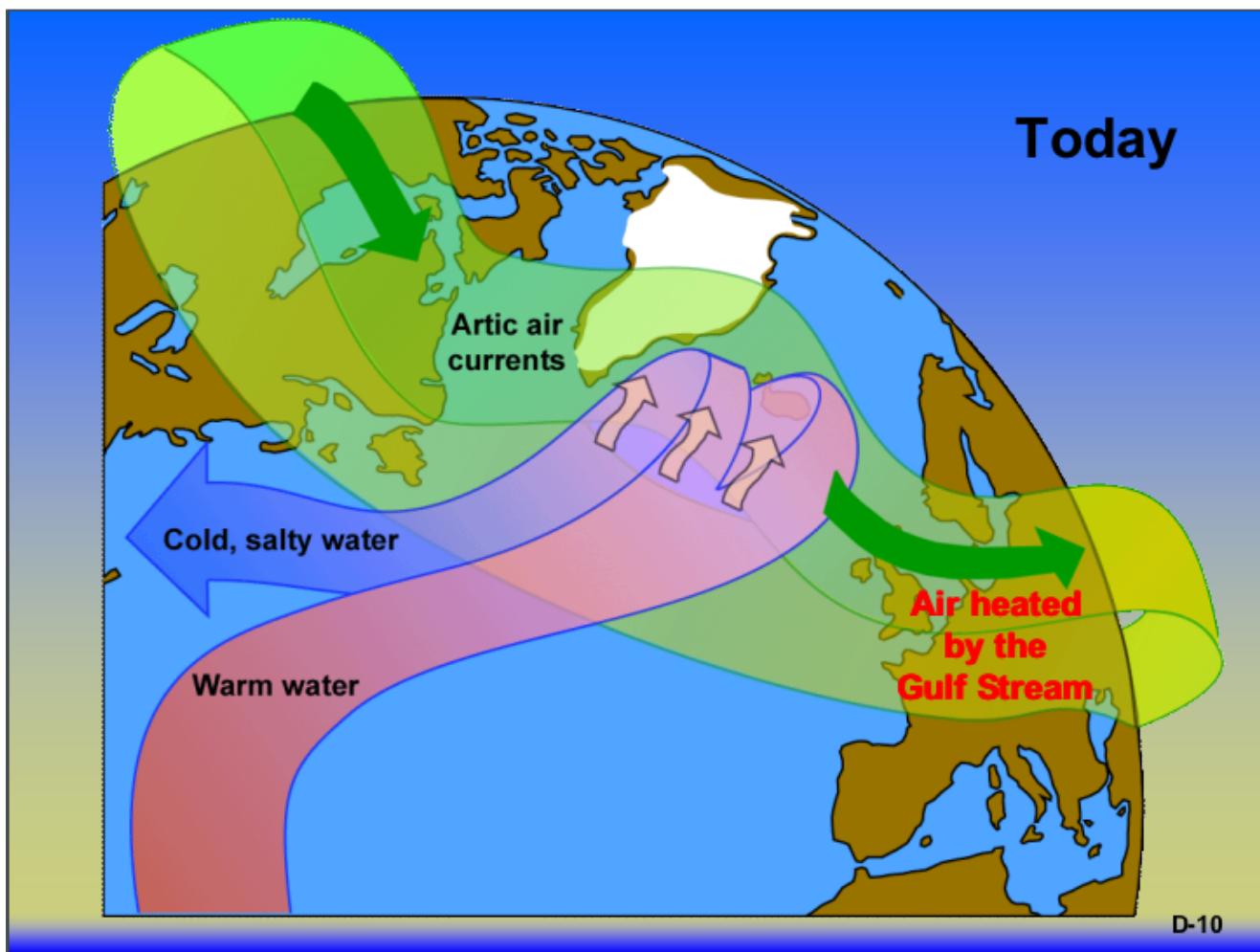
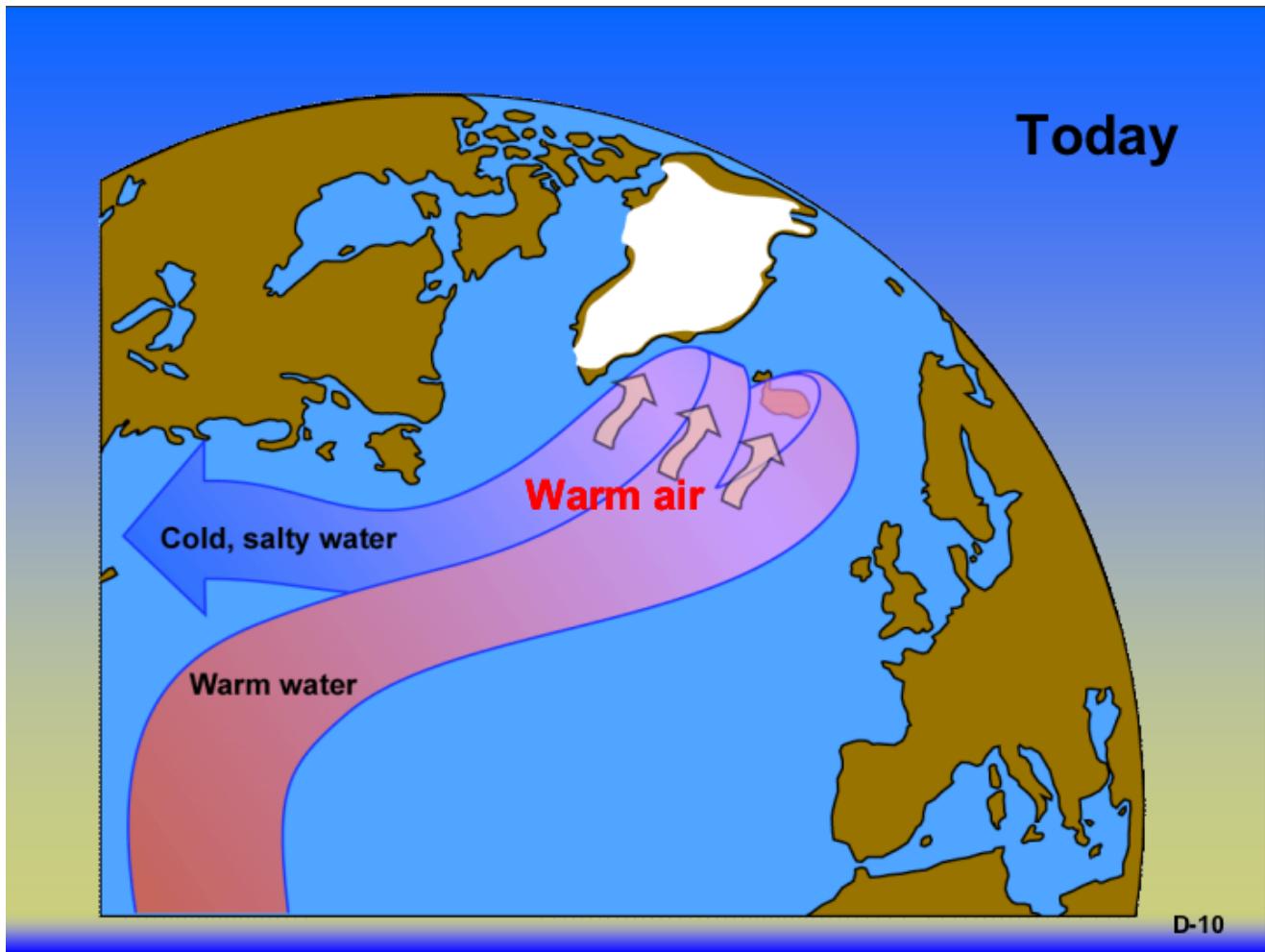
Résultat : Après environ un siècle de réchauffement du climat, la température du centre et du nord de l'Europe va diminuer ...

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

D-9 f



D-10



**During
global warning**



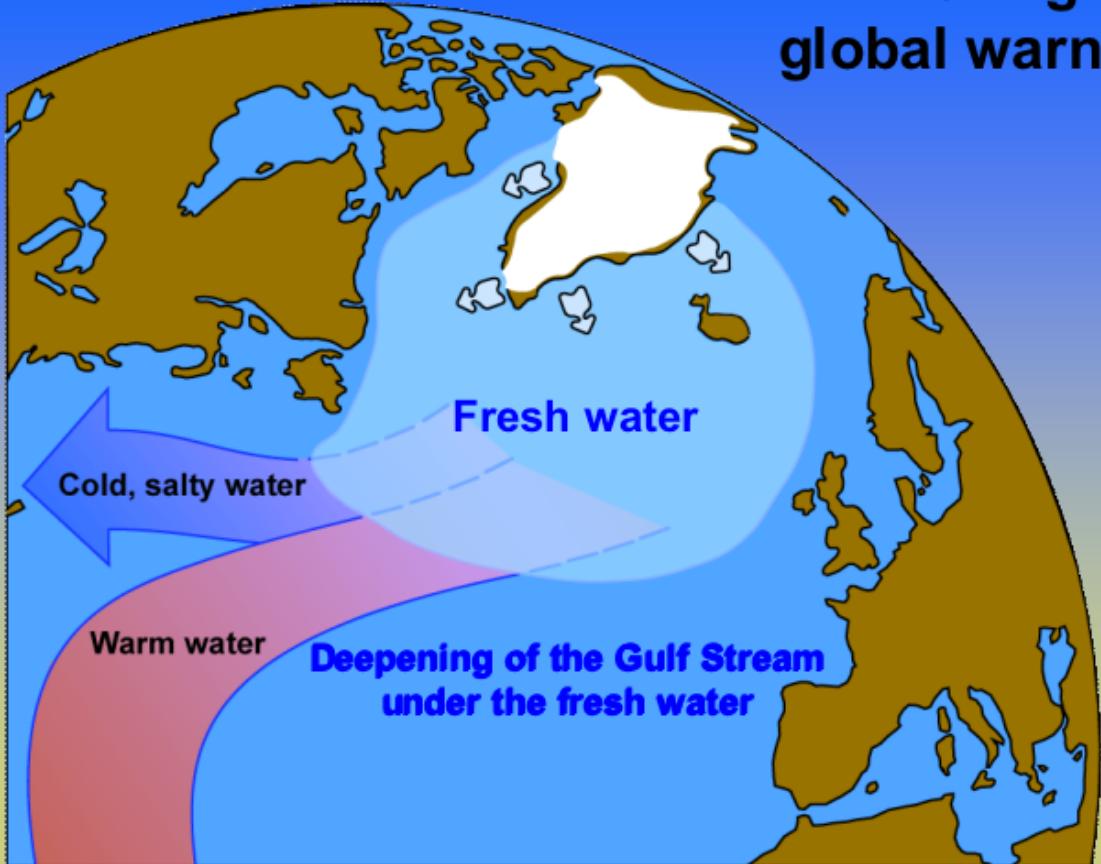
D-10

**During
global warning**



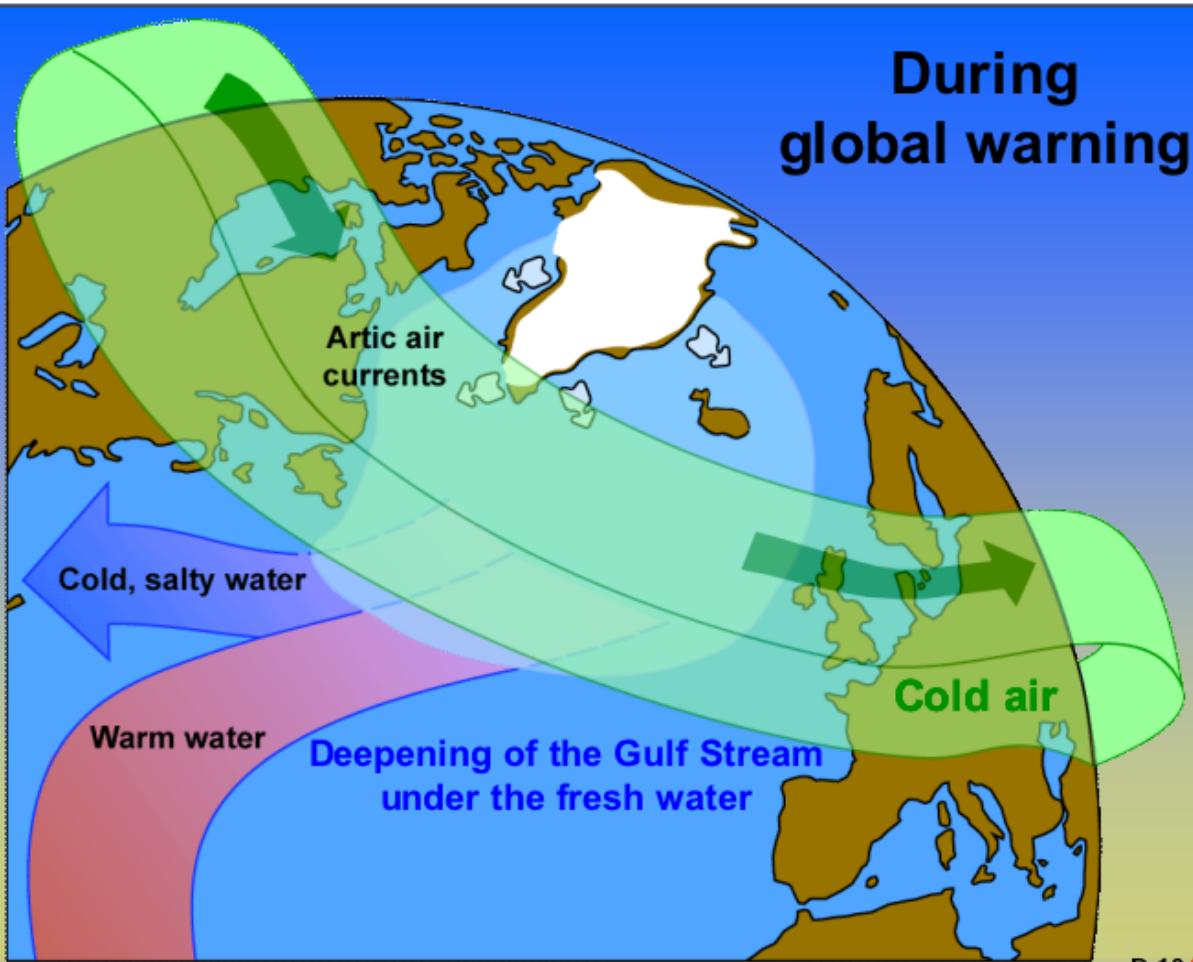
D-10

**During
global warning**



D-10

**During
global warning**



D-10 f

Paramètres météorologiques (1)

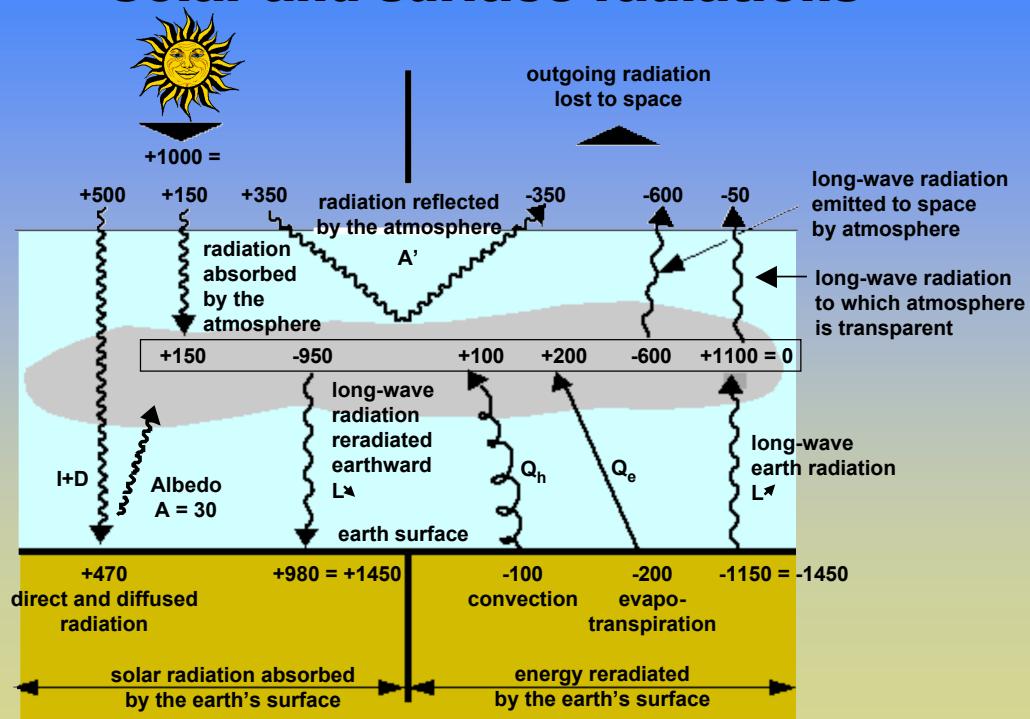
Principaux paramètres météorologiques :

- 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-17f

Paramètres météorologiques (2)

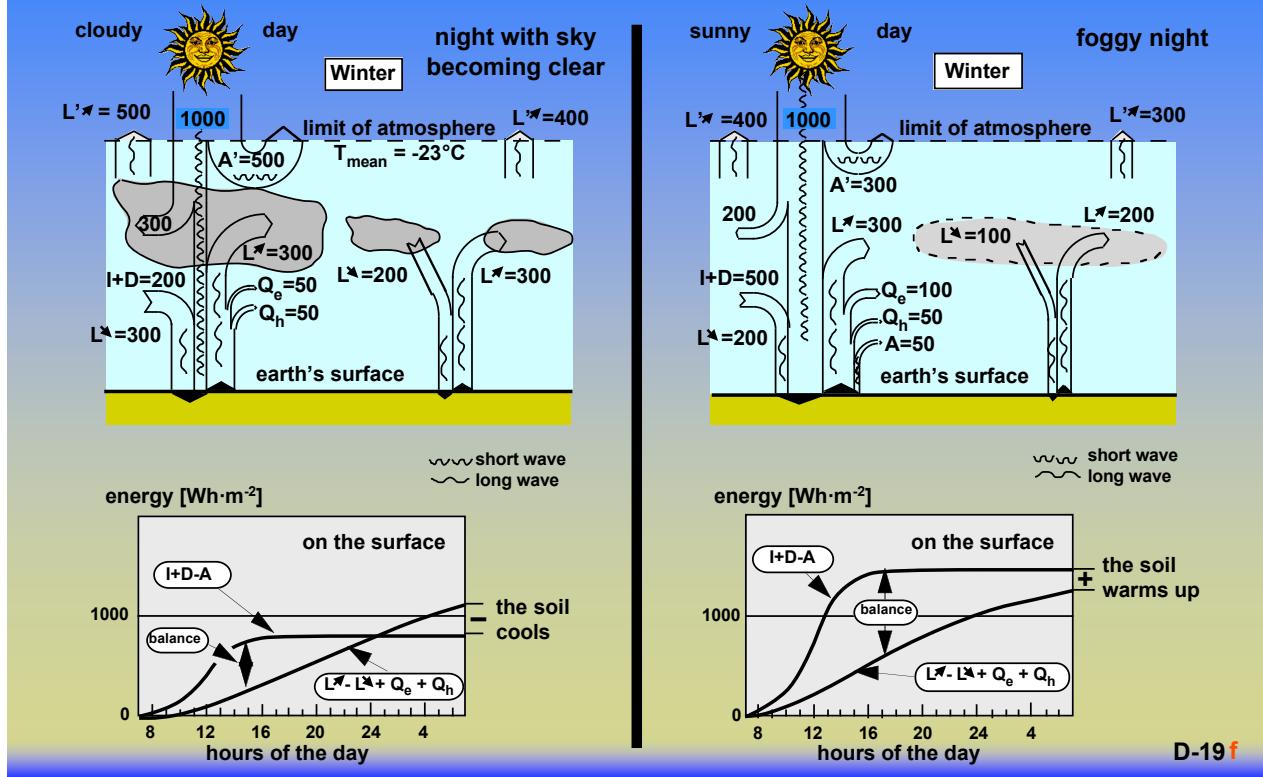
Solar and surface radiations



D-18f

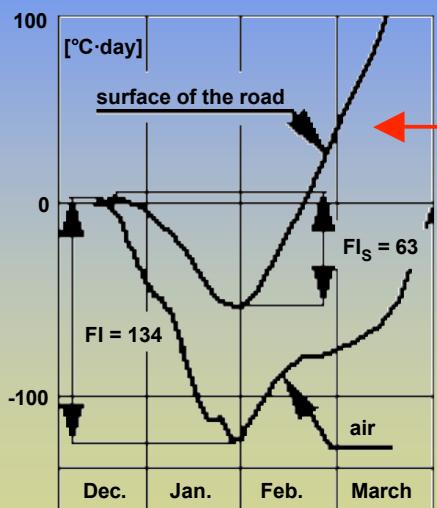
Paramètres météorologiques (3)

Balance of the radiations over short periods



Paramètres météorologiques (4)

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



Winter	Characteristics	Freezing index of the air FI [$^{\circ}\text{C}\cdot\text{day}$]	Freezing index of the surface FI_s [$^{\circ}\text{C}\cdot\text{day}$]	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

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

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 => $n = FI_s / FI > 1$.

D-21f

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-22f

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	
Concrete pavement	Fairbanks, Alaska	0.9	-	-	-	U.S. Army 1966
	Fairbanks, Alaska	0.74 ± 0.08	5042	1.93 ± 0.25	3055	U.S. Army 1950
	63/64 Beckley, USA	0.35	259	-	-	Moulton 1968
	64/65 Beckley, USA	0.27	125	-	-	"
	65/66 Beckley, USA	0.53	239	-	-	"
	63/64 Benwood, USA	0.54	206	-	-	"
	64/65 Benwood, USA	0.36	880	-	-	"
Asphalt pavement	Hanover NH, USA	0.62	1363	-	-	Berg 1977
	Fairbanks, Alaska	0.72	5042	2.18	3055	U.S. Army 1950
	Lakslev, Norway	1.26	1908	-	-	Heiersted 1975
	Os, Norway	1.02	2034	-	-	"

D-24 f

Paramètres météorologiques (9)

Evaluation de l'indice de radiations

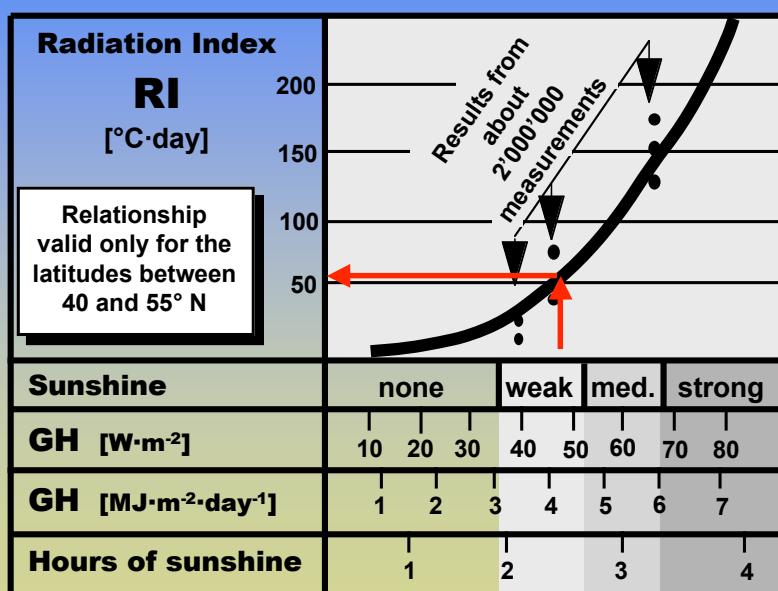
L'utilisation de l'indice de radiation est surtout recommandé dans les régions montagneuses où les conditions climatiques sont très variables. Aujourd'hui, l'indice de radiation est seulement déterminé pour les régions alpines entre 40 et 45° N, ceci sur la base nombreuses mesures.

D-25 f

Paramètres météorologiques (10)

Evaluation de l'indice de radiations

Norme suisse SN 670 140a



D-26 f

Cours climatologie pour ingénieurs et architectes
ENAC EPFL 2006

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

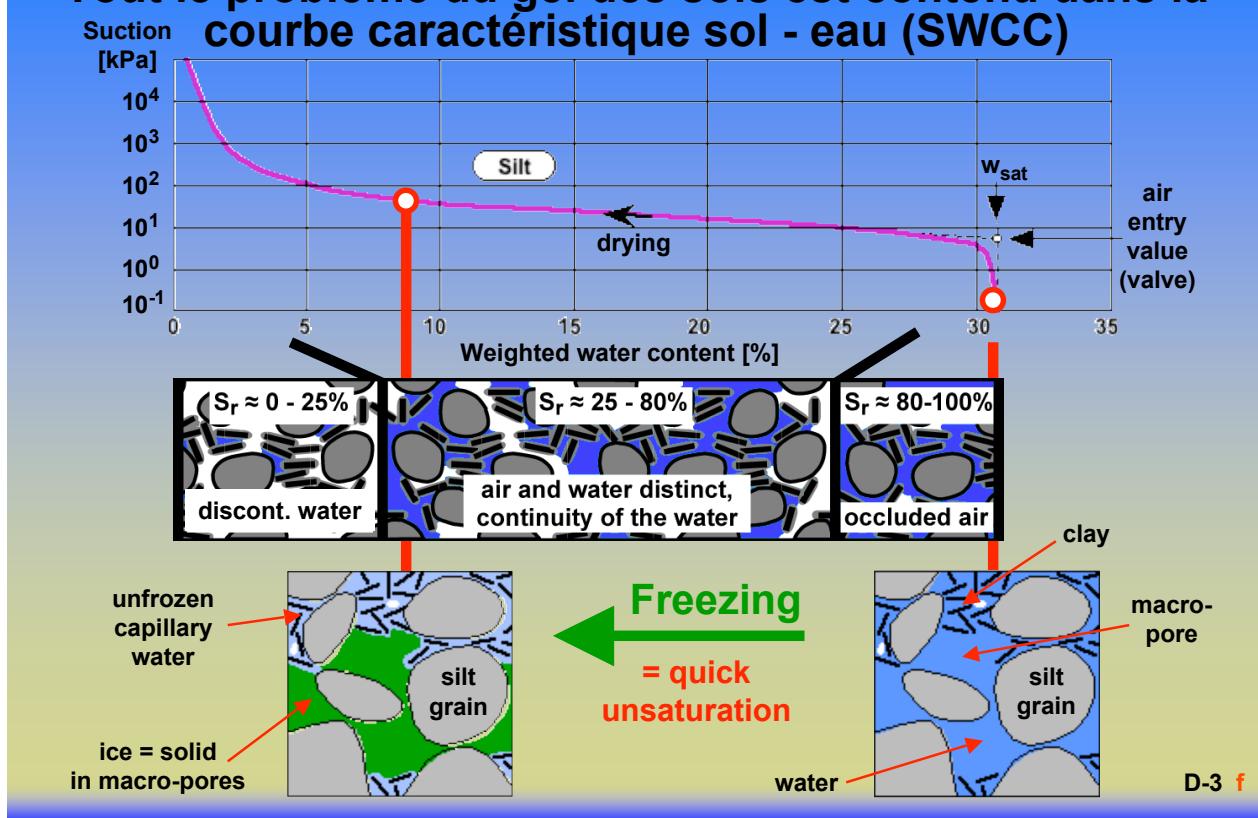
- Dimensionnement des infrastructures
et superstructures
- Pergélisols (permafrost)
- Bibliographie

- Exercice

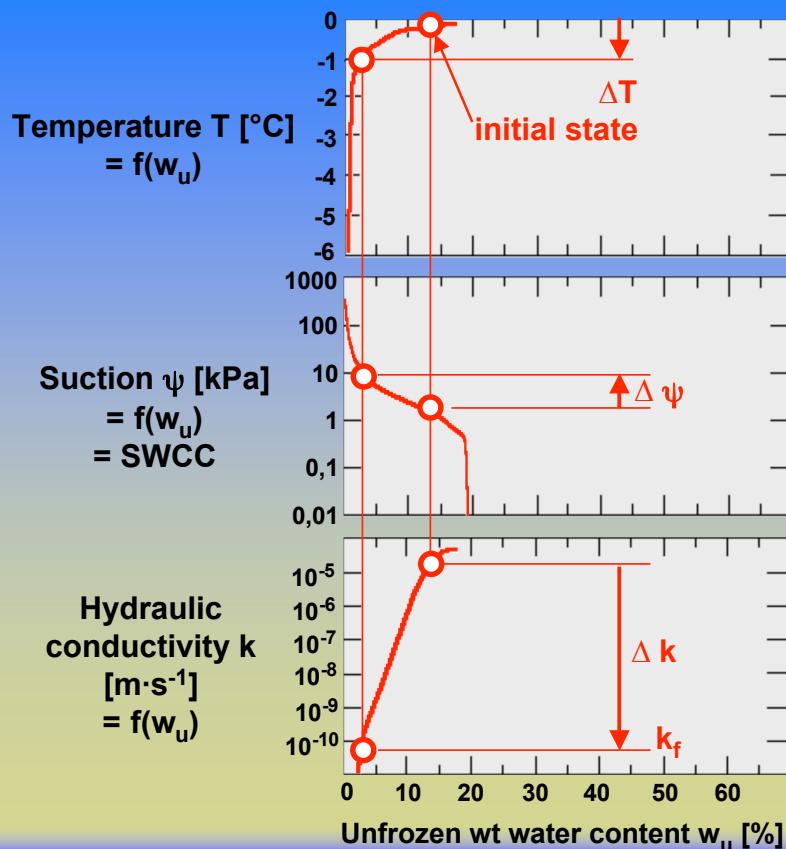
D-2 f

Phénomène du gel des sols (1)

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



Phénomène du gel des sols (2)



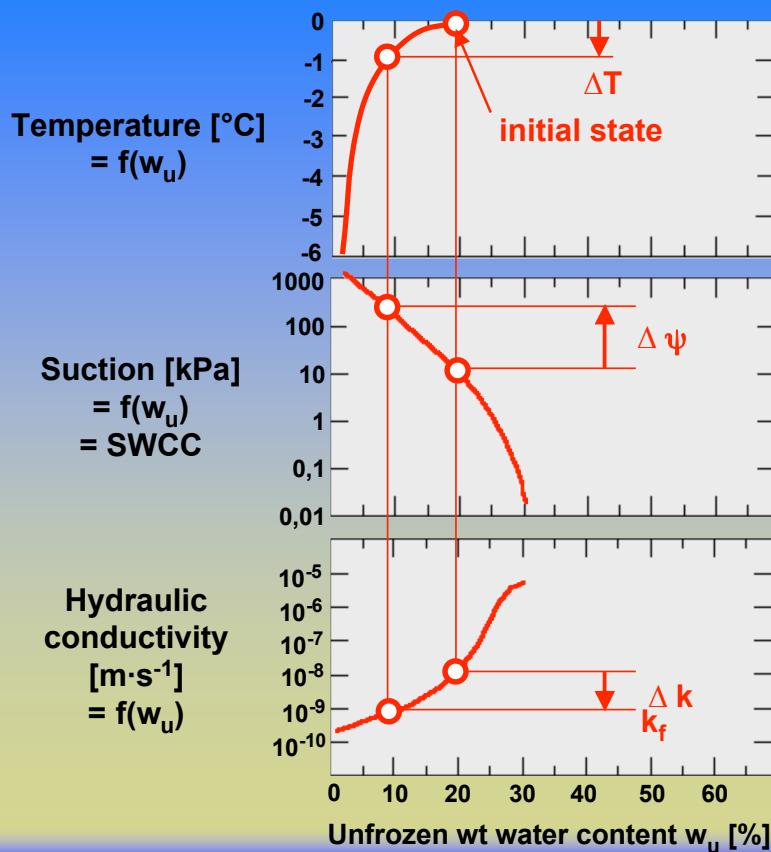
Gélivité des sols

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

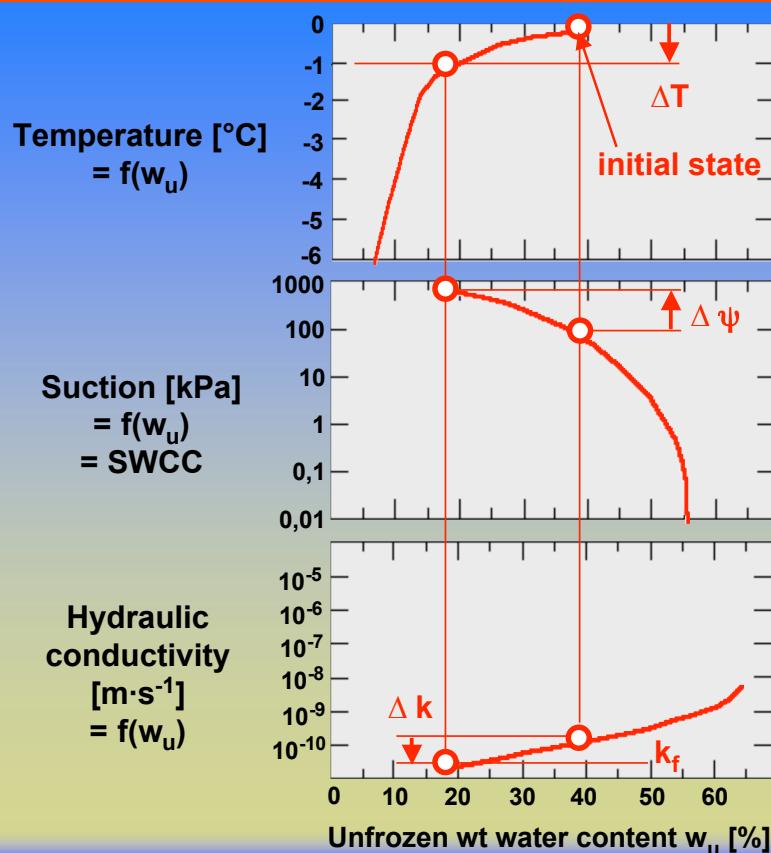
Silt ?

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 ?

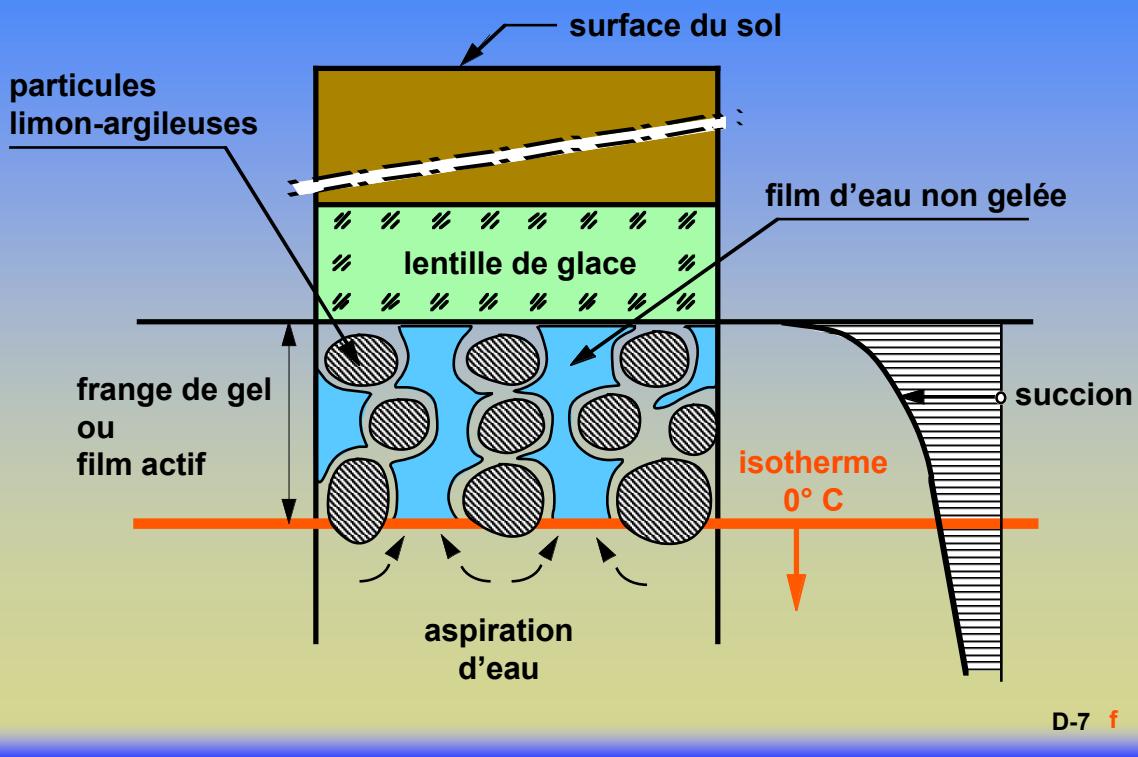
Not frost-susceptible

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

D-6 f

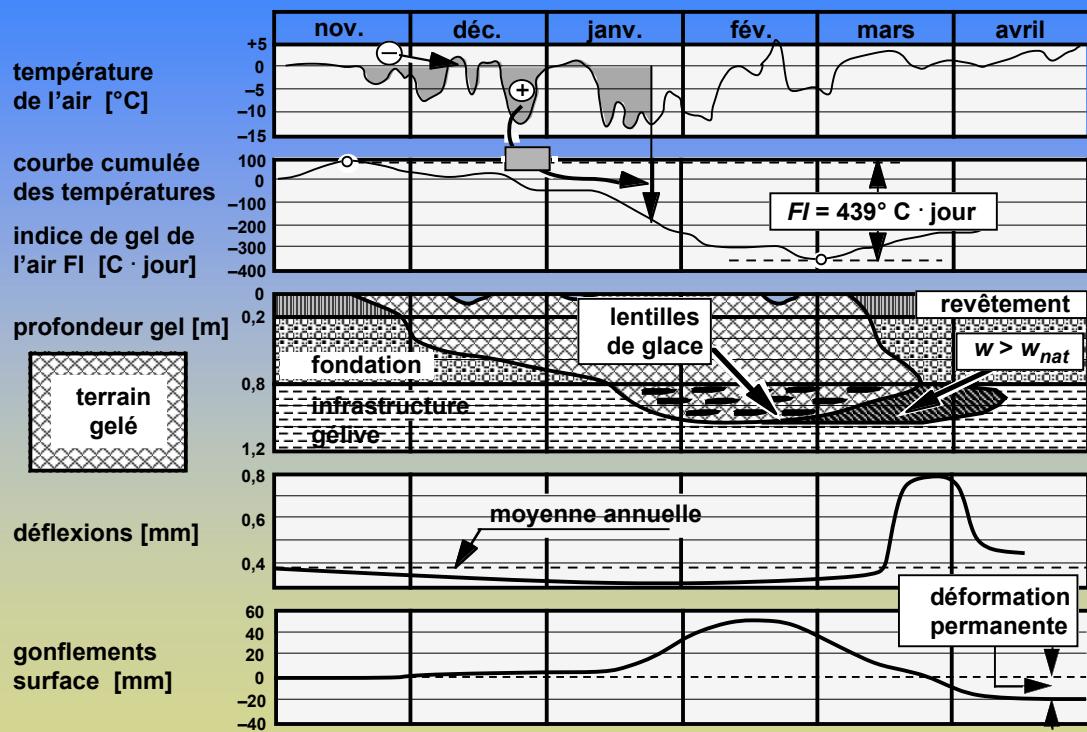
Phénomène du gel des sols (5)

Frange de gel



Phénomène du gel des sols (6)

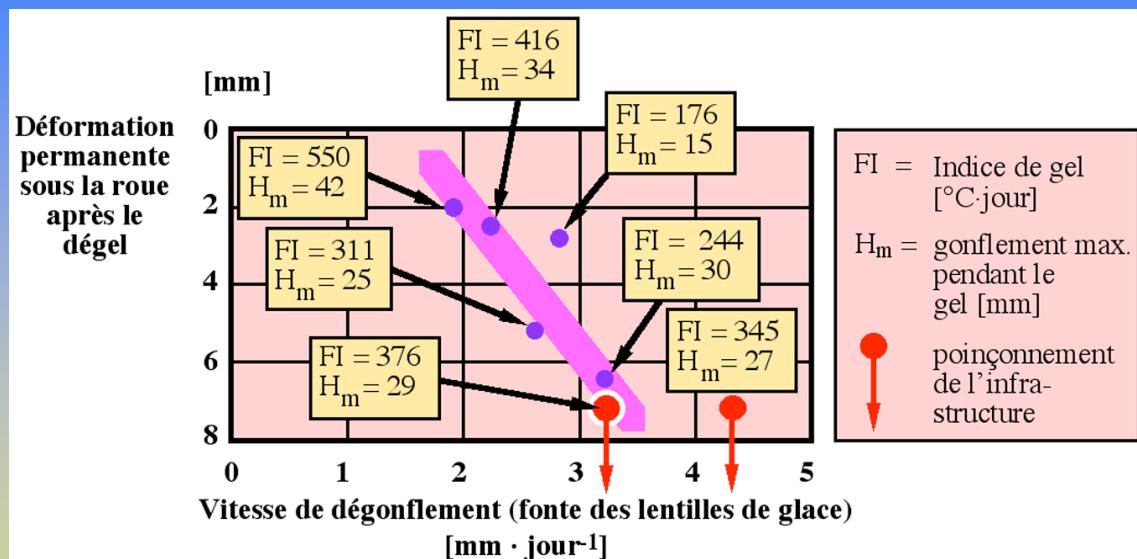
Gel et dégel sous une route



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

Phénomène du gel des sols (9)

Vidéo de la fonte de lentilles de glace

**Avec un endoscope
(exemple)**

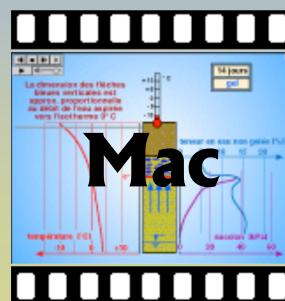
D-13f

Phénomène du gel des sols (10)

Animation du phénomène du gel et du dégel des sols

PC =>

Animation frost en PCH.exe



Mac

15 min.

D-14f

Phénomène du gel des sols (11)

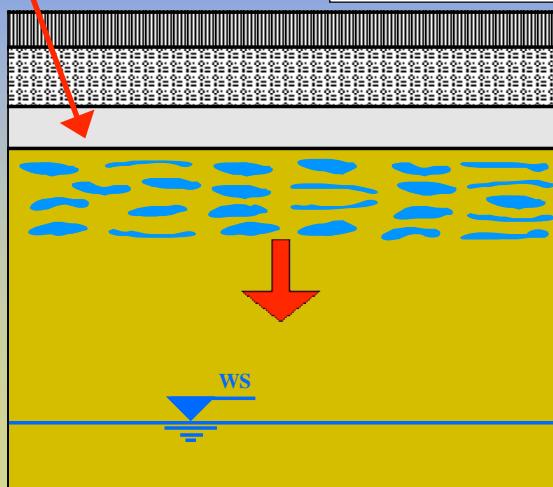
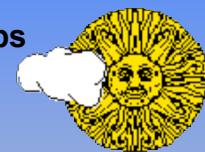
Où va l'eau de fonte des lentilles de glace sous une chaussée ?

Le problème :

Est-ce que la couche de drainage est utile?

Dégel du printemps

Climat tempéré à froid:
gonflements modérés



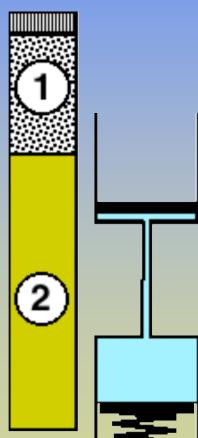
Toute l'eau de fonte des lentilles est réaspirée vers le bas. Aucun écoulement vers la couche de drainage.

D-15f

Phénomène du gel des sols (12)

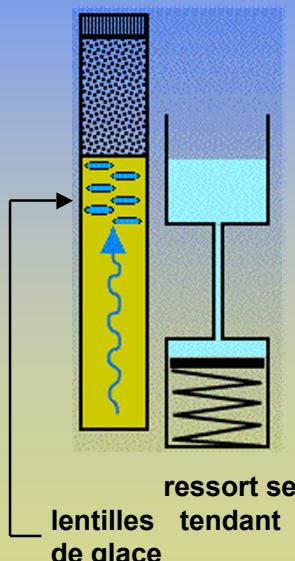
Comportement probable

Avant
le gel



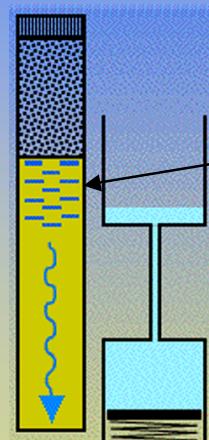
ressort
détendu

Gel



ressort se
lentilles de glace
tendant

Dégel



ressort se
détendant

- 1 super-structure
- 2 limon gélif

eau
interstitielle
résultant de
la fonte des
lentilles

D-16f

Profondeur du gel : équations générales

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

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

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
$q_B =$	chaleur générée par unité de volume		(flux thermique concentré, convection, radiations solaires)
$C =$	capacité thermique volumique		
$t =$	temps	$k_n =$	conductivité thermique normale à la surface

P-17 f

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

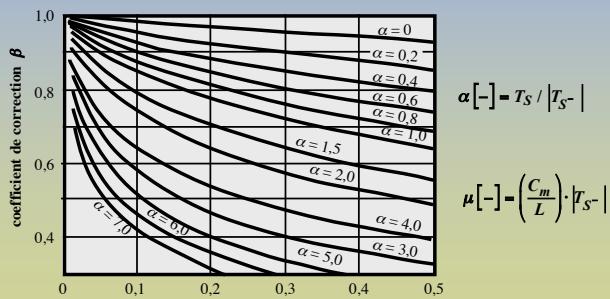
$$X = 416 \sqrt{\frac{k \cdot FIS}{L}}$$

Solution de Berggren (1943)

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

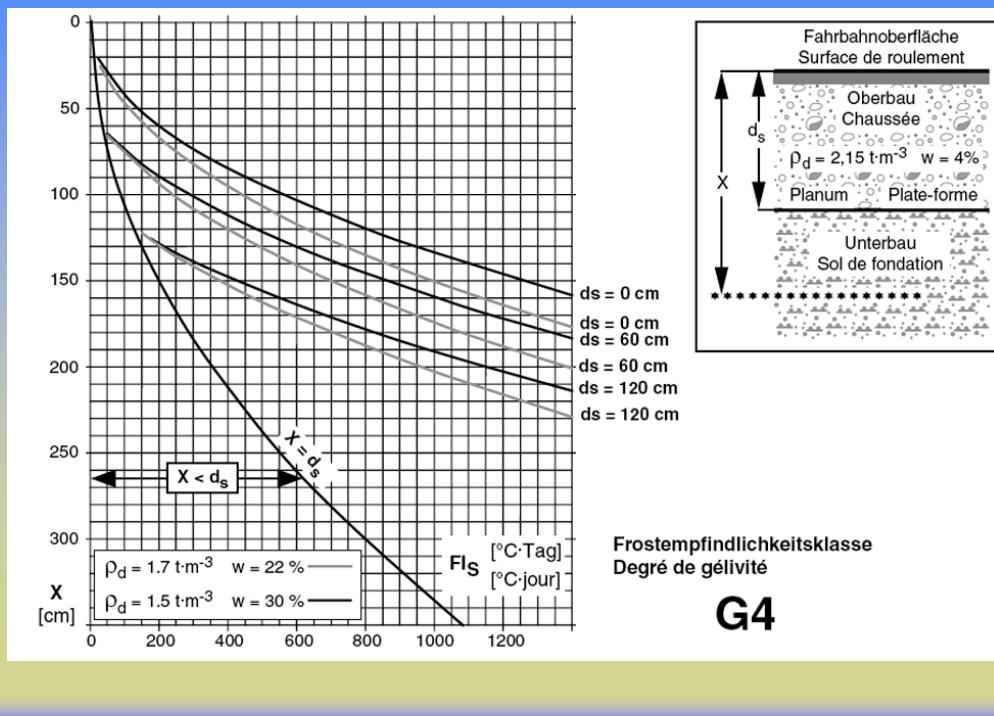
Relation de Aldrich et Painter (1953)

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



Phénomène du gel des sols (15)

Exemple abaque estimation profondeur du gel (normes suisses)



Cours climatologie pour ingénieurs et architectes
ENAC EPFL 2006

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 gélisol (gel saisonnier) comme dans les pergélisol (permafrost).

Route suisse



Bâtiment sur un pergélisol



D-3 f

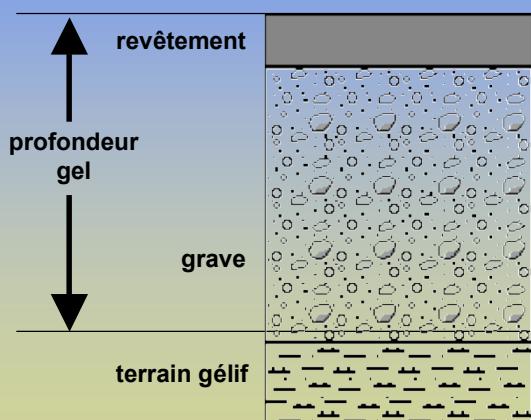
Dimensionnement au gel des infra et superstructures (2)

Routes et voies ferrées

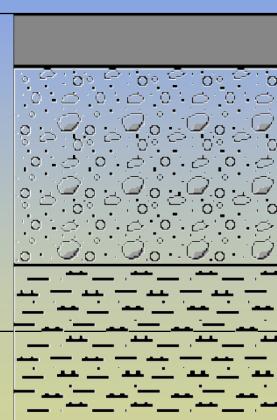
Deux approches :

Mise hors gel

Dimensionnement à la diminution de la portance au dégel



Méthode coûteuse utilisée seulement dans certains cas particuliers



Méthode générale

D-4 f

Routes et voies ferrées

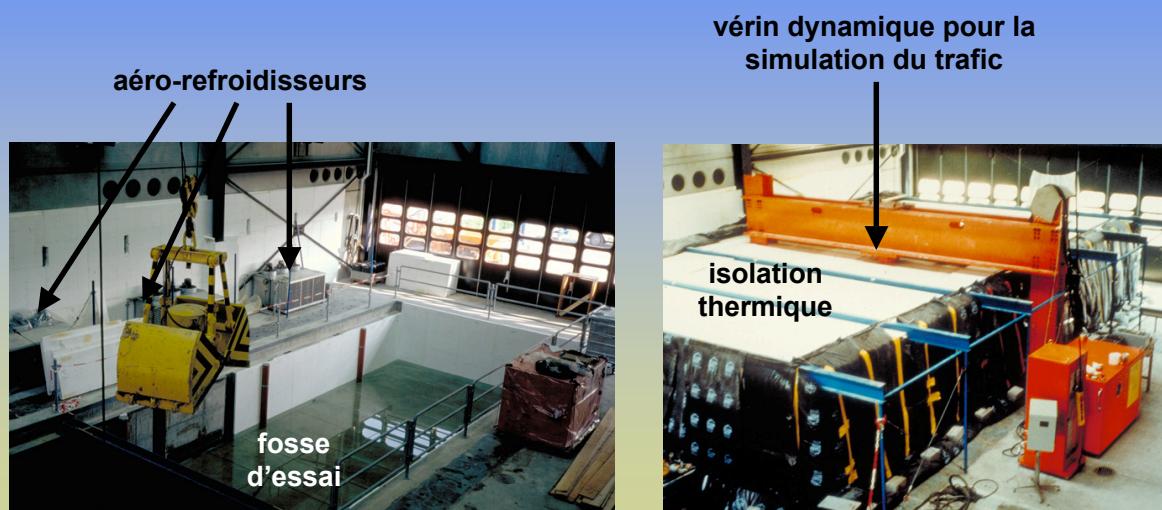
Deux méthodes de dimensionnement :

- 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

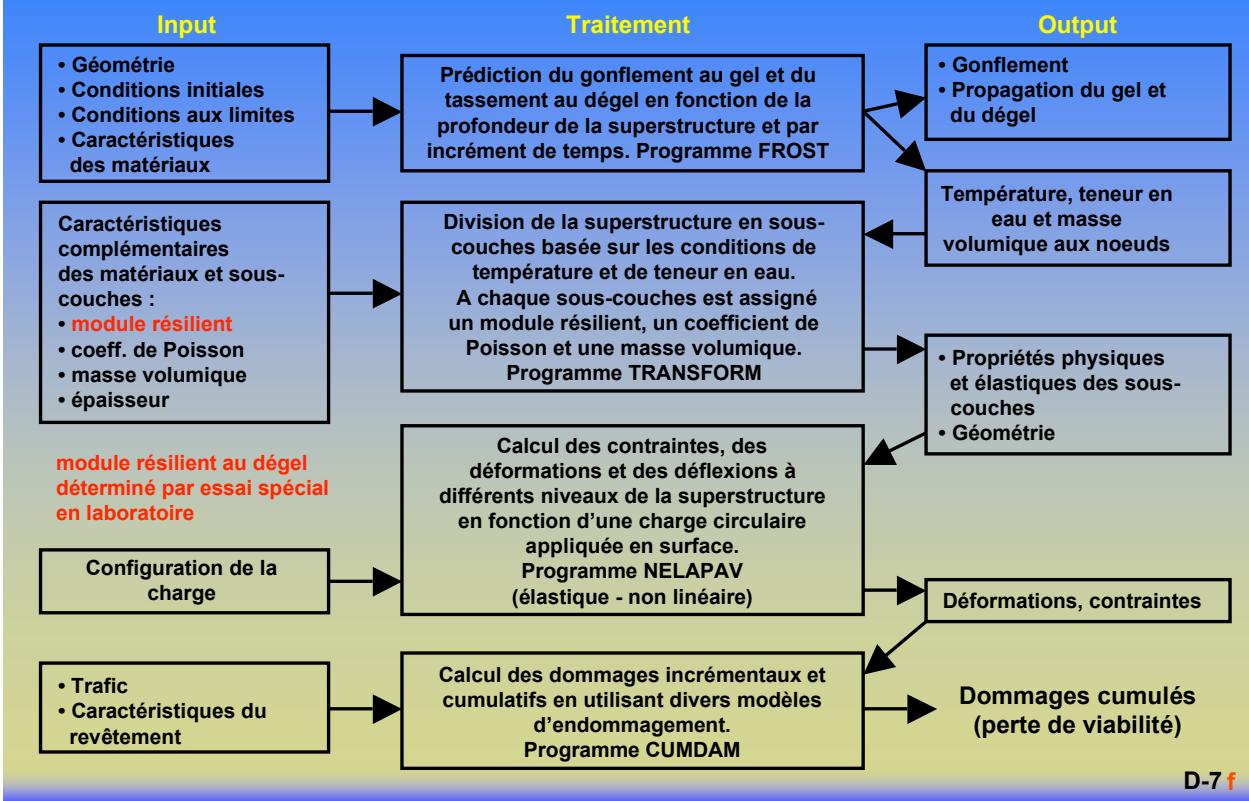
Exemple de la mise au point d'une méthode empirique : essais dans la halle fosses d'Ecublens



D-6 f

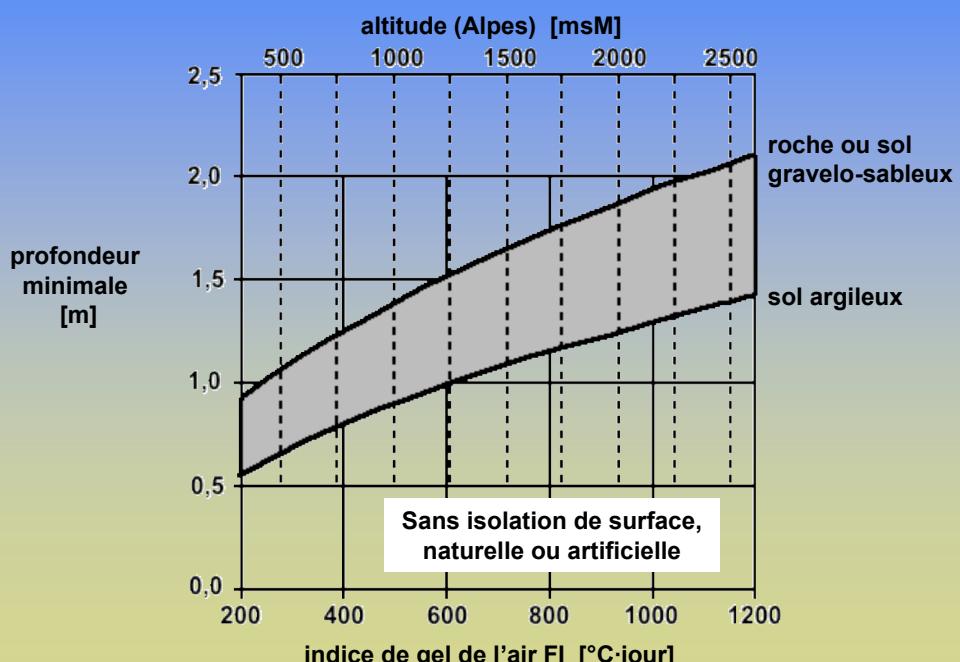
Dimensionnement au gel des infra et superstructures (5)

Routes : Méthode analytique : procédure du CRREL



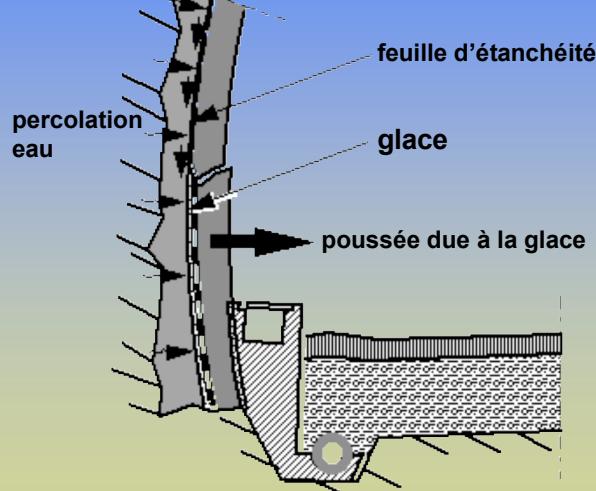
Dimensionnement au gel des infra et superstructures (6)

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



Dimensionnement au gel des infra et superstructures (7)

Tunnel ventilé (routier) en montagne

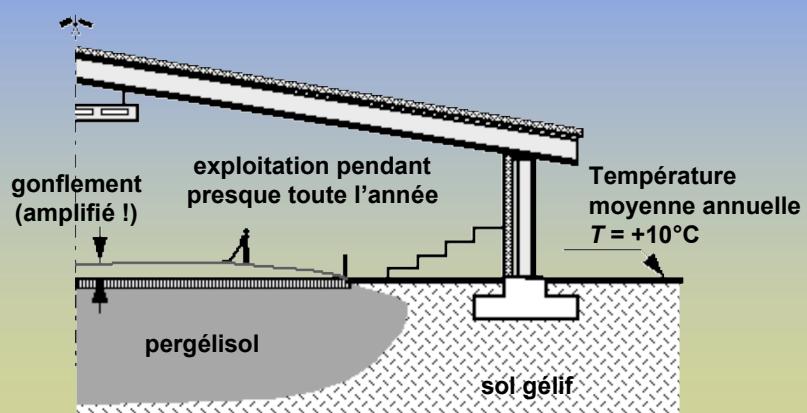


D-9 f

Dimensionnement au gel des infra et superstructures (8)

Patinoire artificielle

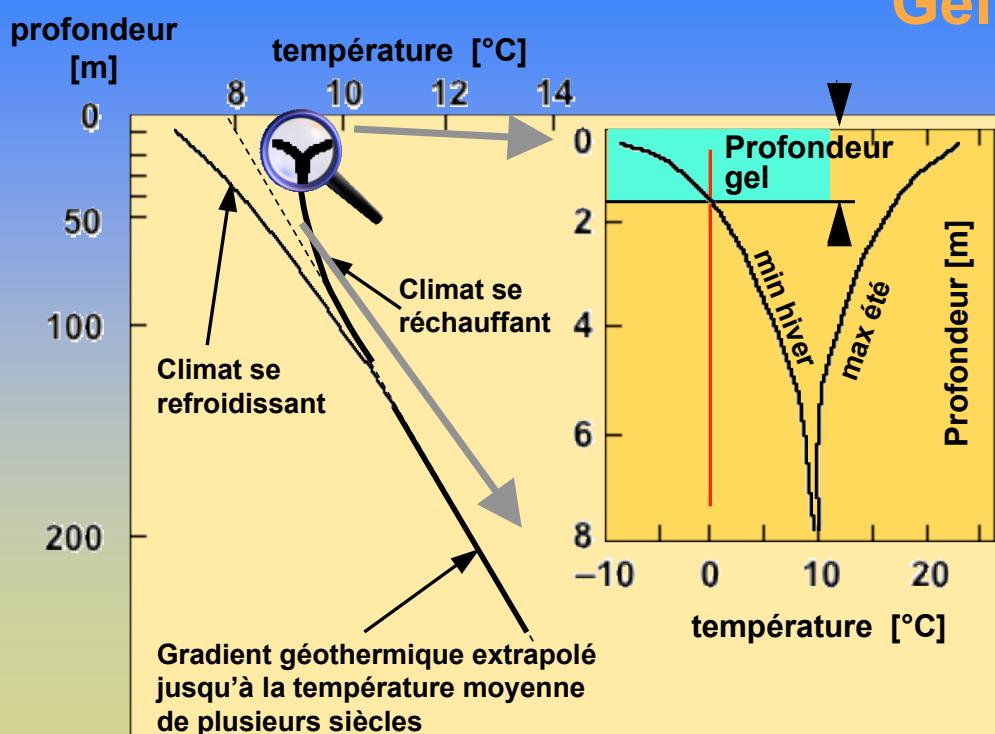
Attention, une patinoire artificielle, exploitée plus de 8 mois par an, peut créer un pergélisol et, si le sol est gélif, les gonflements résultant peuvent la rendre inutilisable ...



D-10 f

Les pergélisol (1)

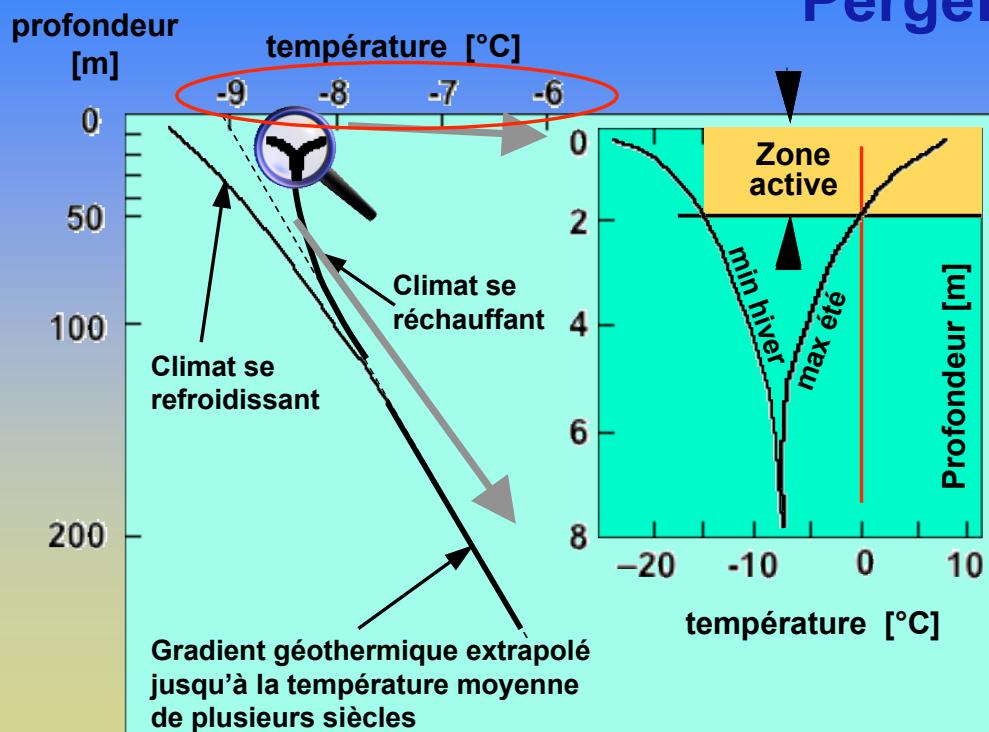
Gélisol



D-11f

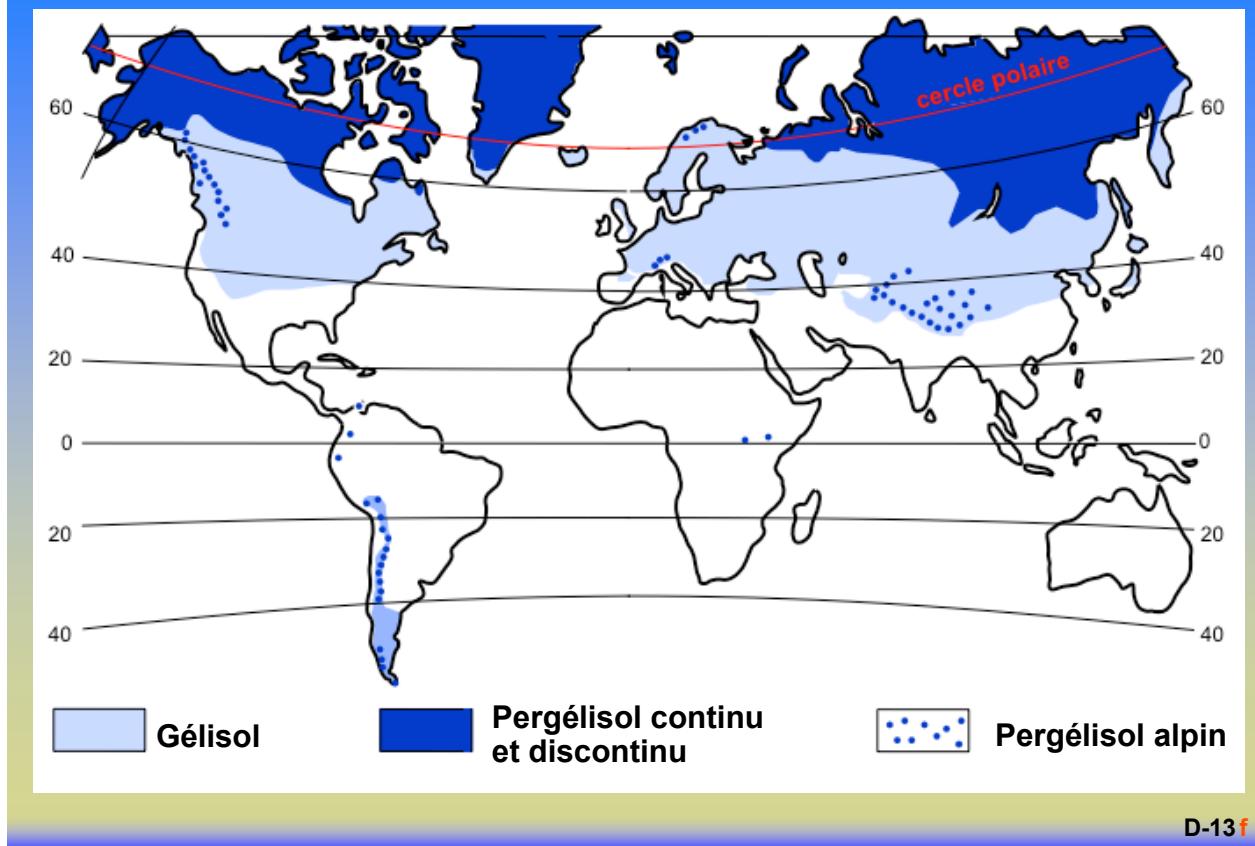
Les pergélisol (2)

Pergélisol



D-12f

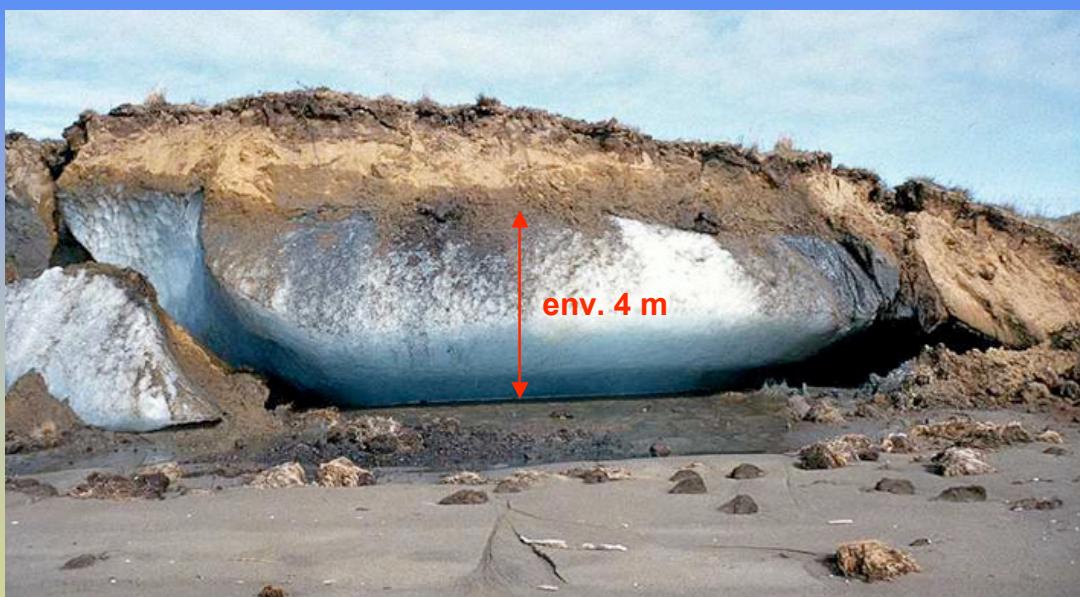
Les pergélisols (3)



D-13f

Les pergélisols (4)

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



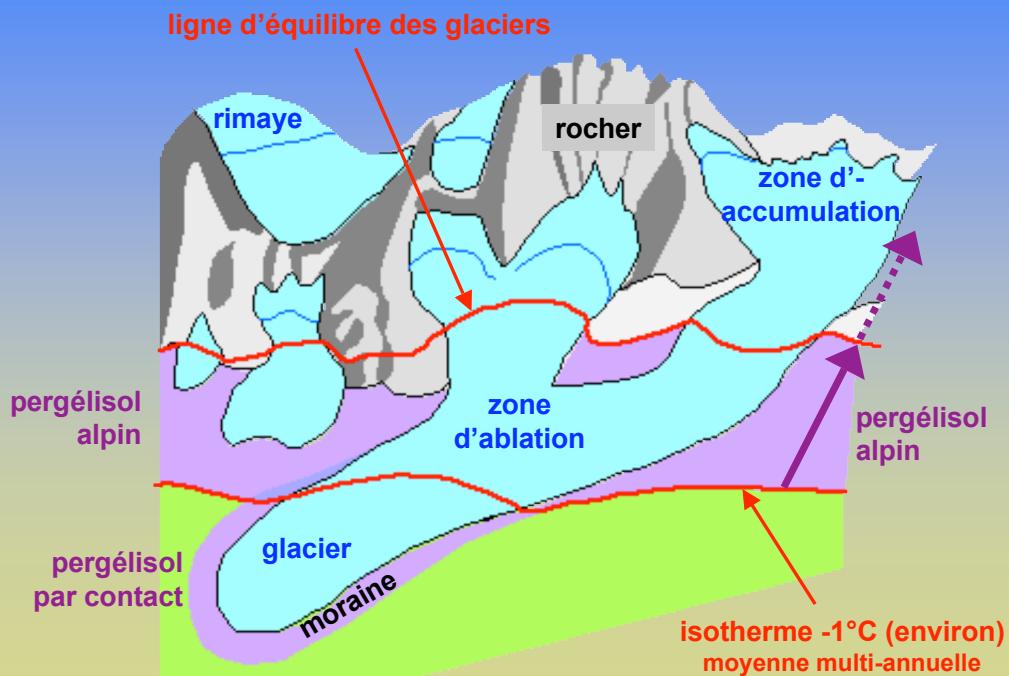
An ice lens in permafrost : Coppermine river, Northwest Territories, Canada

by Matthias Jacob

D-14f

Les pergélisol alpins (5)

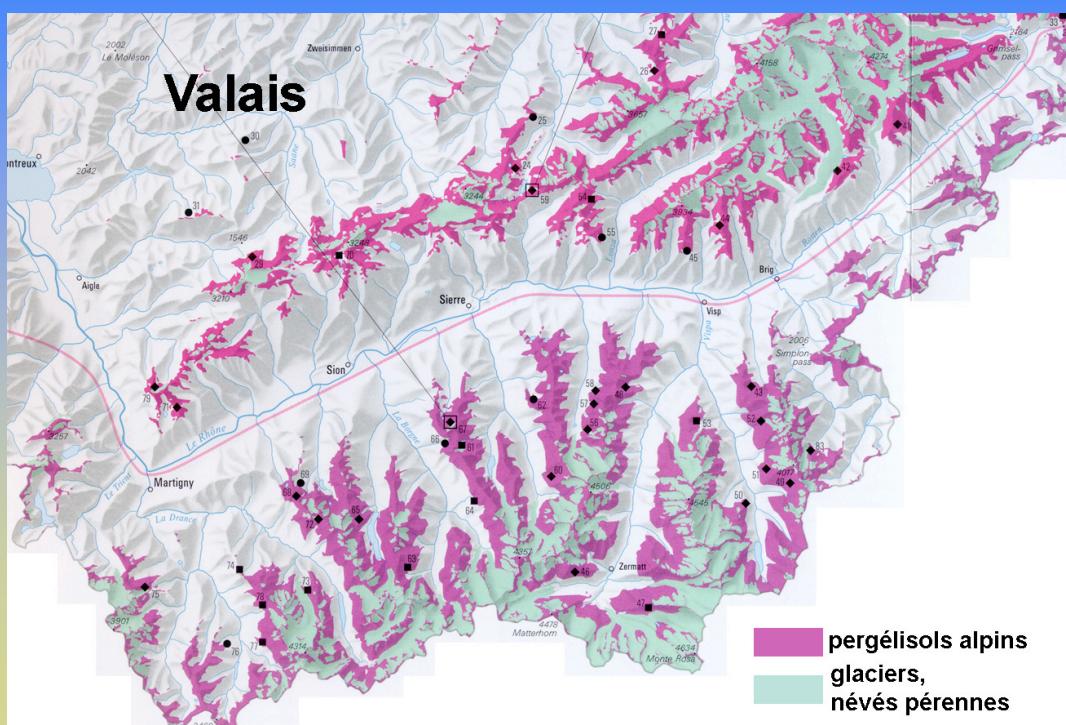
Limites des pergélisols alpins



D-15f

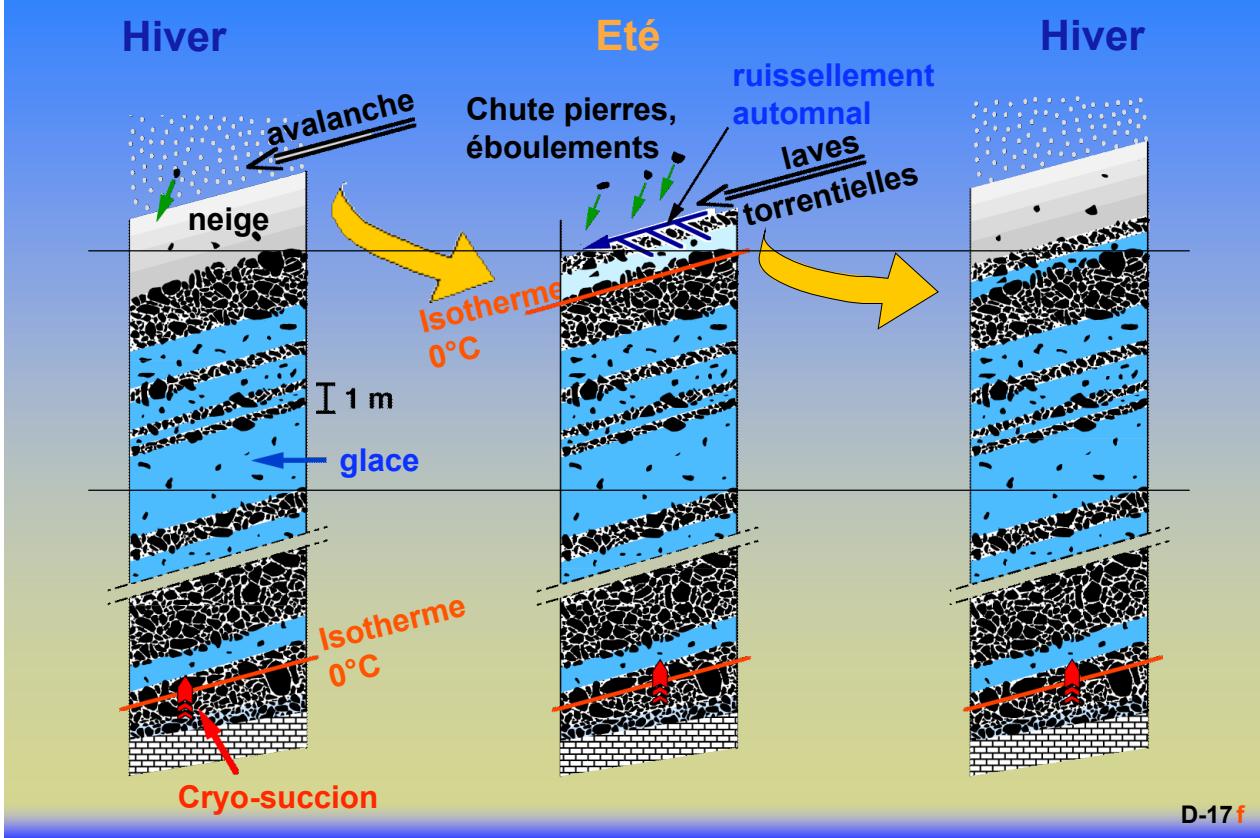
Les pergélisols alpins (6)

Exemple de limites de pergélisols alpins



D-16f

Formation des pergélisol alpins (7)



Les pergélisol alpins (8)

Glaciers rocheux

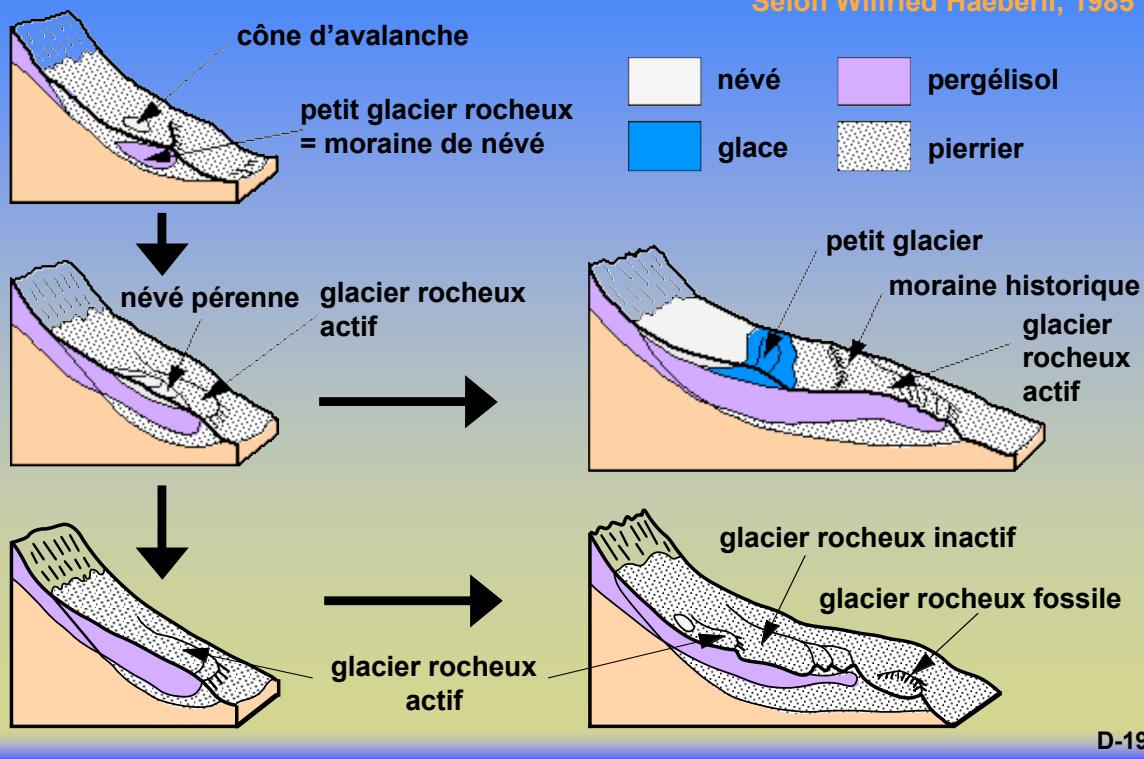
Glacier rocheux = pergélisol alpin en mouvement ou ayant été en mouvement

- 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

Les pergélisol alpins (9)

Formation des glaciers rocheux

Selon Wilfried Haeberli, 1985



Les pergélisol alpins (10)

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

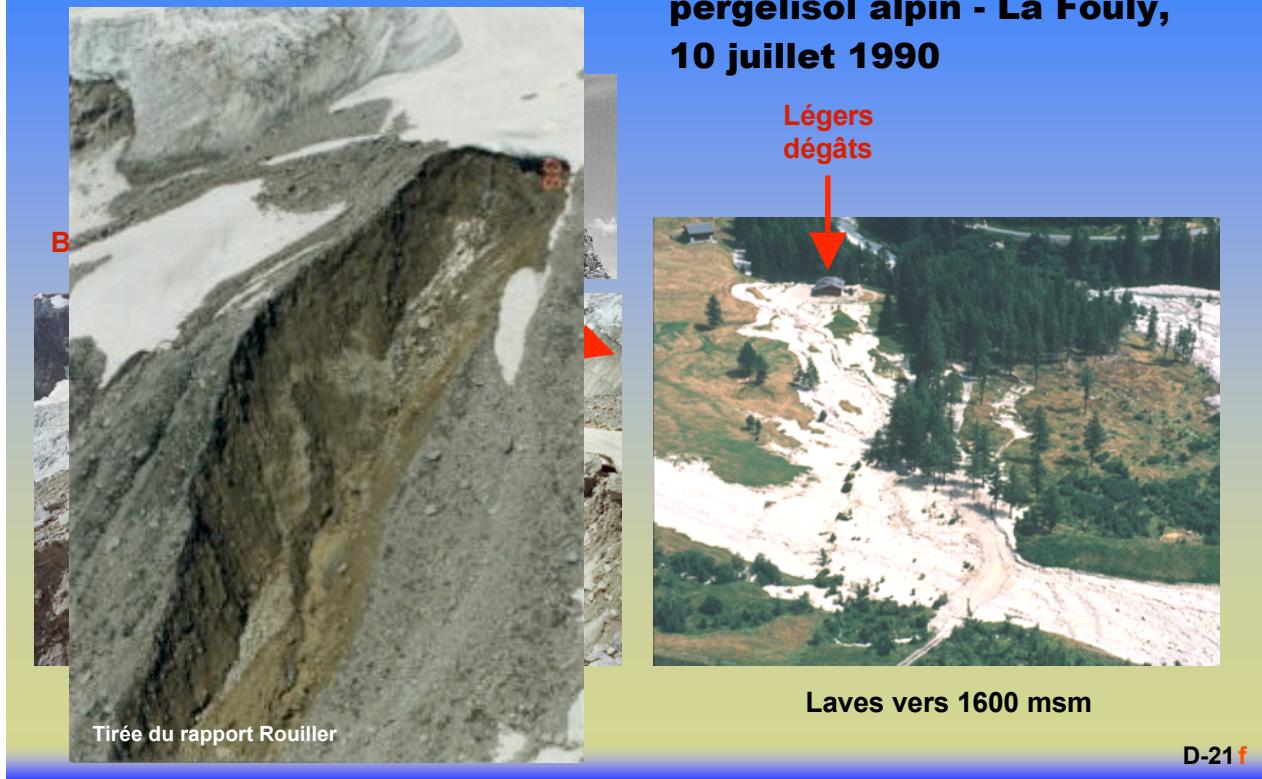


actif

D-20 f

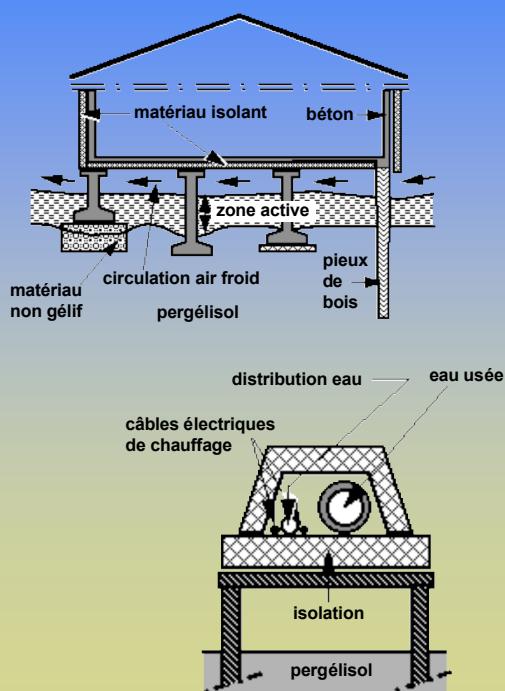
Les pergélisol alpins (11)

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



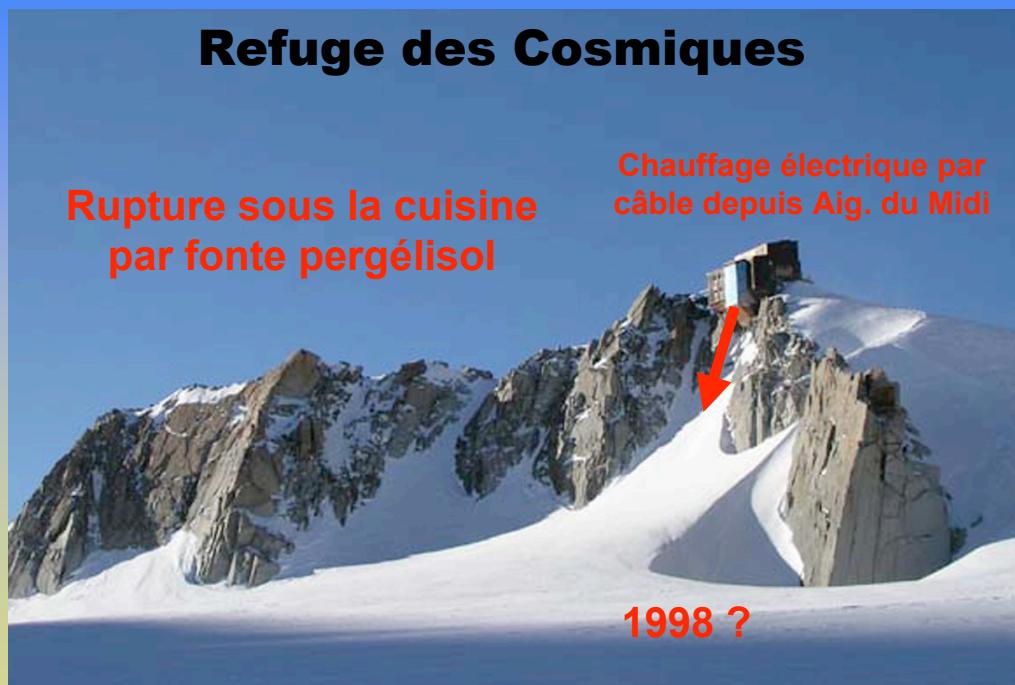
Constructions sur les pergélisols (12)

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

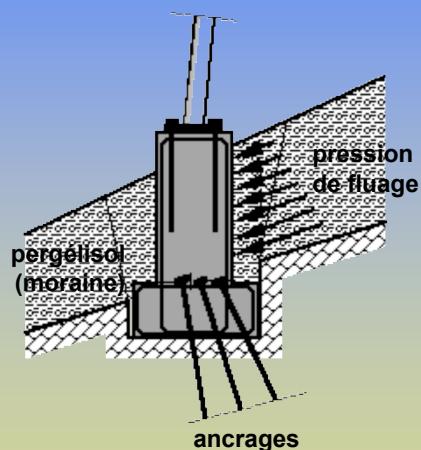
Constructions sur les pergélisol (13)



Constructions sur les pergélisol (14)

Téléphérique, ancrages

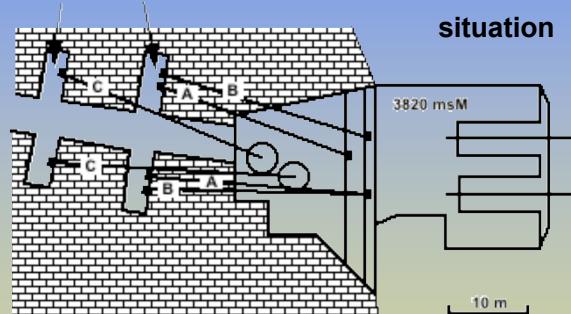
fondation pylône



station supérieure téléphérique

L'injection des ancrages est impossible car le coulis gèle

galeries transversales



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

Conditions de formation du verglas (1)

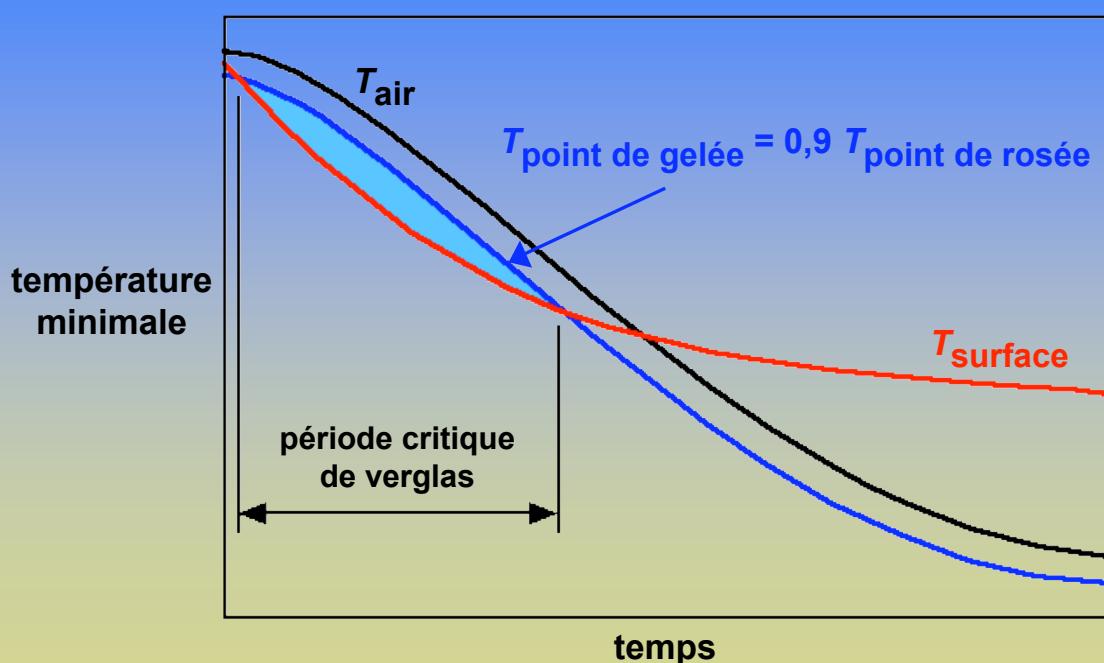
Condition péremptoire : température de la surface < 0°C

Autres conditions :

- Un air humide contenant des gouttelettes d'eau en surfusion : **brouillard givrant**. La température de l'air est alors juste inférieure à 0° C. Au contact avec la surface la gouttelette est rompue et sa tension superficielle ne maintient plus l'eau sous forme liquide. L'eau gèle donc, avec cependant un certain retard dû à sa chaleur latente.
- Une pluie froide tombant sur une surface dont la température est nettement inférieure à 0° C : **pluie verglaçante**. Ce cas (rare) se produit, après une longue période de gel, lorsque la température de l'air augmente brusquement jusqu'au dessus de 0° C.
- Une température de l'air descendant en dessous de 0° C après une période plus chaude et provoquant le **gel de flaques d'eau** produites par la mauvaise planéité d'une surface de roulement, des dévers insuffisants ou des transitions de dévers mal étudiés.
- Le gel, au début de la nuit, de l'**eau de fonte de la neige** accumulée sur les côtés d'une route, fonte produite surtout par la radiation solaire de la journée. Ce phénomène est très fréquent dans les courbes des routes de montagne où le dévers produit un écoulement de l'eau sur toute la surface de la route.

D-3 f

Conditions de formation du verglas (2)



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**

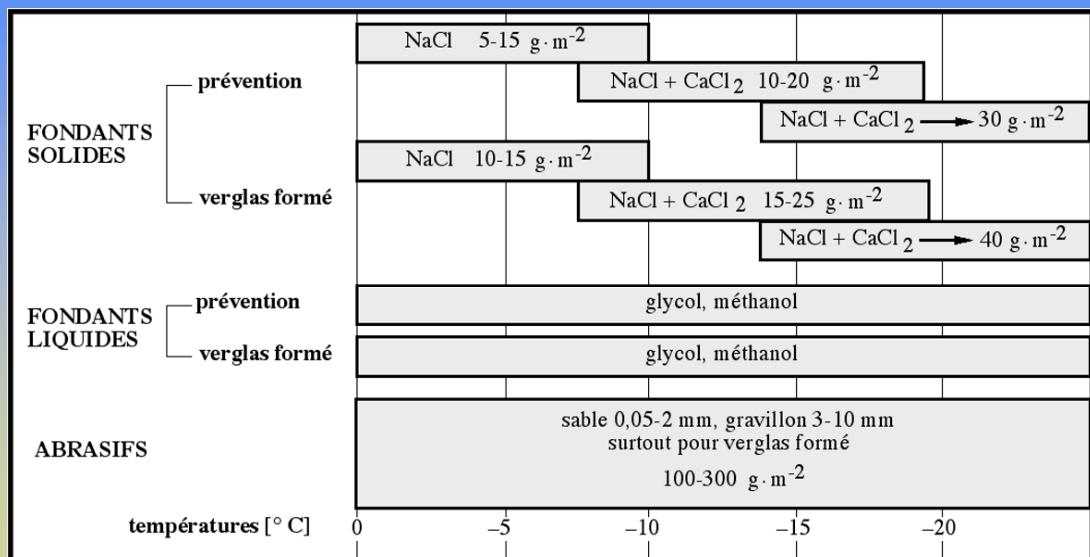
sensibilité au verglas	faible	moyenne	grande	très grande
type de superstructure				

revêtement grave Stabilisation au ciment isolation béton

D-5 f

Lutte contre le verglas (1)

Moyens temporaires : fondants chimiques et abrasifs



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 :

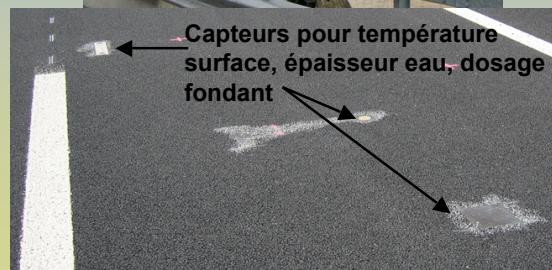
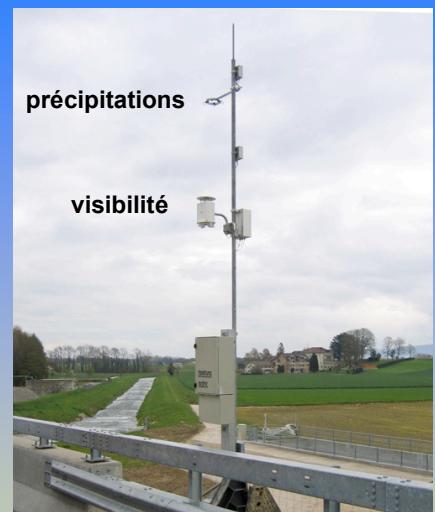
- Pneus à clous : encore autorisés en Suisse mais quasiment plus utilisés ($V_{max} = 80$ km/h). Ils sont par contre encore utilisés dans les pays du nord. En Finlande, même les camions en sont pourvus.
Les pneus à clous ont été une catastrophe pour les routes suisses : des centaines de millions de CHF 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