

ETUDE EXPÉRIMENTALE DU DÉGEL D'UN LIMON ARGILEUX. APPLICATION AUX CHAUSSÉES ET PERGÉLISOLS ALPINS

THÈSE N° 3792 (2007)

PRÉSENTÉE LE 7 JUIN 2007

À LA FACULTÉ DE L'ENVIRONNEMENT NATUREL, ARCHITECTURAL ET CONSTRUIT
Laboratoire de mécanique des sols
SECTION DE GÉNIE CIVIL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE

POUR L'OBTENTION DU GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES

PAR

Michel DYSLI

ingénieur civil diplômé EPF
de nationalité suisse et originaire de Genève (GE)

acceptée sur proposition du jury:

Prof. T. Zimmermann, président du jury
Prof. L. Vulliet, directeur de thèse
Prof. W. Haeberli, rapporteur
Prof. J.-M. Konrad, rapporteur
Prof. A. Parriaux, rapporteur



ÉCOLE POLYTECHNIQUE
FÉDÉRALE DE LAUSANNE

Lausanne, EPFL

2007

A mes petits-enfants

REMERCIEMENTS

L'auteur du présent rapport doit, tout d'abord, exprimer sa gratitude à l'Office fédéral des routes suisses (OFROU) qui, par un important crédit de recherche, lui a permis, après sa retraite, de poursuivre ses recherches en matière de gel et dégel des sols. Cette gratitude va aussi à la Commission 5 de l'Association des professionnels suisses de la route et des transports (VSS) qui a défendu ce crédit auprès de la Commission fédérale de recherche en matière de routes.

Sa gratitude va ensuite au Professeur Laurent Vulliet, directeur de Laboratoire de mécanique des sols (LMS) de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, qui a accepté qu'il puisse continuer de bénéficier de toutes les commodités d'un laboratoire de recherche.

Enfin, elle va à tous les collaborateurs du LMS qui ont oeuvré avec lui à l'accomplissement de cette recherche et, en particulier, à Gilbert Gruaz, responsable des essais de mécanique des sols, Patrick Dubey, assistant technique et Jean-Marc Terraz, mécanicien, sans oublier Mme Karine Barone qui a contrôlé l'orthographe du présent rapport.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	iii
Liste des figures	xi
Contenu du CD-Rom	xix
Résumé	xxi
Zusammenfassung	xxiii
Summary	xxv
Principales notations	xxvii
Abréviations	xxx
1. Cadre et objectifs	1-1
1.1 Cadre	1-3
1.2 Objectif général	1-3
1.3 Explication du phénomène physique du dégel.....	1-3
1.4 Application à des infrastructures de voies de communication.....	1-4
1.5 Application à la fonte des pergélisols alpins.....	1-5
1.6 Structure du rapport.....	1-5
2. Etat des connaissances actuelles	2-1
2.1 Historique	2-3
2.1.1 Les premiers temps.....	2-3
2.1.2 La maturité	2-3
2.1.3 La Suisse	2-4
2.1.4 Le dégel.....	2-4
2.1.5 Les pergélisols alpins.....	2-5
2.2 Physique de la glace.....	2-6
2.3 Gel des sols	2-10
2.3.1 Film actif et frange de gel	2-10
2.3.2 Formation.....	2-10
2.3.3 Pression de gonflement.....	2-12
2.3.4 Vitesse de gonflement.....	2-12
2.3.5 Le modèle graphique	2-16
2.3.6 Gélivité des sols.....	2-18
2.4 Dégel des sols.....	2-20
2.4.1 Dégel des lentilles de glace.....	2-20
2.4.2 Mouvement de l'eau après dégel.....	2-25
2.4.3 Module résilient.....	2-28

2.5	Les pergélisols alpins et les glaciers rocheux	2-30
2.5.1	Introduction.....	2-30
2.5.2	Types et localisation.....	2-31
2.5.3	Effet des radiations solaires	2-33
2.5.4	Effet de la neige	2-34
2.5.5	Constitution.....	2-35
2.5.6	Formation.....	2-36
2.5.7	Les glaciers rocheux.....	2-36
2.5.8	Age des pergélisols alpins et des glaciers rocheux	2-37
2.5.9	Fonte des pergélisols alpins	2-38
2.6	Modèles mathématiques fondamentaux	2-39
2.6.1	Diffusion thermique	2-39
2.6.2	Ecoulements à potentiel de vitesse.....	2-42
2.6.3	Couplage.....	2-44
2.6.4	Détermination des relations et paramètres empiriques.....	2-45
2.6.5	Bilan énergétique à la surface du sol.....	2-50
2.6.6	Equation de Clapeyron	2-52
2.7	Modélisation numérique du gel.....	2-54
2.7.1	Modèles empiriques	2-54
2.7.2	Modèle hydrodynamique.....	2-54
2.7.3	Modèle « glace rigide »	2-55
2.7.4	Modèle thermomécanique	2-58
2.7.5	Autres modèles.....	2-58
2.8	Modélisation numérique du dégel.....	2-59
2.9	Gel, dégel et réchauffement du climat.....	2-60
3	Le sol utilisé.....	3-1
3.1	Introduction.....	3-3
3.2	Granulométrie et limites de consistance.....	3-3
3.3	Essai CBRF (CBR au gel)	3-3
3.4	Courbe caractéristique sol-eau.....	3-5
3.5	Analyse minéralogique.....	3-5
3.6	Teneur en eau non gelée	3-8
3.7	Modèle graphique.....	3-11
3.8	Essais oedométriques incrémentaux standards	3-11
4	Approche expérimentale.....	4-1
4.1	Introduction.....	4-3
4.2	Le moule et ses accessoires	4-5
4.2.1	Moule avec charge verticale par anneaux de plomb	4-5
4.2.2	Compactage de l'éprouvette dans le moule.....	4-5
4.2.3	Vase de Mariotte	4-5
4.2.4	Cryostats	4-5
4.2.5	Isolations thermiques.....	4-9
4.2.6	Gradient thermique.....	4-9
4.2.7	Chargement par vérin	4-11

4.3	Endoscope	4-13
4.3.1	Historique.....	4-13
4.3.2	Endoscope utilisé.....	4-14
4.3.3	Traitement et utilisation des images de l'endoscope.....	4-15
4.4	Capteurs	4-17
4.4.1	Thermistances.....	4-17
4.4.2	Tensiomètres	4-18
4.4.3	Teneur en eau par Time Domain Reflectometry (TDR).....	4-19
4.4.4	Déplacement vertical	4-21
4.4.5	Contrainte verticale.....	4-21
4.4.6	Résistance au cisaillement	4-21
4.5	Volumes et effets parasites des capteurs dans l'éprouvette	4-23
4.6	Chaîne d'acquisition de données et de contrôle de processus.....	4-25
4.6.1	Hardware et logiciels utilisés	4-25
4.6.2	Acquisition des valeurs mesurées par les capteurs.....	4-27
4.6.3	Contrôle de la température de la tête.....	4-28
4.6.4	Acquisition des images prises par l'endoscope.....	4-28
4.7	Mesure des déformations par rayons X	4-30
4.7.1	Historique.....	4-30
4.7.2	Méthode	4-30
4.7.3	Application aux essais de gel-dégel.....	4-30
4.7.4	Traitement des photos aux rayons X	4-31
4.7.5	Remarques sur les radiographies	4-32
4.8	Validation de l'appareillage	4-33
4.8.1	Moule, tête et embase de refroidissement.....	4-33
4.8.2	Endoscope	4-33
4.8.3	Cryostats	4-34
4.8.4	Photos par rayons X.....	4-34
4.8.5	Acquisition des données	4-34
4.9	Validation des capteurs	4-35
4.9.1	Thermistances.....	4-35
4.9.2	Tensiomètres	4-35
4.9.3	Teneur en eau par TDR.....	4-36
4.9.4	Déplacement vertical	4-37
4.9.5	Contrainte verticale.....	4-37
4.10	Défauts de l'instrumentation	4-39
4.10.1	Forme du moule.....	4-39
4.10.2	Températures du moule et de l'éprouvette.....	4-39
4.10.3	Capteurs	4-39
4.11	Mode opératoire.....	4-43
4.11.1	Généralités	4-43
4.11.2	Préparation du matériau	4-43
4.11.3	Compactage du matériau.....	4-43
4.11.4	Alimentation en eau de l'éprouvette.....	4-43
4.11.5	Mise en place du moule, placement et connexion des premiers capteurs.....	4-44
4.11.6	Démarrage des cryostats	4-44
4.11.7	Isolation extérieure, tête et capteur de déplacement.....	4-44

4.11.8	Mise en place du tube de l'endoscope.....	4-45
4.11.9	Tensiomètres	4-45
4.11.10	Capteur de déplacement vertical.....	4-45
4.11.11	Démarrage du VI d'acquisition des données	4-45
4.11.12	Accommodation	4-45
4.11.13	Gel	4-46
4.11.14	Dégel.....	4-46
4.11.15	Animations (vidéos) filmées avec l'endoscope	4-46
4.11.16	Panoramas des lentilles établis avec l'endoscope	4-47
4.11.17	Exploitation numérique des panoramas.....	4-47
4.11.18	Radiographies	4-47
4.11.19	Exploitation numérique des radiographies	4-50
4.11.20	Usage du vérin	4-51
4.11.21	Démontage de l'éprouvette.....	4-52
4.12	Plans de construction.....	4-58
5	Résultats des essais sans la presse.....	5-1
5.1	Introduction.....	5-3
5.2	Essais no 1 et 2.....	5-5
5.2.1	But des essais	5-5
5.2.2	Caractéristiques de l'éprouvette.....	5-5
5.2.3	Problèmes rencontrés	5-5
5.2.4	Paramètres donnés.....	5-6
5.2.5	Résultats des mesures.....	5-6
5.2.6	Conclusions.....	5-8
5.3	Essai no 3.....	5-9
5.3.1	But de l'essai.....	5-9
5.3.2	Caractéristiques de l'éprouvette.....	5-9
5.3.3	Paramètres donnés.....	5-9
5.3.4	Prises de vues avec l'endoscope	5-10
5.3.5	Résultats des mesures.....	5-16
5.3.6	Propagation du front de gel.....	5-22
5.4	Essai no 4.....	5-24
5.4.1	But de l'essai.....	5-24
5.4.2	Caractéristiques de l'éprouvette.....	5-24
5.4.3	Paramètres donnés.....	5-24
5.4.4	Prises de vues avec l'endoscope	5-24
5.4.5	Résultats des mesures.....	5-30
5.4.6	Propagation du front de gel.....	5-34
5.5	Essai no 5.....	5-36
5.5.1	But de l'essai.....	5-36
5.5.2	Caractéristiques de l'éprouvette.....	5-36
5.5.3	Paramètres donnés.....	5-36
5.5.4	Résultats des mesures.....	5-37
5.5.5	Propagation du front de gel.....	5-42

5.6	Essai no 6	5-44
5.6.1	But de l'essai	5-44
5.6.2	Caractéristiques de l'éprouvette	5-44
5.6.3	Paramètres donnés	5-44
5.6.4	Résultats	5-45
5.6.5	Propagation du front de gel.....	5-50
5.7	Essai no 7	5-51
5.7.1	But de l'essai	5-51
5.7.2	Caractéristiques de l'éprouvette	5-51
5.7.3	Paramètres donnés	5-51
5.7.4	Résultats	5-51
5.8	Essai no 8	5-54
5.8.1	But de l'essai	5-54
5.8.2	Caractéristiques de l'éprouvette	5-54
5.8.3	Paramètres donnés	5-54
5.8.4	Prises de vues à l'endoscope.....	5-55
5.8.5	Résultats	5-57
5.8.6	Propagation du front de gel.....	5-63
6	Résultats des essais avec presse et rayons X	6-1
6.1	Introduction	6-3
6.2	Essai no 9	6-3
6.2.1	Buts de l'essai.....	6-3
6.2.2	Remarque sur le déroulement de l'essai no 9.....	6-3
6.2.3	Caractéristiques de l'éprouvette	6-4
6.2.4	Paramètres donnés	6-4
6.2.5	Résultats	6-4
6.3	Essai no 10	6-14
6.3.1	Buts de l'essai.....	6-14
6.3.2	Caractéristiques de l'éprouvette	6-14
6.3.3	Paramètres donnés	6-14
6.3.4	Résultats	6-14
6.4	Essai no 11	6-15
6.4.1	Buts de l'essai.....	6-15
6.4.2	Capteurs en place.....	6-15
6.4.3	Caractéristiques de l'éprouvette	6-15
6.4.4	Paramètres donnés	6-16
6.4.5	Résultats	6-17
6.5	Essai no 12	6-25
6.5.1	Buts de l'essai.....	6-25
6.5.2	Capteurs en place.....	6-25
6.5.3	Déroulement de l'essai.....	6-25
6.5.4	Caractéristiques de l'éprouvette	6-25
6.5.5	Paramètres donnés	6-26
6.5.6	Résultats	6-26

7	Comparaison et discussion des résultats des essais	7-1
7.1	Gonflements des essais 3 à 9	7-3
7.2	Gonflements des essais 11 et 12.....	7-7
7.3	Volumes vase Mariotte essais 3 à 12.....	7-8
7.4	Teneurs en eau après compactage et en fin d'essai pour les essais 3 à 12	7-9
7.5	Bilan des masses	7-10
7.6	Succions capillaires	7-12
7.7	Teneurs en eau non gelée.....	7-14
7.8	Résistance au cisaillement en fin d'essai.....	7-16
7.9	Modules de déformation pendant le dégel (essais 11 et 12).....	7-17
7.10	Endoscope.....	7-17
7.10.1	Explications introductives	7-17
7.10.2	Gel	7-19
7.10.3	Dégel.....	7-20
8.	Simulation numérique thermique des essais 1 à 5	8-1
8.1	Introduction.....	8-3
8.2	Modèle utilisé.....	8-3
8.3	Essais no 1 et 2.....	8-3
8.3.1	But des essais	8-3
8.3.2	Réseau.....	8-3
8.3.3	Conditions aux limites.....	8-4
8.3.4	Données	8-4
8.3.5	Résultats.....	8-5
8.3.6	Températures moule vs axe éprouvette	8-8
8.3.7	Conclusions.....	8-8
8.4	Essai no 3.....	8-9
8.4.1	But de l'essai.....	8-9
8.4.2	Réseau, conditions aux limites et données	8-9
8.4.3	Résultats.....	8-9
8.5	Essai no 4.....	8-9
8.5.1	But de l'essai.....	8-9
8.5.2	Modèle utilisé et données	8-9
8.5.3	Résultats.....	8-9
8.6	Essai no 5.....	8-10
8.6.1	But de l'essai.....	8-10
8.6.2	Réseau et conditions aux limites.....	8-10
8.6.3	Données	8-10
8.6.4	Résultats.....	8-12
8.6.5	Propagation du front de gel.....	8-12
8.6.6	Conclusions.....	8-13
8.7	Autres simulations.....	8-14
8.8	Remarques finales	8-14

9.	Ré-exploitation des mesures dans la halle fosses	9-1
9	Ré-exploitation des mesures dans la halle fosses	9-1
9.1	Introduction	9-3
9.2	Installation d'essais.....	9-3
9.3	Lentilles de glace de la halle fosses.....	9-5
9.4	Buts de la ré-exploitation	9-6
9.5	Principaux résultats de l'époque.....	9-6
9.6	Simulation numérique.....	9-8
9.7	Modules résilients (ré-exploitation).....	9-9
9.6.1	Dispositif de charge	9-9
9.6.2	Mesures utilisées	9-9
9.6.3	Méthode d'estimation des modules résilients	9-10
9.6.4	Résultats de l'estimation des modules résilients	9-11
10	Applications aux voies de communication	10-1
10.1	Applications retenues.....	10-3
10.2	Exploitation des essais en laboratoire pour la construction des voies de communication	10-4
10.2.1	Problèmes non ou mal résolus.....	10-4
10.2.2	Cheminement de l'eau en excès lors du dégel	10-4
10.2.3	Brutalité de la fonte des lentilles de glace	10-5
10.3	Définition et détermination du module résilient au dégel.....	10-8
10.3.1	Définitions du module résilient au dégel	10-8
10.3.2	Détermination du module résilient au dégel	10-8
10.4	Normes finlandaises.....	10-9
10.4.1	Bases	10-9
10.4.2	Dimensionnement au dégel.....	10-9
10.4.3	Exemple	10-12
10.5	Norme AASHTO.....	10-15
10.5.1	Bases	10-15
10.5.2	Estimation du trafic	10-15
10.5.3	Viabilité.....	10-15
10.5.4	Module résilient du sol	10-16
10.5.5	Fiabilité	10-16
10.5.6	Erreur de prédiction	10-17
10.5.7	Démarche générale du dimensionnement	10-17
10.5.8	Dimensionnement au dégel.....	10-20
10.5.9	Exemple	10-22
10.5.10	Commentaires.....	10-24

10.6	Procédure du CRREL	10-25
10.6.1	Principes	10-25
10.6.2	Programme FROST	10-25
10.6.3	Programme TRANSFORM	10-28
10.6.4	Programme NELAPAV	10-30
10.6.5	Programme CUMDAM	10-30
10.6.6	Détermination en laboratoire des modules résilients	10-32
10.6.7	Exemples.....	10-33
10.6.8	Quelques valeurs du module résilient de l'infrastructure et des couches de fondation	10-34
10.7	Comparaison avec les modules résilients de la halle fosses d'Écublens et avec ceux de la présente recherche.....	10-40
10.7.1	Comparaison	10-40
10.7.2	Commentaire.....	10-41
10.8	Applications aux normes suisses.....	10-42
10.8.1	Constitution de la superstructure.....	10-42
10.8.2	Dimensionnement au gel et dégel	10-42
11.	Applications aux pergélisols alpins.....	11-1
11.1	Introduction.....	11-3
11.2	Formation des pergélisols alpins et des glaciers rocheux	11-3
11.3	Fonte des pergélisols alpins par réchauffement du climat.....	11-7
11.4	Fonte des pergélisols alpins sous les constructions.....	11-8
11.5	Applications des résultats de la recherche aux pergélisols alpins.....	11-8
11.6	Cryo-succion	11-9
11.6.1	Mésestimation de son rôle	11-9
11.6.2	Revue de quelques résultats de sondages et excavations	11-9
11.6.3	Démonstration de son rôle	11-15
11.7	Brutalité de la fonte des lentilles de glace	11-21
11.8	Modélisation numérique de la fonte d'un pergélisol alpin	11-25
11.9	Quantification de la supersaturation des pergélisols	11-28
11.10	Conclusions.....	11-31
12.	Remarques finales et conclusions	12-1
12.1	Introduction.....	12-3
12.2	Explication du phénomène physique du gel	12-3
12.3	Application à des infrastructures de voies de communication.....	12-4
12.4	Application à la fonte des pergélisols alpins	12-5
13.	Bibliographie	13-1
13.1	Articles et ouvrages	13-3
13.2	Normes.....	13-18

Liste des figures et tableaux

Chapitre 2

2 1 Simulation numérique de la fermeture brutale de l'isotherme 0° C lors du dégel sous une route.....	2-5
2 2 Partie du diagramme des types de glace.....	2-7
2 3 Gel de l'eau dans un sol.....	2-7
2 4 Trois formes macroscopiques de la glace dans les sols.....	2-8
2 5 Exemple de mesure du $\delta^{18}O$ - Forages GRIP et NGRIP (Groenland).....	2-9
2 6 Exemple de corrélations $\delta^{18}O / \partial D$	2-9
2 7 Lentille de glace et film actif.....	2-11
2 8 Variation de la teneur en eau sous le front de gel.....	2-11
2 9 Effet de la vitesse du front de gel sur le gonflement.....	2-13
2 10 Exemples de l'influence de la vitesse de propagation du front de gel.....	2-13
2 11 Paramètres de l'approche hydraulique.....	2-14
2 12 Influence de la vitesse d'extraction de la chaleur sur la vitesse de gonflement / tassement.....	2-16
2 13 Vitesse de gonflement en fonction de la vitesse d'extraction de chaleur.....	2-17
2 14 Le modèle graphique.....	2-18
2 15 Schéma du mode de drainage au dégel de la forme de la fondation (eau non pesante).....	2-20
2 16 Poinçonnement d'une route lors du dégel (hiver 1962-63).....	2-21
2 17 Relation entre la vitesse du dégel et le tassement après dégel.....	2-21
2 18 Corrélation entre la masse volumique du sol gelé et le tassement après dégel.....	2-22
2 19 Gonflement lors du dégel pour des sols graveleux.....	2-23
2 20 Pression interstitielle en excès.....	2-24
2 21 Chemin des contraintes lors d'un cycle de gel-dégel.....	2-25
2 22 Dispositif d'essai pour l'étude des mouvements de l'eau de fonte des lentilles de glace.....	2-26
2 23 Données de la simulation, par la méthode des éléments finis, de la fonte des lentilles de glace.....	2-27
2 24 Résultats de la simulation, par la méthode des éléments finis, de la fonte des lentilles de glace.....	2-28
2 25 Variation de la rigidité de quelques sols en fonction de la saison (Finlande).....	2-29
2 26 Variation des températures en fonction de la profondeur dans un gélisol.....	2-30
2 27 Variation des températures en fonction de la profondeur dans un pergélisol.....	2-30
2 28 Localisation des pergélisols alpins en fonction de l'altitude.....	2-32
2 29 Les pergélisols dans le monde.....	2-33
2 30 Les pergélisols des Alpes valaisannes.....	2-34
2 31 Distribution des pergélisols suisses en fonction de l'orientation de la pente et de l'altitude.....	2-34
2 32 Conductivité thermique de la neige.....	2-35
2 33 Résultats d'un forage dans un pergélisol alpin.....	2-36
2 34 Quelques glaciers rocheux des Alpes.....	2-37
2 35 Corps soumis à un transfert de chaleur.....	2-40
2 36 Condition aux limites radiative.....	2-41
2 37 Condition aux limites de type "radiosité".....	2-42
2 38 Correspondance des termes des équations de la diffusion thermique et des écoulements souterrains.....	2-43
2 39 Introduction de la nappe phréatique.....	2-45
2 40 Les principaux couplages dans un sol.....	2-45
2 41 Sols des figures 2 42 et 2 43.....	2-46

2 42 Florilège de la relation $w_u = f(T)$ pour différents sols – échelles géométriques	2-46
2 43 Florilège de la relation $w_u = f(T)$ pour différents sols – échelles logarithmiques.....	2-47
2 44 Quelques constantes α et β pour la teneur en eau non gelée.....	2-47
2 45 Courbes de rétention sol-eau (SWCC) déterminées par Buckingham (1907)	2-49
2 46 Succion capillaire en fonction de la teneur en eau	2-49
2 47 Succion capillaire en fonction de la teneur en eau pour quelques sols	2-50
2 48 Conductivité hydraulique en fonction de la pression interstitielle pour un limon.....	2-50
2 49 Bilan énergétique à la surface du sol.....	2-52
2 50 Représentation schématique de l'expérience de Miller (1960).....	2-53
2 51 Ordinogramme d'un couplage hydrodynamique.....	2-56
2 52 Formation des lentilles de glace.	2-57
2 53 Organigramme du code RIGIDICE.....	2-57
2 54 Indices de gel de l'air FI, de 1929 à 1999, pour Davos, Château-d'Oex et Lausanne.	2-60
2 55 Températures à Sion (CH-VS) de 1864 à 2002	2-61

Chapitre 3

3 1 Comparaison des granulométries du limon argileux de Biolley Orjulaz	3-4
3 2 Essai CBRF sur le limon argileux choisi	3-4
3 3 Analyse minéralogique du limon utilisé.....	3-5
3 4 Modification de la cellule de Rowe et Barden.....	3-6
3 5 Courbe caractéristique sol-eau en drainage du limon utilisé	3-7
3 6 Perméabilité en fonction de la succion.....	3-7
3 7 Perméabilité en fonction de la teneur en eau	3-8
3 8 Moule pour la détermination de la relation $w_u = f(T)$	3-9
3 9 Analyse FEM du petit moule	3-10
3 10 Relation $w_u = f(T)$ du limon utilisé.....	3-11
3 11 Modèle graphique	3-12
3 12 Résultat essai oedométrique standard (incrémental) no « a » (0,6 MJ·m-3).....	3-13
3 13 Résultat essai oedométrique standard (incrémental) no « b » (0,6 MJ·m-3)	3-13
3 14 Résultat essai oedométrique standard (incrémental) no « c » (0,37 MJ·m-3).....	3-13
3 15 Récapitulation des modules oedométriques pour une énergie de compactage de 0,6 MJ·m-3.....	3-13
3 16 Récapitulation des modules oedométriques pour une énergie de compactage de 0,37 MJ·m-3	3-13

Chapitre 4

4 1 Le dispositif complet	4-4
4 2 Le moule avec charge par anneaux de plomb	4-6
4 3 Cellule sans son isolation extérieure	4-7
4 4 Cellule avec son isolation extérieure et une partie de la chaîne de mesure	4-8
4 5 Tout le dispositif, avec et sans isolation extérieure	4-8
4 6 Le moule pendant le compactage manuel de l'éprouvette	4-9
4 7 Refroidissement de l'espace entre les deux isolations	4-10
4 8 Températures mesurées sous une chaussée près de Semsales (FR-CH)	4-10
4 9 Le moule avec le vérin de charge (cellule de Bishop et Wesley).....	4-12
4 10 Contrainte dans le moule en fonction de la pression donnée à l'actuateur GDS	4-12
4 11 L'endoscope utilisé	4-14

4 12	Dimensions de l'image de l'endoscope	4-15
4 13	Extrait du traitement numérique d'un panorama.....	4-16
4 14	Thermistance embase et tête de refroidissement	4-17
4 15	Thermistance du moule	4-17
4 16	Tube pour la mesure des températures sur l'axe de l'éprouvette.....	4-18
4 17	Tensiomètre	4-19
4 18	Temps de réponse d'un tensiomètre (exemple).....	4-19
4 19	Capteur TDR et sa zone d'influence.....	4-20
4 20	Poinçon pour la pose des capteurs TDR.....	4-21
4 21	Mesure de la résistance au cisaillement.....	4-22
4 22	Capteurs TDR, tensiomètres et tube central à l'intérieur du moule	4-24
4 23	Chaîne d'acquisition de données	4-25
4 24	Schéma du dispositif complet	4-26
4 25	Panneau du VI "Dégel"	4-27
4 26	Panneau du VI "Cryo"	4-28
4 27	Panneau du VI "Snap"	4-29
4 28	Mesure des déformations de l'éprouvette par rayons X	4-31
4 29	Dispositif, dans sa configuration avec presse, avec l'émetteur à rayons X	4-32
4 30	Contrôle des tensiomètres	4-35
4 31	Effet du forage du trou de l'endoscope sur les valeurs mesurées par les capteurs TDR	4-36
4 32	Antennes d'un capteur TDR contre le tube de l'endoscope.....	4-37
4 33	Anomalies lors des mesures avec un capteurs TDR.....	4-38
4 34	Etalonnage du capteur de force Bishop Wesley	4-38
4 35	Déformations des tensiomètres et des capteurs TDR pendant le gel.....	4-40
4 36	Dégâts sur un tensiomètre et un capteur TDR	4-41
4 37	Englacement de la tête de refroidissement	4-42
4 38	Gonflement avec blocage de la tête lors du dégel (essai no 8)	4-42
4 39	Panneau de commande de l'émetteur à rayons X.....	4-48
4 40	Valeurs du préchauffage.....	4-48
4 41	Etapes de la préparation des radiographies	4-50
4 42	Exemple du formulaire « Préparation éprouvette et compactage »	4-54
4 43	Exemple du formulaire "Essai"	4-55
4 44	Exemple du formulaire "Suivi de l'essai"	4-56
4 45	Exemple du formulaire « Mariotte et TDR manuel ».....	4-57
4 46	Liste des plans de construction	4-58

Chapitre 5

5 1	Buts et principales caractéristiques des essais du chapitres 5	5-3
5 2	Buts et principales caractéristiques des essais du chapitres 6.....	5-4
5 3	Caratéristiques du compactage des éprouvettes des essais no 1 & 2.....	5-5
5 4	Essais no 1 & 2 : Paramètres.....	5-7
5 5	Essais 1 et 2 : Comparaison des températures mesurées par les thermistances.....	5-7
5 6	Essai no 3 : Caratéristiques du compactage de l'éprouvette	5-9
5 7	Essai no 3 : Paramètres	5-10
5 8	Essai no 3 : Niveaux des panoramas à 360° et animations	5-11

5 9 Essai no 3 : Formation d'une lentille de glace, h=185 mm, 0 h = 308 h de tout l'essai (fig. 5 8).....	5-11
5 10 Essai no 3 : Formation d'une lentille de glace, h=180 mm, 0 h = 335 h de tout l'essai (fig. 5 8)	5-12
5 11 Essai no 3 : Formation de lentilles de glace, h=175 mm, 0 h = 407 h de tout l'essai (fig. 5 8)	5-12
5 12 Essai no 3 : Fonte d'une lentille, h=205 mm, 4 heures après début dégel, 0 h = 428 h (fig. 5 8).....	5-13
5 13 Essai no 3 : Formations particulières 218 heures après début dégel (642 h sur fig. 5 8).....	5-14
5 14 Essai no 3 : Panoramiques à 360° à différentes profondeurs, 270 heures après le début du dégel.....	5-15
5 15 Essai no 3 : Aiguilles de glace juste sous la tête de refroidissement.....	5-15
5 16 Essai no 3: Températures moule en fonction de la profondeur pendant le gel et le dégel.....	5-16
5 17 Essai no 3 : Gonflement et variation volume du vase de Mariotte.....	5-17
5 18 Essai no 3: Succions capillaires et teneurs en eau non gelée en fonction du temps.	5-19
5 19 Essai no 3: Succions capillaires en fonction de la profondeur	5-20
5 20 Essai no 3 : Résultats du ré-étalonnage des capteurs TDR	5-21
5 21 Essai no 3 : Teneurs en eau après compactage et à la fin de l'essai	5-22
5 22 Essai no 3 : Progagation de l'isotherme 0° C	5-23
5 23 Essai no 4 : Caractéristiques du compactage de l'éprouvette	5-24
5 24 Essai no 4 : Paramètres.....	5-25
5 25 Essai no 4: Niveaux des panoramas à 360° et des animations.....	5-25
5 26 Essai no 4: Panoramas 360° à différentes profondeurs, 65 heures après début essai (fin accommodation)....	5-26
5 27 Essai no 4: Panoramas 360° à différentes profondeurs, 188 heures après début essai (milieu gel).....	5-26
5 28 Essai no 4: Panoramas 360° à différentes profondeurs, 288 heures après début essai (début rampe dégel)...	5-27
5 29 Essai no 4: Panoramas 360° à différentes profondeurs, 430 heures après début essai (vers fin rampe dégel)	5-27
5 30 Essai no 4: Panoramas 360° à différentes profondeurs, fin de l'essai (472 heures)	5-28
5 31 Essai no 4 : Trou laissé par une lentille fondue	5-29
5 32 Essai no 4: Températures en fonction de la profondeur pendant le gel et le dégel	5-30
5 33 Essai no 4 : Gonflement et variation volume du vase de Mariotte.....	5-31
5 34 Essai no 4: Succions capillaires et teneurs en eau non gelée en fonction du temps.....	5-32
5 35 Essai no 4: Succions capillaires en fonction de la profondeur	5-33
5 36 Essai no 4 : Teneurs en eau après compactage et à la fin de l'essai	5-34
5 37 Essai no 4 : Progagation de l'isotherme 0° C	5-35
5 38 Essai no 5 : Caractéristiques du compactage de l'éprouvette.....	5-36
5 39 Essai no 5 : Paramètres.....	5-37
5 40 Essai no 5: Températures en fonction de la profondeur pendant le gel et le dégel	5-37
5 41 Essai no 5 : Isothermes à différents moments.....	5-38
5 42 Essai no 5 :Gonflement et variation volume du vase de Mariotte.....	5-39
5 43 Essai no 5: Succions capillaires et teneurs en eau non gelée en fonction du temps.....	5-40
5 44 Essai no 5: Succions capillaires en fonction de la profondeur	5-41
5 45 Essai no 5 : Teneurs en eau après compactage et à la fin de l'essai	5-42
5 46 Essai no 5: Progagation de l'isotherme 0° C	5-43
5 47 Essai no 6 : Caractéristiques du compactage de l'éprouvette.....	5-44
5 48 Essai no 6: Température en fonction de la profondeur pendant le gel et le dégel.....	5-45
5 49 Essai no 6: Isothermes à différents moments.....	5-46
5 50 Essai no 6: Gonflement et variation volume du vase de Mariotte.....	5-47
5 51 Essai no 6: Teneurs en eau non gelée mesurées par les capteurs TDR.....	5-48
5 52 Essai no 6: Teneurs en eau après compactage et à la fin de l'essai.....	5-49
5 53 Essai no 6: Résistance au cisaillement en fin d'essai.....	5-49
5 54 Essai no 6: Propagation de l'isotherme 0° C	5-50

5 55	Essai no 7 : Caractéristiques du compactage de l'éprouvette.....	5-51
5 56	Essai no 7: Succions capillaires en fonction du temps et de la profondeur	5-52
5 57	Essai no 7: Teneur en eau en fonction du temps à h = 137 mm.	5-53
5 58	Essai no 7 : Variation volume d'eau dans vase de Mariotte pendant l'imbibition.....	5-53
5 59	Essai no 8 : Paramètres	5-54
5 60	Essai no 8 : Panoramas à 360° à différentes profondeurs, 213 heures après début essai.....	5-55
5 61	Essai no 8 : Comparaison des panoramas complets à 280, 380 et 520 heures après le début de l'essai	5-58
5 62	Essai no 8 : Panorama complet à 565 heures après le début de l'essai (après dégel).	5-59
5 63	Essai no 8: Température en fonction de la profondeur pendant les gels et dégels	5-59
5 64	Essai no 8: Gonflement et variation du volume du vase de Mariotte	5-60
5 65	Essai no 8: Succions capillaires et teneurs en eau non gelée en fonction de temps	5-62
5 66	Essai no 8: Teneurs en eau après compactage et à la fin de l'essai.....	5-63
5 67	Essai no 8: Résistance au cisaillement en fin d'essai.....	5-63

Chapitre 6

6 1	Essai no 9: Caractéristiques du compactage de l'éprouvette.....	6-4
6 2	Essai no 9_2 et 9_3: Températures tête, embase, enceinte et extérieur.....	6-5
6 3	Essai no 9: Variation du volume du vase de Mariotte pendant la première partie de l'essai.....	6-5
6 4	Essai no 9: Isothermes à différents moments (axe = simulation numérique)	6-6
6 5	Essai no 9: Gonflement et variation volume vase de Mariotte pendant la 2ème partie de l'essai.....	6-7
6 6	Essai no 9: Variation volume vase de Mariotte pendant la 3ème partie de l'essai.....	6-8
6 7	Essai no 9: Surfaces des interstices du moule en contact avec l'air et évaporation correspondante.....	6-8
6 8	Essais no 9 et 10: Teneurs en eau après compactage, à 430 heures et à la fin de l'essai no 10.....	6-9
6 9	Essai no 9: Résistance au cisaillement en fin d'essai.....	6-10
6 10	Essai no 9: Déformations dans l'éprouvette dans l'intervalle entre la radiographie initiale et la première	6-11
6 11	Essai no 9: Déformations dans l'éprouvette lors des radios no 1, 2 et 3	6-12
6 12	Essai no 9: Indices de vide et déformations dérivés des radiographies et températures	6-13
6 13	Essai no 11: Caractéristiques du compactage de l'éprouvette.....	6-16
6 14	Modification de la position de la thermistance de la tête de refroidissement	6-17
6 15	Essai no 11: Températures tête, embase, enceinte et extérieur, et contrainte verticale.....	6-18
6 16	Essai no 11: Températures sur l'axe de l'éprouvette.....	6-19
6 17	Essai no 11: Gonflements et tassements.....	6-19
6 18	Essai no 11: Succion capillaire et teneur en eau non gelée.....	6-20
6 19	Essai no 11: Teneurs en eau après compactage et à la fin de l'essai.....	6-21
6 20	Essai no 11: Résistances au cisaillement en fin d'essai	6-22
6 21	Essai no 11: Indices de vide et modules résilients.....	6-23
6 22	Essai no 11: Radiographie no 2 (568 heures).....	6-24
6 23	Essai no 11: Charge hors-gel en fin d'essai	6-24
6 24	Essai no 12: Essai no 11 : Caractéristiques du compactage de l'éprouvette	6-26
6 25	Essai no 12: Températures tête, embase, enceinte et extérieur, et contrainte verticale.....	6-27
6 26	Essai no 12: Températures sur l'axe de l'éprouvette.....	6-28
6 27	Essai no 12: Gonflements.....	6-29
6 28	Essai no 12: Teneurs en eau après compactage et à la fin de l'essai.....	6-30
6 29	Essai no 12: Résistance au cisaillement en fin d'essai.....	6-31
6 30	Essai no 12: Indices de vide et modules résilients.....	6-32

Chapitre 7

7 1 Comparaison des gonflements des essais 3 à 9.....	7-3
7 2 Paramètres de l'équation de Konrad et Morgenstern (1981).....	7-4
7 3 Influence de la vitesse d'extraction de chaleur sur la vitesse de gonflement	7-6
7 4 Usage de l'équation (7 2) pour l'essai no 6.....	7-7
7 5 Comparaison des gonflements et tassements des essais 11 et 12.....	7-8
7 6 Comparaison des variations de volume dans le vase de Mariotte	7-9
7 7 Comparaison entre les teneurs en eau après le compactage et en fin d'essai	7-10
7 8 Bilan des volumes pendant le gel	7-11
7 9 Valeurs du bilan	7-12
7 10 Comparaison suctions capillaires pour le tensiomètre no 1	7-12
7 11 Comparaison suctions capillaires pour le tensiomètre no 2	7-12
7 12 Comparaison suctions capillaires pour le tensiomètre no 3	7-13
7 13 Comparaison suctions capillaires pour le tensiomètre no 4	7-13
7 14 Comparaison des teneurs en eau massiques non gelée mesurées avec le capteur TDR no 1	7-14
7 15 Comparaison des teneurs en eau massiques non gelée mesurées avec le capteur TDR no 2	7-15
7 16 Relation entre la teneur en eau non gelée et la température pour le limon utilisé.....	7-16
7 17 Comparaison de la résistance au cisaillement en fin d'essai	7-17
7 18 Liste des animations du CD annexé	7-18
7 19 Positions des animations pour le gel	7-18
7 20 Positions des animations pour le dégel	7-19

Chapitre 8

8 1 Essais nos 1 et 2: Les réseaux d'éléments finis simulant le moule et son éprouvette.....	8-4
8 2 Essais nos 1 et 2: Paramètres thermiques des matériaux autres que le sol	8-5
8 3 Essais nos 1 et 2: Paramètres thermiques du sol.....	8-5
8 4 Comparaison des mesures avec la simulation numérique: essai no 1 sans capteur.....	8-6
8 5 Comparaison des mesures avec la simulation numérique: essai no 2 avec capteurs.....	8-6
8 6 Essais nos 1 et 2 : Comparaison des isothermes dans l'éprouvette de sol	8-7
8 7 Essais nos 1 et 2 : Comparaison des isothermes dans l'éprouvette de sol (suite)	8-7
8 8 Essais nos 1 et 2 : Températures sur l'axe de l'éprouvette vs celles sur le moule.....	8-8
8 9 Essai no 5: Paramètres thermiques des matériaux autres que le sol.....	8-10
8 10 Essai no 5: Le réseaux d'éléments finis et ses conditions aux limites.....	8-11
8 11 Essai no 5 : Paramètres thermiques du sol.....	8-12
8 12 Essai no 5: Résultats (isothermes) au temps de 886'000 s (246 heures)	8-13

Chapitre 9

9 1 Dispositif d'essais en vraie grandeur d'Ecublens	9-4
9 2 Thermomètre Pt 100 et tensiomètre (remote, 2 tubes)	9-4
9 3 Capteur magnétique de tassement	9-4
9 4 Capteurs de pression des terres Glötzl.....	9-5
9 5 Capteur de contraintes verticales et de cisaillement Cambridge	9-5
9 6 Vérin dynamique et comparateurs avec cadre de référence.....	9-5

9 7 Comparaison des lentilles de glace de la halle fosses avec celles de la présente recherche	9-6
9 8 Principaux résultats d'un essai caractéristique	9-7
9 9 Influence de la vitesse du dégel sur la portance.....	9-8
9 10 Résultat de la simulation numérique de l'essai de la figure 9 8	9-9
9 11 Dispositif de chargement.....	9-10
9 12 Essai no VI. Contraintes sous la plaque et déplacements.....	9-11
9 13 Essai no IV. Contraintes sous la plaque et déplacements.....	9-11
9 14 Résultats de l'estimation des modules résilients M_r	9-11
9 15 Résultats de l'exploitation des mesures de déflexion.....	9-11

Chapitre 10

10 1 Durée du dégel d'une chaussée.....	10-6
10 2 Interpolation de la relation : Durée fonte lentilles = $f(FI, d)$	10-7
10 3 Finlande : Nombre d'applications de la charge de 100 kN pendant la durée de vie de la route	10-10
10 4 Finlande : Classes de portance	10-11
10 5 Finlande : Gonflements admissibles	10-11
10 6 Finlande : Détermination de l'épaisseur de la superstructure en fonction de l'indice de gel	10-11
10 7 Finlande : Méthode de calcul des épaisseurs de la superstructure par la formule d'Odermark.....	10-12
10 8 Données de l'exemple	10-12
10 9 Finlande : Corrélations entre la granulométrie et leur module résilient M_r	10-13
10 10 Finlande : Détermination de l'épaisseur des couches de la superstructure pour une portance de classe F ..	10-14
10 11 AASHTO : définition de la fiabilité	10-17
10 12 AASHTO : Détermination du coefficient de la couche de support	10-18
10 13 USA : détermination du coefficient de drainage des couches de fondation et de support.....	10-18
10 14 AASHTO : Abaque de conception	10-20
10 15 AASTHO : définition de la vitesse de gonflement	10-21
10 16 AASHTO : définition de la qualité du drainage	10-21
10 17 AASHTO : Perte de viabilité au dégel en fonction du drainage et de la profondeur du gel.....	10-21
10 18 AASTHO : Perte de viabilité due aux effets du gel	10-22
10 19 Démarche générale de la procédure du CRREL	10-26
10 20 Réseau de la procédure du CRREL	10-26
10 21 Classification des modules résilients.....	10-29
10 22 Coefficients de Poisson	10-30
10 23 Exemple de détermination du module résilient effectif $M_{r\text{ eff}}$	10-33
10 24 Résultats des essais d'identification et de succion pour le Mn/ROAD Test.....	10-35
10 25 Résultats des essais de perméabilité et de teneur en eau non gelée pour le Mn/ROAD Test	10-36
10 26 Résultats des essais de mesure du M_r au dégel pour le Mn/ROAD Test.....	10-37
10 27 Résultats des essais de mesure du M_r sur des sols du New Hampshire (USA).....	10-38
10 28 Modules résilients effectifs recommandés pour quelques sols	10-38
10 29 Facteurs de réduction au dégel des modules résilients hors gel.....	10-39
10 30 Comparaison des mesures des modules résilients	10-40
10 31 Procédure du dimensionnement d'une chaussée par un modèle analytique.....	10-45

Chapitre 11

11 1 Un mode de formation possible des glaciers rocheux	11-4
11 2 Laves torrentielles sur un névé (photo Dysli)	11-4
11 3 Glacier rocheux de Reichenkar (Autriche, ouest Alpes Stubai) du printemps à l'été.....	11-5
11 4 Effet d'un retrait glaciaire sur l'évolution d'un pergélisol alpin	11-5
11 5 Lentille de glace dans le Grand nord canadien	11-6
11 6 Evolution des glaciers rocheux (selon W. Haeberli, 1983, avec ajout Dysli)	11-6
11 7 Fonte pergélisol moraine du Dolent	11-7
11 8 Loggings de 6 forages dans des pergélisols alpins	11-10
11 9 Photographies de la moraine pergelée du pylone no II du téléphérique du Petit Cervin	11-11
11 10 Températures de quelques pergélisols alpins.....	11-11
11 11 Caractéristiques des échantillons prélevés dans les forages du téléphérique du Petit Cervin	11-12
11 12 Lentille de glace dans la moraine de Prafleuri.....	11-12
11 13 Granulométries et courbes caractéristiques sol-eau de deux pergélisols alpins	11-14
11 14 Modèle graphique du gel appliqué aux pergélisols	11-17
11 15 Formation des lentilles de glace par cryo-succion	11-18
11 16 Chaleur latente	11-21
11 17 Fonte des lentilles de glace sous une route	11-22
11 18 Essai no 6: Effet de la chaleur latente	11-23
11 19 Fonte de la glace dans une roche	11-24
11 20 Données et un des résultats du calcul de calage 2D	11-26
11 21 Résultat de la simulation numérique	11-27
11 22 Système fermé et système ouvert	11-29

Contenu du CD-Rom

Le CD-Rom annexé contient les animations du gel et dégel de lentilles de glace réalisées avec les photographies prises dans l'éprouvette du dispositif d'essai avec un endoscope. Elles sont numérotées de la manière suivante :

[Nom essai]–[g = gel, d = dégel]–[hauteur mesurée depuis le fond du moule (h)]–heure début animation (heure depuis le début de l'essai)].

Elles sont enregistrées au format avi sans compression et peuvent ainsi être lues sur n'importe quel ordinateur avec les lecteurs les plus courants : Window Media Player, RealPlayer, QuickTime Player, etc.

No animation	Dates	Heures depuis début essai	Δt [heure]	Remarque
3-g-254-195	26/9 20:55 au 27/9/2003 17:55	195 à 216	1/2	Courte mais intéressante.
3-g-191-259	29/9 12:55 au 1/10/2003 9:25	259 à 304	1/2	Intéressante. Avec dégel intermédiaire.
3-g-185-310	1/10 14:55 au 2/10/2003 14:25	310 à 333	1/2	Intéressante.
3-g-180-336	2/10 17:35 au 4/10/2003 18:25	336 à 385	1/2	Intéressante.
3-g-175-409	5/10 18:25 au 6/10/2003 9:25	409 à 424	1/2	Sans grand intérêt.
3-d-205-430	6/10 15:15 au 7/10/2003 3:25	430 à 442	1/2	Intéressante.
4-g-260-146	4/12 19:25 au 5/12/2003 22:25	146 à 173	1/2	Sans grand intérêt.
4-d-240-363	13/12 20:10 au 15/12/2003 10:10	363 à 401	1/2	Intéressante.
4-d-280-407	15/12 15:50 au 16/12/2003 13:55	407 à 429	1/4	Intéressante. Avec regel intermédiaire.
8-g-170-237	27/6 17:06 au 29/6/2004 10:21	237 à 278	1/4	Intéressante.
8-d-162-336	1/7 20:06 au 2/7/2004 20:06	336 à 360	1/2	Intéressante. Fin gel et début dégel
8-g-167-406	4/7 18:28 au 6/7/2004 14:06	406 à 450	1/2	Sans grand intérêt. Curieux déplacement vers le bas : fonte des lentilles au-dessous ?
8-g-168-458	6/7 21:51 au 8/7/2004 3:51	458 à 488	1/2	ditto
8-d-188-585	12/7 5:21 au 13/7/2004 17:06	585 à 621	1/4	Intéressante.
8-d-209-624	13/7 20:00 au 14/7/2004 12:51	624 à 641	1/4	Intéressante. Fin du dégel d'une lentille

Résumé

Curieusement, le dégel des sols gélifs contenant des lentilles de glace, n'a fait l'objet que de rares études fondamentales alors qu'il est la cause des dégâts aux constructions les plus importants. La diminution de la portance induite par la fonte des lentilles est un phénomène destructeur, et donc coûteux, qui concerne aussi bien les infrastructures de routes ou de voies ferrées, que la fonte des pergélisols alpins par réchauffement du climat. La présente recherche, avant tout expérimentale, a tenté d'expliquer comment fondent les lentilles de glace et comment l'eau de leur fonte agit sur les propriétés des sols, en particulier, sur leur déformabilité.

De nombreux essais au gel et dégel ont été réalisés dans un dispositif d'essai élaboré qui comprenait notamment :

- Un moule contenant une éprouvette de quelque 150 mm de diamètre et de 300 mm de hauteur ; il était légèrement conique pour diminuer le frottement contre ses parois lors du gonflement.
- De nombreux capteurs placés sur le pourtour et dans l'éprouvette permettant la mesure des températures, des teneurs en eau non gelée et des succions capillaires.
- Trois cryostats contrôlant les températures de la tête de l'éprouvette (positives et négatives), de son embase (toujours positives) et de l'extérieur de l'isolation thermique placée contre le moule.
- Une micro-caméra (endoscope) se déplaçant dans un tube translucide placé dans l'axe de l'éprouvette qui a permis de réaliser des animations de la formation et de la fonte des lentilles de glace.
- Un dispositif permettant de soumettre l'éprouvette à des cycles de charge et décharge.
- Une installation à rayons X qui, par le biais de billes de plomb placées dans l'éprouvette, a permis de mesurer les déformations dans toute l'éprouvette pendant les cycles de gel-dégel.

Tous les essais ont été effectués sur un seul limon très gélif. Leur durée – quelque deux mois – n'a pas autorisé la réalisation d'essais sur plusieurs types de sols gélifs. Quelques simulations numériques ont permis de vérifier le comportement thermique du dispositif d'essais.

Ensuite, d'anciens essais en vraie grandeur au gel et dégel sur des superstructures routières, réalisés dans une fosse d'essais, ont été réexploités pour obtenir une meilleure information sur la déformabilité (modules résilients) de l'infrastructure gélive qui était constituée par un limon semblable à celui utilisé pour les essais en laboratoire décrits ci-dessus.

Les résultats des essais en laboratoire et la réexploitation des mesures en vraie grandeur sur des superstructures routières ont été utilisés pour deux applications pratiques très différentes : le dimensionnement des superstructures routières et ferroviaires au moyen de méthodes quantitatives, utilisant, en particulier, les modules résilients et, la formation des pergélisols alpins et leur fonte par le réchauffement du climat.

Dans le domaine général du *phénomène physique du gel et du dégel* des sols gélifs, l'expérimentation très élaborée a permis de mesurer avec précision et fiabilité les nombreux paramètres qui interviennent dans les phénomènes du gel et du dégel des sols fins. Cependant la

plupart de ces phénomènes étaient déjà connus et leurs paramètres assez bien déterminés par de nombreuses expérimentations. Cette recherche a néanmoins permis de quantifier un peu mieux certains de ces paramètres. Le plus grand apport à la bonne connaissance de ces phénomènes a été la visualisation de la formation et de la fonte des lentilles de glace, visualisation à l'intérieur de l'éprouvette au moyen d'un endoscope, ce qui n'avait jamais été fait auparavant. Les animations résultantes montrent très bien comment se forment et comment fondent les lentilles de glace dans un sol presque naturel.

Dans le domaine du *dimensionnement au gel et dégel des voies de communication*, la recherche a montré que l'usage d'un module résilient au dégel, avec des méthodes numériques modernes de dimensionnement, était tout à fait possible. Cette recherche a donné quelques valeurs de ce module : pour le limon utilisé lors des essais réalisés dans la halle fosses d'Ecublens, pour différents sols gélifs et, par une méthode élaborée, pour le limon utilisé pour cette recherche. Toujours dans ce domaine, elle a aussi montré comment utiliser le module résilient dans les méthodes numériques modernes et comment le déterminer en laboratoire. Les résultats de la présente recherche seront ainsi d'une grande utilité dans les travaux de la commission suisse qui va très prochainement s'atteler à la révision des normes suisses de dimensionnement des super- et infrastructures routières voire ferroviaires.

Dans le domaine de la *construction des voies de communication*, cette recherche a confirmé que l'eau de fonte des lentilles de glace s'écoulait vers la zone du sol où elle avait été prélevée puis transportée vers le front de gel. Tout dispositif de drainage de la forme de la fondation est ainsi inutile.

Enfin, dans le domaine de la *formation et de la fonte des pergélisols alpins par réchauffement du climat* et de l'initiation de laves torrentielles dans les pergélisols alpins, la présente recherche a tout d'abord démontré l'importance du régime des succions capillaires dans la formation des pergélisols alpins, importance qui n'avait pas encore été bien mise en évidence. Elle a aussi montré que l'usage de modèles numériques élaborés dans la prévision de la fonte des pergélisols alpins et dans l'initiation de laves torrentielles était possible. Un tel usage est cependant difficile et ne peut être considéré comme un outil pratiquement utilisable dans la prévention de ce dangereux phénomène. Cette recherche a aussi donné un moyen pratique pour évaluer le degré de supersaturation des pergélisols alpins.

Mots clés : Gel, dégel, chaussée, pergélisol alpin

Zusammenfassung

Merkwürdigerweise ist das Auftauen von frostempfindlichen Böden, die Eislinsen enthalten, Gegenstand von nur seltenen grundlegenden Studien, während es die Ursache der wichtigsten Schäden an den Bauwerken darstellt. Die Tragfähigkeitsverminderung, die durch das Schmelzen der Linsen verleiht wird, ist ein zerstörendes und daher kostspieliges Phänomen, das nicht nur die Infrastrukturen der Strassen oder der Eisenbahn betrifft, sondern auch das Schmelzen des Permafrostes durch Erwärmung des Klimas. Diese vor allem experimentelle Forschung hat versucht zu erklären, wie die Eislinsen schmelzen und wie das Schmelzwasser auf die Eigenschaften der Böden, und insbesondere auf ihre Verformbarkeit, wirkt.

Zahlreiche Frost- und Auftauversuche wurden in einer ausgearbeiteten Versuchseinrichtung realisiert; sie umfassten insbesondere :

- Ein Zylinder, der eine Probe von etwa 150 mm Durchmesser und 300 mm Höhe enthält; die Form war leicht konisch, um die Reibung gegen die Wände während der Frosthebung zu vermindern.
- Zahlreiche Empfänger, die auf den Umfang und in den Prüfkörper gesetzt wurden, um die Messung der Temperatur, des nicht gefrorenen Wassergehalts und des kapillaren Saugens zu erlauben.
- Drei Kryostate, die Temperaturen vom Kopf des Prüfkörpers (positiv und negativ), von seinem Unterteil (immer positiv) und von der Aussenseite des Wärmeschutzes, der gegen die Form gesetzt wurde, kontrollieren.
- Eine Mikrokamera (Endoskop), die sich in einer lichtdurchlässigen Röhre fortbewegt, die entlang der Achse des Prüfkörpers gesetzt wurde; dies hat erlaubt, Aufnahmen der Bildung und des Schmelzens der Eislinsen zu realisieren.
- Eine Vorrichtung die erlaubt, dem Prüfkörper Ladungs- und Entladungszyklen zu unterbreiten.
- Eine Einrichtung mit Röntgenstrahlen, die mittels Bleikugeln, die in den Prüfkörper gesetzt wurden, erlaubt hat, die Verformungen des ganzen Prüfkörpers während den Frost-Tau-Zyklen zu messen.

Alle Versuche wurden mit einem einzigen sehr frostempfindlichen Silt durchgeführt. Ihre Dauer - etwa zwei Monate - hat es nicht erlaubt, die Versuche auf mehreren frostempfindlichen Bodentypen zu verbreiten. Einige numerische Simulationen haben erlaubt, das thermische Verhalten der Versuchseinrichtung zu prüfen.

Anschliessend wurden alte Frost- und Auftauversuche, die in reeller Grösse auf Strassenoberbaue in einer Versuchsgrube durchgeführt wurden, wieder verwertet, um eine bessere Information über die Verformbarkeit (resilient Modulus) der frostempfindlichen Infrastruktur zu erhalten, die durch einen Silt dargestellt wurde. Dieser Silt ist jenem ähnlich, der für die oben beschriebenen Laborversuche benutzt wurde.

Die Ergebnisse der Laborversuche und die Wiederverwertung der Messungen in reeller Grösse auf Strassenoberbaue sind für zwei sehr verschiedene praktische Anwendungen benutzt worden:

die Dimensionierung der Strassen- und Eisenbahnoberbaue mittels quantitativen Methoden, die sich insbesondere auf die resilient Modulus stützen, und die Bildung des Permafrostes in den Alpen und ihr Schmelzen durch die Erwärmung des Klimas.

Im allgemeinen Bereich des *physischen Phänomens des Frostes und des Auftauens* der frostempfindlichen Böden haben die sehr ausgearbeiteten Versuche erlaubt, mit Genauigkeit und Zuverlässigkeit, die zahlreichen Parameter, die in den Phänomenen des Frostes und des Auftauens der feinkörnigen Böden eintreten, zu messen. Jedoch war die Mehrzahl dieser Phänomene bereits bekannt und ihre Parameter waren, Dank zahlreichen Experimenten, recht gut bestimmt. Diese Forschung hat dennoch erlaubt, einige von diesen Parametern ein wenig besser zu quantifizieren. Der grösste Beitrag zur guten Kenntnis dieser Phänomene war die Visualisierung der Bildung und des Schmelzens der Eislinsen. Diese Visualisierung fand innerhalb des Prüfkörpers, mittels eines Endoskops statt, was noch nie zuvor gemacht wurde. Die resultierenden Animationen zeigen sehr gut wie die Eislinsen, im fast natürlichen Boden, sich bilden und wie sie schmelzen.

Im Bereich der *Dimensionierung des Frostes und des Auftauens der Verkehrswege* hat die Forschung gezeigt, dass die Anwendung eines resilient Moduls für das Auftauen, mit modernen numerischen Dimensionierungsmethoden, durchaus möglich war. Diese Forschung hat einige Werte für dieses Modul gegeben: für den benutzten Silt während der Versuche in der Grubenhalle von Ecublens, für verschiedene frostempfindliche Böden, und, mittels einer ausgearbeiteten Methode, für den Silt der für diese Forschung benutzt wurde. Stets auf diesem Gebiet hat die Forschung auch gezeigt wie das resilient Modul in den modernen numerischen Methoden benutzt wird und wie es im Laboratorium bestimmt wird. Die Forschungsergebnisse werden so von grossem Nutzen bei den Arbeiten der Schweizer Kommission sein, die sich demnächst um die Revision der Schweizer Normen der Dimensionierung des Über- und Unterbaus der Strassen, sogar der Bahn kümmern wird.

Im Bereich des *Baus der Verkehrswege* hat diese Forschung bestätigt, dass das Schmelzwasser der Eislinsen in Richtung der Zone des Bodens fliesst wo es entnommen worden war, und dann in Richtung der Frostfront befördert. Jede Vorrichtung der Drainage des Planums ist somit unnötig.

Schliesslich, im Bereich der *Bildung und des Schmelzens des Permafrostes in den Alpen durch Erwärmung des Klimas* und der Bildung von Schlammströmen, hat diese Forschung zunächst die Bedeutung des kapillaren Saugensregimes in der Bildung des alpinen Dauerfrostes bewiesen; Bedeutung, die bisher noch nicht recht hervorgehoben wurde. Sie hat auch gezeigt, dass die Anwendung von ausgearbeiteten numerischen Modellen in der Prognose des Schmelzens des alpinen Permafrostes und in der Bildung von Schlammströmen möglich war. Eine solche Anwendung ist jedoch schwierig und kann nicht als ein in der Praxis brauchbares Werkzeug für die Vorbeugung dieses gefährlichen Phänomens betrachtet werden. Diese Forschung hat auch ein praktisches Mittel ergeben, um den Übersättigungsgrad des Permafrostes zu schätzen.

Schlagwörter : Frost, Auftau, Strassenoberbau, Permafrost in den Alpen

Summary

Curiously, the thawing of frozen soils containing ice lenses has only been the subject of rare fundamental studies even though it is the cause of the greatest damage to constructions. The reduction of bearing capacity caused by the thawing of the ice lenses is a destructive phenomenon, and thus costly, which concerns roadway and railway infrastructures, as well as the melting of mountain permafrost by global warming. The present research, especially experimental, has tried to explain how ice lenses melt and how the water produced by the melting acts on soil properties, in particular on their deformability.

Numerous freezing and thawing tests have been carried out in a testing apparatus including :

- A mould containing a specimen 150 mm in diameter and 300 mm in height. It is slightly conical in order to reduce the friction against its walls due to swelling.
- Numerous gauges placed on the sides and in the specimen in order to measure temperature, unfrozen water content and suction.
- Three cryostats, which control temperature at the head of the specimen (positive and negative), at its base (always positive) and outside of the thermal insulation placed against the mould.
- A micro-camera (endoscope), which moves in a translucent tube placed along the axis of the specimen, which enables animations of the growth and melting of ice lenses to be made.
- A press to enable loading and unloading cycles to be applied to the specimen.
- An X ray device using lead shot placed in the specimen, which enables the measurement of deformation in the entire specimen during the freezing and thawing cycles.

All of the tests were carried out on one very frost-susceptible silt. Their duration of approximately two months excluded the possibility of carrying out tests on several types of frost-susceptible soils. Some numerical simulations permitted the verification of the thermal behaviour of the test apparatus.

Then, previous freezing and thawing tests carried out at full scale on road pavements, carried out in a large test pit, were reinterpreted in order to obtain improved information on the deformability (resilient moduli) of the frost-susceptible infrastructure which was made up of a silt similar to that tested in the laboratory tests described above.

The results of the laboratory tests and the reinterpretation of the full-scale measurements on road pavements were used for two very different practical applications : the design of roadway and railway pavements by quantitative methods using, in particular, resilient moduli and the formation of mountain permafrost and its thawing due to global warming.

In the general field of the *physical phenomenon of freezing and thawing* of frost-susceptible soils, the very elaborate experiments permitted the measurement, with precision and reliability, of numerous parameters which are involved in the phenomena of freezing and thawing of fine-grained soils. However, most of these phenomena were already known and their parameters have been determined rather well by numerous experiments. This research has, nevertheless, permitted the quantification of certain parameters a bit better. The greatest contribution to the understanding of these phenomena has been the visualisation of the growth and the thawing of

ice lenses inside the specimen using an endoscope, which has never been carried out previously. The resulting animations show extremely well how the ice lenses form and melt in a virtually natural soil.

In the field of freezing and thawing *design for roads and railways*, the research has shown that the use of a thawing resilient modulus combined with modern numerical design methods is completely possible. This research has provided several values for this modulus : for the silt used in the full-scale test pit, for various frost-susceptible soils, and, by a more elaborate method, for the silt used in this research. Also concerning this field, it has shown how the resilient modulus may be used in modern numerical methods and how to determine it in the laboratory. The results of this research will thus be very useful for the work of the Swiss committee which will very soon address the revision of Swiss standards for the design of pavements for roads and railways.

In the field of the *construction of roads and railways*, this research has confirmed that the water, which comes from the melting of ice lenses, flows toward the soil zone from where it has been extracted then transported toward the freezing front. Any drainage of the formation level is thus of no practical use.

Finally, in the field of *melting of permafrost due to global warming* and the initiation of debris flows in mountain permafrost, this research has shown, first of all, the importance of the capillary suction regime in the formation of mountain permafrost, which has never been well explained until now. It has also shown how the use of sophisticated numerical models in the prediction of the melting of mountain permafrost and of the initiation of debris flows is possible. Such use, however, is difficult and should not be considered as a practical tool for common use in the prevention of these dangerous phenomena. This research has also provided a practical method for evaluating the degree of supersaturation of permafrost.

Key words : Frost, thawing, pavement, mountain permafrost

Principales notations

Des dimensions sont données à titre d'exemple ; elles peuvent être cependant différentes.

Lettre latine

c	capacité thermique massique	$[\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$
C	capacité thermique volumique	$[\text{J}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}]$
c'	cohésion effective	$[\text{kPa}]$
c	cohésion	$[\text{kPa}]$
C_c	Indice de compression	$[-]$
c_f	capacité thermique massique du sol gelé	$[\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$
C_f	capacité thermique volumique du sol gelé	$[\text{J}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}]$
c_i	capacité thermique massique de la glace	$[\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$
C_i	capacité thermique volumique de la glace	$[\text{J}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}]$
C_s	Indice de gonflement	$[-]$
c_u	capacité thermique massique du sol non gelé	$[\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$
C_u	capacité thermique volumique du sol non gelé	$[\text{J}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}]$
c_u	cohésion apparente (non drainée)	$[\text{kPa}]$
c_v	coefficient de consolidation	$[\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}]$
d_{50}	diamètre des grains à 50% de la courbe granulométrique	$[\text{mm}]$
e	indice de vide	$[-]$
em	émissivité (0 à 1)	$[-]$
E	module de déformation linéaire	$[\text{kPa}], [\text{MPa}]$
e_0	indice de vide initial	$[-]$
E_{α}	module œdométrique	$[\text{kPa}], [\text{MPa}]$
g	accélération de la pesanteur	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-2}]$
G	module de cisaillement ou de glissement	$[\text{kPa}]$
h	charge hydraulique	$[\text{m}]$
h_c	coefficient de convection	$[\text{J}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}]$
k	conductivité thermique	$[\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$
K	module de déformation volumétrique	$[\text{kPa}]$
k_D	conductivité hydraulique (Darcy) = perméabilité	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$
k_f	conductivité thermique du sol gelé (ou en surfusion)	$[\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$
k_i	conductivité thermique de la glace	$[\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$
k_s	module de réaction	$[\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}]$
k_u	conductivité thermique du sol non gelé	$[\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$
k_w	conductivité thermique de l'eau	$[\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$
l	chaleur latente massique	$[\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}]$
L	chaleur latente volumique	$[\text{J}\cdot\text{m}^{-3}]$

L_i	chaleur latente volumique de congélation de l'eau	$[\text{J}\cdot\text{m}^{-3}]$
l_i	chaleur latente massique de congélation de l'eau	$[\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}]$
l_w	chaleur latente massique d'évaporation de l'eau	$[\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}]$
L_w	chaleur latente volumique d'évaporation de l'eau	$[\text{J}\cdot\text{m}^{-3}]$
M_E	module de l'essai de plaque	$[\text{kPa}], [\text{MPa}]$
m_v	coefficient de compressibilité volumétrique	$[\text{kPa}^{-1}], [\text{MPa}^{-1}]$
n	porosité	$[\%]$
p_{glim}	pression limite de gonflement	$[\text{kPa}]$
q	flux de chaleur, vitesse d'extraction de la chaleur	$[\text{W}\cdot\text{m}^{-2}]$
R	indice de consolidation par dégel	$[-]$
SP	Potentiel de ségrégation	$[10^{-5}\cdot\text{mm}^2\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{C}^{-1}]$
S_r	degré de saturation	$[\% \text{ ou } -]$
T	température en général	$[\text{K} \text{ ou } \text{° C}]$
t	temps	$[\text{s}]$
T_e	température à laquelle toute l'eau liée (adsorbée) est gelée	$[\text{K} \text{ ou } \text{° C}]$
T_{env}	température de l'environnement	$[\text{K} \text{ ou } \text{° C}]$
T_f	température de congélation	$[\text{K} \text{ ou } \text{° C}]$
u	pression (d'eau) interstitielle ou succion capillaire si elle est négative	$[\text{kPa}]$
u_a	pression de l'air interstitielle	$[\text{kPa}]$
u_i	pression de la glace	$[\text{kPa}]$
v_{gonfl}	vitesse du gonflement (par formation lentilles glace)	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$
v_{iass}	vitesse du tassement (par fonte lentilles glace)	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$
v_w	vitesse de gonflement dû à l'eau aspirée vers le front de gel	$[\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}]$
w	teneur en eau massique	$[\% \text{ de la masse}]$
w_i	teneur en glace massique	$[\% \text{ de la masse}]$
w_{sat}	teneur en eau massique du sol saturé	$[\% \text{ de la masse}]$
w_u	teneur en eau non gelée, massique	$[\% \text{ de la masse}]$
z_f	position du front de gel pendant le gel	$[\text{m}]$
z_t	position du front de gel pendant le dégel	$[\text{m}]$

Lettre grecque

γ	poids volumique (apparent) du sol	$[\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}]$
γ_d	poids volumique du sol sec	$[\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}]$
γ_s	poids volumique des particules solides	$[\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}]$
γ_{sat}	poids volumique du sol saturé	$[\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}]$
γ_w	poids volumique de l'eau	$[\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}]$
γ'	poids volumique du sol déjaugé	$[\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}]$
ε	déformation linéaire	$[-]$
ε_v	déformation volumétrique	$[-]$
ε_z	déformation verticale	$[-]$
θ	teneur en eau volumique (parfois θ_w)	$[\% \text{ du volume}]$

θ	teneur en eau volumique	[% du volume]
θ_0	teneur en eau volumique initiale	[% du volume]
θ_f	teneur en glace volumique	[% du volume]
ν	coefficient de Poisson	[-]
ρ	masse volumique (apparente) du sol	[t·m ⁻³]
ρ_d	masse volumique du sol sec	[t·m ⁻³]
ρ_f	masse volumique du sol gelé	[t·m ⁻³]
ρ_i	masse volumique de la glace	[t·m ⁻³]
ρ_s	masse volumique des particules solides	[t·m ⁻³]
ρ_{sat}	masse volumique du sol saturé	[t·m ⁻³]
ρ_w	masse volumique de l'eau	[t·m ⁻³]
σ'	contrainte effective	[kPa]
σ	contrainte totale	[kPa]
σ_0	contrainte initiale	[kPa]
σ_R	contrainte résiduelle	[kPa]
$\sigma_{1,2,3}$	contraintes principales	[kPa]
σ_{oct}	contrainte octaédrique (moyenne)	[kPa]
σ_{SB}	constante de Stefan-Boltzmann	$= 5,68 \cdot 10^{-8} \text{ [J} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^4]$
τ	contrainte de cisaillement	[kPa]
τ_{oct}	contrainte de cisaillement octaédrique	[kPa]
Φ'	angle de frottement effectif	[°]
Φ	angle de frottement	[°]
Φ_u	angle de frottement apparent (non drainé)	[°]
ψ	potentiel hydraulique	[m]

Abréviations

AASHTO	American Association of State Highway & Transportation
AD	Anno Domini = depuis la naissance du Christ (dates)
AFNOR	Association Française de Normalisation
ASTM	American society for testing and material
BP	Before Present (dates)
BS	British Standards
CBR	California Bearing Ratio
CRREL	Cold Region Research & Engineering Laboratory
DIN	Deutsches Institut für Normung
EMPA	Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt Laboratoire fédéral d'essai des matériaux et de recherche Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research
EPFL	Ecole polytechnique fédérale de Lausanne
FNRS	Fonds National (suisse) de la Recherche Scientifique
FRA	Finish Road Administration
GPIB	General Purpose Instrumentation Bus (IEEE 488)
LMS	Laboratoire de mécanique des sols de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne
NCHRP	National Cooperative Highway Research Programme
NF	Norme Française
OFROU	Office fédéral des routes (suisses)
RTAC	Roads and Transportation Association of Canada
SN	Schweizerischen Normen – Normes suisses
SWCC	Soil-Water Characteristic Curve – Courbe caractéristique sol-eau
VSS	Association suisse des professionnels de la route et des transports

1

Cadre et objectifs

1.1 Cadre

Cette recherche est un peu exceptionnelle car le requérant est un ingénieur civil qui est considéré, en Suisse et à l'étranger, comme un spécialiste reconnu des problèmes de gel dans les sols. Il est l'auteur de nombreuses publications scientifiques consacrées au gel des sols et à d'autres domaines du génie civil dont la modélisation numérique. Il a publié un livre de référence en matière de gel dans les sols (Dysli 1991), livre qui a reçu le prix Henri-Courbot en 1993. Il a été membre jusqu'en 2001 du comité scientifique international dominant en matière d'action du gel dans les sols (Comité technique no 8 de la Société internationale de mécanique des sols et de la géotechnique) et a été président, aussi jusqu'en 2001, de la commission suisse qui traite des problèmes de gel dans les fondations de routes. Il est en outre expert du Conseil de recherche en sciences naturelles et en génie du Canada (le FNRS canadien), est souvent demandé comme lecteur pour des revues et des congrès internationaux et a été plusieurs fois membre de jury de thèse à l'étranger.

Cet ingénieur a fini, pour raison d'âge (retraite), sa carrière « officielle » au Laboratoire de mécanique des sols de l'EPFL. Il n'a cependant pas du tout l'intention d'abandonner ses recherches et souhaite les poursuivre dans le cadre de cette recherche.

Elle se fait dans le cadre des recherches suisses en matière de gel conduites par l'Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS) et est soutenue par l'Office fédéral des routes (OFROU) qui a accordé un crédit de quelque CHF 100'000 pour la mener à bien.

1.2 Objectif général

Cette recherche a pour objectif général l'étude fondamentale du phénomène physique du *dégel* des sols gélifs, à savoir des sols pouvant former des lentilles de glace. En effet et bien curieusement, le dégel n'a fait l'objet que de rares études alors qu'il est la cause des dégâts aux constructions les plus importants. Le processus même du dégel était notamment fort mal connu avant la recherche entreprise par le Laboratoire de mécanique des sols de l'EPFL (Dysli 1991a, Dysli 1993).

1.3 Explication du phénomène physique du dégel

L'explication correcte du phénomène physique du dégel sur le plan thermique, hydraulique et mécanique est l'objectif le plus important. Comment fondent les lentilles de glace et comment intervient la chaleur latente de fusion de la glace ? Pourquoi cette fonte est si brutale ? Où va l'eau de fonte de ces lentilles ? Sur le plan mécanique, comment agit cette eau sur la déformabilité du sol ?

1.4 Application à des infrastructures de voies de communication

Une recherche en sciences appliquées doit conduire à des applications pratiques à court ou moyen terme. Par exemple, les recherches menées avec le dispositif d'essais en vraie grandeur du Laboratoire de mécanique des sols de l'EPFL (Halle fosses, Dysli & Pfister 1982, Dysli & Bourdeau 1984, Dysli 1991a, 1993, 1999) ont permis une révision rapide et importante des normes suisses de dimensionnement des superstructures routières en ce qui concerne le gel et le dégel, révision qui a conduit à une réduction des coûts de construction (plusieurs millions de CHF par an).

Les tendances internationales en matière de dimensionnement des superstructures routières vont dans le sens de l'usage de méthodes plus rationnelles que les méthodes empiriques à la base de la plupart des normes actuelles. Ces nouvelles méthodes simulent le comportement de la route par les lois de la mécanique du continu et des lois de comportement propres à chaque matériau constituant la superstructure et l'infrastructure d'une route. Le module résilient de l'infrastructure est un des paramètres importants utilisés par ces nouvelles méthodes. La Commission d'experts VSS 5.03 *Dimensionierung und Abnahme*, s'est déjà préoccupée de cette tendance et envisage d'introduire en Suisse une telle méthode rationnelle qui conduira, très probablement, à une révision des normes SN 640 317 « Dimensionnement, Terrain et infrastructure » et SN 640 324 « Dimensionnement, Superstructure des routes ». Cette recherche va ainsi dans ce sens et ses résultats pourront très probablement être utilisés lors de l'élaboration de cette nouvelle méthode de dimensionnement des superstructures routières. Elle permettra notamment d'évaluer le module résilient au dégel de l'infrastructure.

L'évaluation de ce module sera possible grâce à des essais réalisés avec un nouveau dispositif d'essais, développé dans le cadre de cette recherche, permettant l'application de charges en tête de l'éprouvette, soumise à un gel et à un dégel, et l'évaluation des déformations, à différents niveaux de l'éprouvette, par des radiographies mettant en évidence des billes de plomb placées dans l'éprouvette. En outre, la réexploitation des nombreuses mesures réalisées pendant les essais, au gel et dégel, en vraie grandeur, de 1975 à 1985 environ, dans la halle fosses d'Ecublens avec une instrumentation très complète et élaborée permettra d'aller plus loin que ce qui avait été fait à l'époque (Dysli & Pfister 1982, Dysli & Bourdeau 1984, Lefebvre & Dysli 1988, Dysli 1993).

L'application du phénomène de la fonte des lentilles de glace à des infrastructures de routes ou de voies ferrées est un autre objectif de la recherche. Les essais cités plus haut devraient permettre de mieux appréhender ce phénomène et d'améliorer ainsi nos méthodes de construction (normes en matière de construction routière par exemple).

1.5 Application à la fonte des pergélisols alpins

L'application du phénomène du dégel des sols à la fonte des pergélisols alpins par réchauffement du climat et à l'initiation de laves torrentielles est très intéressante. En effet, des méthodes élaborées basées sur la thermodynamique et la mécanique n'ont été que rarement utilisées pour l'analyse de ce dangereux et destructeur phénomène. Cette application aux pergélisols permettra, dans une certaine mesure, d'améliorer la prévention des phénomènes liés à la fonte de ces pergélisols alpins.

1.6 Structure du rapport

Le rapport est divisé de la manière suivante :

- Chapitre 2 :** Il est consacré au traditionnel état des connaissances actuelles. Dans ce chapitre, la recherche étant avant tout expérimentale, la modélisation numérique n'est pas très développée et le lecteur voudra bien, s'il le souhaite, se référer aux nombreuses références bibliographiques.
- Chapitre 3 :** Il est dévolu au sol qui a été utilisé pour les essais et contient notamment tous les résultats des essais géotechniques entrepris pour le définir exactement.
- Chapitre 4 :** Il contient une description très complète du dispositif d'essai avec, notamment, les étalonnages des capteurs et des modes opératoires. Il doit permettre, comme le veut toute bonne recherche scientifique, à quiconque de refaire les essais qui font l'objet de la recherche.
- Chapitres 5 et 6 :** Ces deux chapitres contiennent les résultats de tous les essais. Le premier contient ceux relatifs aux essais dont la charge verticale est statique et constituée de disques de plomb placés sur la tête et le second, ceux relatifs aux essais réalisés avec une charge verticale plus importante et variable produite par un vérin placé sous le dispositif d'essais. La division en deux des résultats des essais provient de considération d'édition et de mise en pages du rapport.
- Chapitre 7 :** C'est le chapitre le plus important de la partie expérimentale de la recherche. Il est dévolu à la comparaison, à la discussion et à la synthèse de tous les résultats des essais.
- Chapitre 8 :** Toutes les hypothèses et tous les résultats des simulations numériques liées à la partie expérimentale de la recherche sont présentés dans ce chapitre. Les chapitres 5 à 7 se réfèrent souvent à des résultats de simulations numériques contenus dans ce chapitre.
- Chapitre 9 :** Il fait encore partie de la partie expérimentale de la recherche. Il contient une réexploitation de certains résultats des essais en vraie grandeur de routes soumises à des gels et dégels, essais réalisés de 1975 à 1985 dans l'installation d'essai en vraie grandeur du Laboratoire de mécanique des sols de l'EPFL. Les mesures ré-exploitées sont surtout celles relatives aux

déformations dans et sous les chaussées d'essais, ceci dans le but de tenter de déterminer des modules résilients.

Chapitre 10 : Avec ce chapitre, débute la partie consacrée aux applications pratiques possibles de la recherche. Le chapitre 10 est dédié à celles vouées au dimensionnement des routes et voies ferrées. C'est un chapitre important car la recherche se fait en partie sous mandat de l'Office fédéral des routes.

Chapitre 11 : Ce chapitre est consacré à une application un peu particulière des résultats de la recherche, à savoir la formation des pergélisols alpins et à leur fonte par réchauffement du climat.

Chapitre 12 : C'est le chapitre de conclusion. Il permet de tirer un bilan général de la recherche et de faire quelques digressions presque philosophiques ...

2

Etat des connaissances actuelles

2.1 Historique

2.1.1 Les premiers temps

Les recherches en matière de gel, d'abord à l'étranger puis en Suisse ont surtout concerné les phénomènes associés au gel proprement dit : succion engendrée par le gel du sol, formation des lentilles de glace et gonflement.

La première approche théorique du phénomène de la succion dans les sols non saturés a été présentée par Buckingham (1907), un ingénieur agronome américain; il faut noter à ce propos que presque tous les premiers développements dans le domaine des milieux non saturés sont dus à des ingénieurs agronomes. Les deux premiers chercheurs qui aient correctement démontré et expliqué, par des essais en laboratoires, le phénomène de la migration de l'eau vers le front de gel et la formation des lentilles de glace dans les sols fins sont : l'américain Taber (1929, 1930) et le suédois Beskow (1935).

En Europe et notamment en Suisse, les travaux de Taber et Beskow furent révélés aux ingénieurs civils après la deuxième guerre mondiale, notamment par la thèse et le livre de Ruckli (1943, 1950). Cette thèse apportait des notions nouvelles aux ingénieurs routiers et une interprétation des idées de Taber. À la différence de Taber, Ruckli ne connaissait pas les travaux de Buckingham, de Richards (1932) et de Shofield (1935) sur le potentiel capillaire et l'écoulement dans les sols non saturés; ce qui montre la frontière étanche qui existait entre les travaux des agronomes et les recherches dans le domaine de la géotechnique routière. Ruckli assimile, par exemple, les lentilles de glace à des puits hydrodynamiques, ce qui est très juste, mais il considère le sol adjacent comme un milieu saturé avec une conductivité hydraulique et une force d'aspiration constante, ce qui est faux.

2.1.2 La maturité

Par la suite de nombreux chercheurs comme E. E. Miller (1956), R.D. Miller (1960, 1963, 1973, 1978), Penner (1957, 1963, 1977), Takagi (1965), Williams (1966, 1967, 1976, 1977) et Aguirre-Puente & Fremond (1975) contribuèrent à améliorer la compréhension du phénomène de la formation des lentilles de glace dans les sols gélifs. Ce phénomène est complexe car il se produit dans une région d'un sol qui a été fortement désaturé par transformation de l'eau interstitielle en cristaux de glace. Les succions capillaires engendrées par cette désaturation provoquent une aspiration de l'eau contenue dans le sol voisin non gelé, eau qui gèle sous la forme de lentilles de glace. Comme l'isotherme 0° C se déplace dans le sol, ce phénomène se répète et suit la progression de cette isotherme. On doit notamment à R.D. Miller (1972) la théorie du gonflement secondaire qui sera discutée plus loin.

2.1.3 La Suisse

En Suisse, après la thèse de Ruckli, les recherches en matière de gel furent surtout le fait de l'*Institut für Geotechnik* de l'École polytechnique fédérale de Zurich (à l'époque, une section de la *Versuchsanstalt für Wasserbau und Erdbau*) sous la direction du Professeur F. Balduzzi (1959) et du Laboratoire de mécanique des sols de l'École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL) (dénommé à l'époque : Laboratoire de géotechnique).

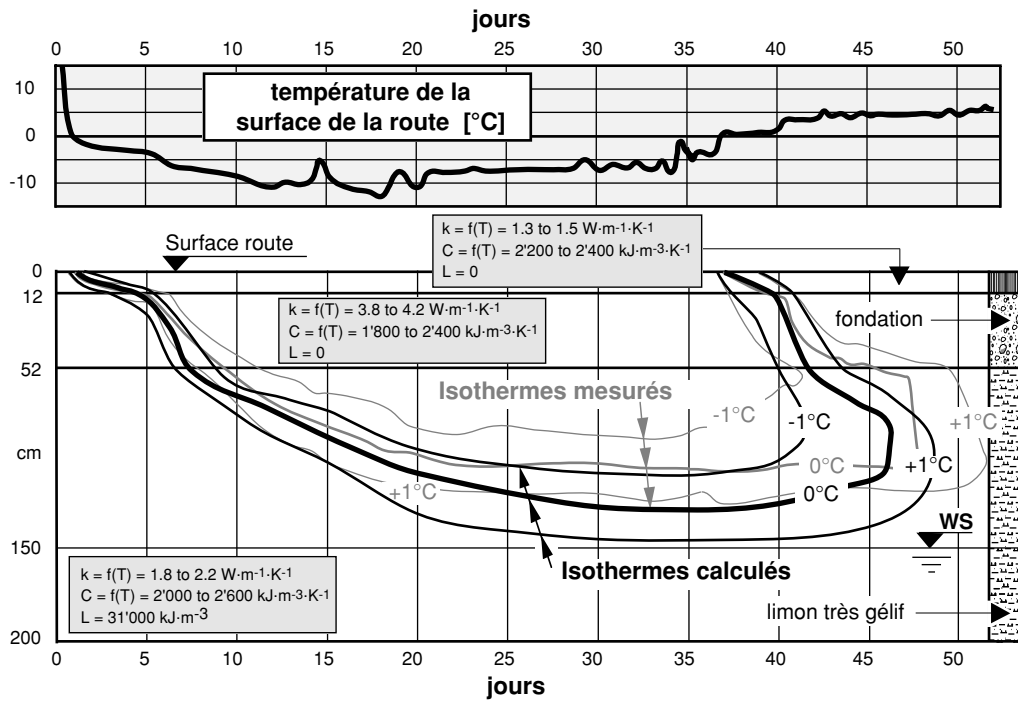
Dès 1975 environ, c'est surtout le Laboratoire de mécanique des sols de l'EPFL qui a conduit, en Suisse, les recherches en matière de gel, notamment grâce à une installation d'essais en vraie grandeur construite sur le nouveau site de l'EPFL à Écublens. Avec cette installation, les hivers les plus rudes peuvent être simulés, sur des routes en vraie grandeur, pendant toute l'année (Dysli & Pfister 1982, Dysli & Bourdeau 1984, Lefebvre & Dysli 1988, Dysli 1993).

2.1.4 Le dégel

Curieusement, le dégel n'a fait l'objet que de rares études alors qu'il est la cause des dégâts aux constructions les plus importants. Notamment, le processus même du dégel était fort mal connu avant la recherche entreprise par le Laboratoire de mécanique des sols de l'EPFL (Dysli 1991a, Dysli 1993).

De nombreuses mesures in situ et dans la fosse d'essais en vraie grandeur du Laboratoire de mécanique des sols de l'EPFL (Dysli & Pfister 1982, Dysli & Bourdeau 1984, Lefebvre & Dysli 1988, Dysli 1991a) ont montré que, à la fermeture brutale de l'isotherme 0° C, correspondait une tout aussi brutale diminution de la portance de l'infrastructure gélive au sommet de laquelle s'étaient formées des lentilles de glace. Cela semble signifier que la fonte de ces lentilles est très rapide. Pourquoi ? Une des raisons principales est certainement la chaleur latente de fusion de la glace qui doit être entièrement « consommée » avant la fonte.

La simulation numérique au moyen de la très classique équation de la diffusion thermique de Fourier (Dysli 1991a par ex.) permet d'obtenir une allure de l'isotherme 0° C proche de celle obtenue par les mesures en vraie grandeur (fig. 2-1). La fermeture de cette isotherme n'est cependant pas aussi brutale que celle montrée par les mesures. En outre, cette simulation ne permet que très indirectement d'apprécier le phénomène de la fonte des lentilles cause de la diminution de la résistance au cisaillement de l'infrastructure.



2-1 Simulation numérique de la fermeture brutale de l'isotherme 0° C lors du dégel sous une route.

k = conductivité thermique, C = capacité thermique, L = chaleur latente de fusion de la glace.

(adapté de Dysli, 1998)

2.1.5 Les pergélisols alpins

Il est intéressant de noter que le phénomène de la perte de résistance au dégel des sols gélifs ne concerne pas seulement les routes et les voies ferrées. Comme l'a montré Dysli (1998), la fonte des pergélisols alpins due au réchauffement du climat est conduite par exactement le même phénomène qui peut détruire les routes lors du dégel saisonnier. Elle peut engendrer des laves torrentielles aux effets destructeurs.

Les pergélisols ne sont pas seulement propres aux régions arctiques et antarctiques du globe; on les rencontre aussi en haute montagne où, il y a quelques décennies, les phénomènes qui leur sont associés ne présentaient d'intérêt que pour quelques géologues ou géographes.

Ces trente dernières années, le fort développement touristique de certaines régions de montagne des zones tempérées du globe a conduit les promoteurs des stations de ski à construire des remontées mécaniques toujours plus haut. Leurs ingénieurs civils se sont vus ainsi confrontés à des problèmes de pergélisols.

Le meilleur état des connaissances actuelles en matière de pergélisols alpins, et surtout de glaciers rocheux, se trouve probablement dans les livres de Barsch (1996) et de French (1996), et dans la publication de Harberli *et al.* (2006).

2.2 Physique de la glace

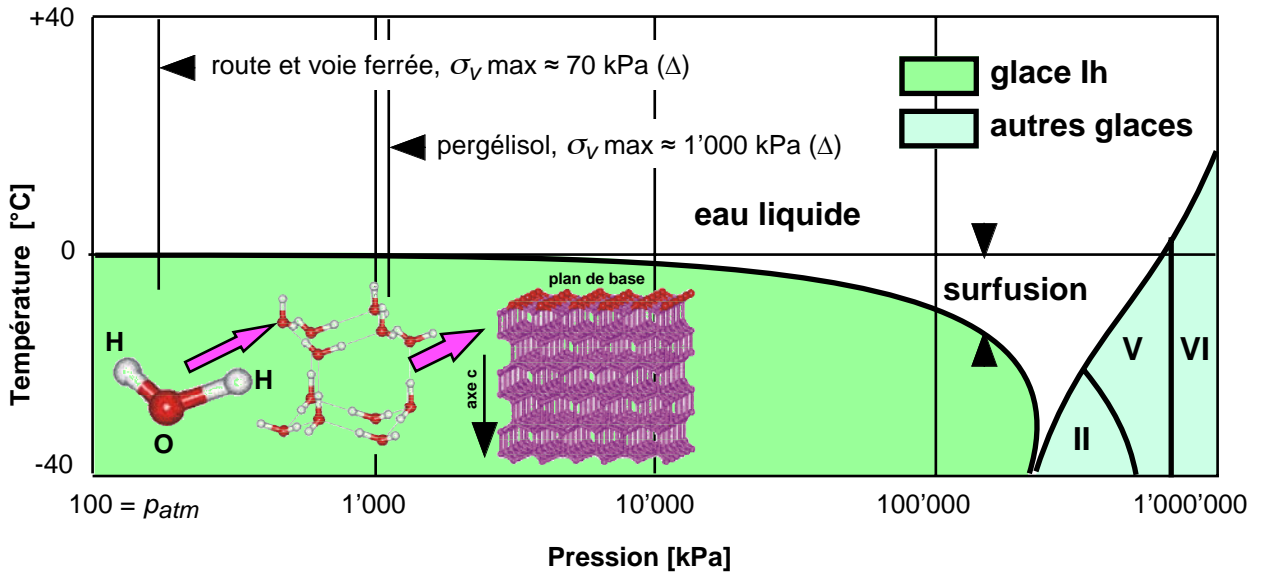
La glace contenue dans un sol se forme par refroidissement du système sol-eau. L'eau, sous forme liquide, est formée de molécules H_2O très mobiles qui peuvent se réorienter de façon indépendante. À un instant donné, une molécule d'eau est cependant toujours entourée de quatre molécules voisines. À la pression atmosphérique, si on abaisse la température en dessous de $0^\circ C$, l'eau liquide se transforme en glace : sa structure se fige alors et s'étend à grande distance. Sa forme est hexagonale à un seul niveau de symétrie. La glace est donc un solide cristallin qui a un volume spécifique plus élevé que celui de l'eau non gelée, avec une masse volumique de $0,92 t \cdot m^{-3}$. En fonction de la température et de la pression, la glace peut prendre différentes formes qui sont décrites par la figure 2-2 qui est un fragment du diagramme de Clausius-Clapeyron (Clapeyron, 1834) avec, en plus, les diverses formes de la glace qui sont avant tout fonction de la pression à laquelle elle est soumise. En fait, comme on le voit sur la figure 2-2, pour tous les phénomènes qui sont traités dans cette recherche et au niveau microscopique, la glace rencontrée est du seul type Ih (h pour hexagonal). Pour l'étude du phénomène du dégel dans les sols, le mode de cristallisation de la glace n'intervient donc pas.

Pour de l'eau contenue dans un sol fin, le gel n'est cependant pas instantané. Ce processus est décrit par la figure 2-3. Il y a d'abord une période de surfusionⁱ instable de l'eau interstitielle, à savoir une période où l'eau est à une température inférieure à 0° , mais est temporairement maintenue sous forme liquide par la tension superficielle. Cet équilibre instable est ensuite brutalement rompu et le gel de l'eau libre peut commencer à une température T_f qui est, dans les sols, légèrement inférieure à $0^\circ C$. Pour des sols grossiers sans cohésion le ΔT de la figure 2-3 est très faible. Par contre, pour les sols fins, cette valeur peut être inférieure à $-5^\circ C$. La vitesse de la congélation est freinée par la chaleur latente jusqu'à ce que presque toute l'eau liée soit gelée. Ce moment détermine la température T_e qui est, dans les sols fins, d'environ $-70^\circ C$.

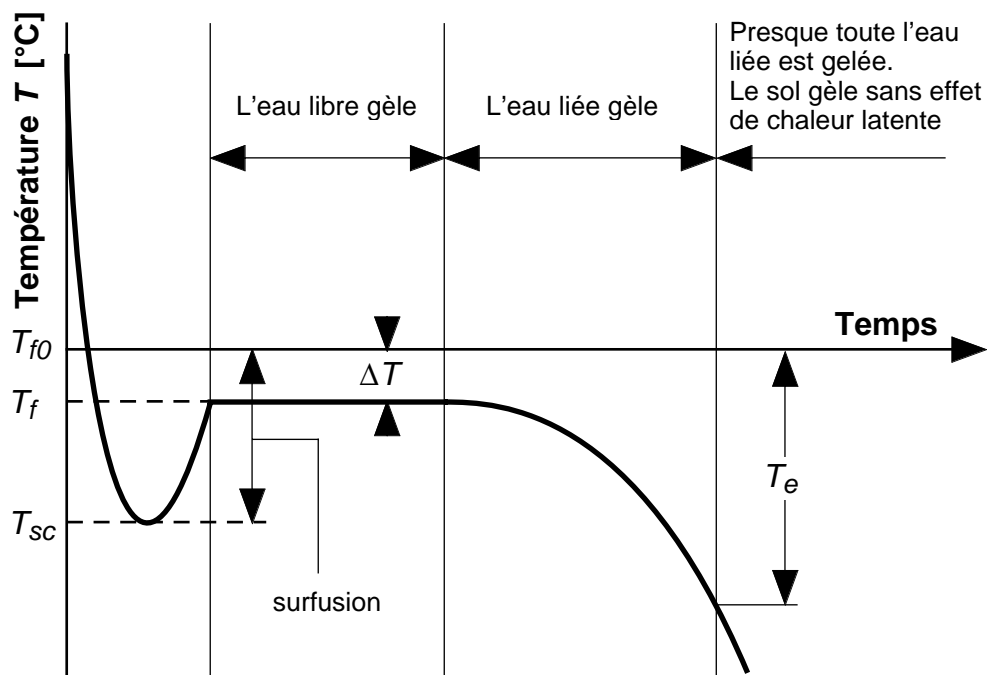
Au niveau macroscopique, dans un sol, la glace peut prendre diverses formes :

- Si le gradient thermique est élevé, la cristallisation est rapide et la glace interstitielle peut prendre la forme d'aiguilles. De telles aiguilles ont été photographiées par endoscopie durant les essais qui font l'objet de ce rapport. Elles peuvent sortir de la surface du sol.
- Pour un gradient plus faible et correspondant à ceux rencontrés généralement sous la surface du sol, la glace peut prendre au moins les trois formes décrites par la figure 2-4 adaptée de Dysli (1991a) : La forme (a) se produit par un gel diffus, sans migration d'eau ; elle est caractéristique des sols non gélifs. Les lentilles de glace (b) sont caractéristiques des sols gélifs. Des formes cellulaires avec formation de coins de glace (c) sont surtout caractéristiques des pergélisols non alpins.

ⁱ Il est intéressant de noter que le terme anglais correspondant « supercooling » dit un peu le contraire du terme français !



2-2 Partie du diagramme des types de glace



T_{f0} = température de congélation de l'eau pure (0° C)

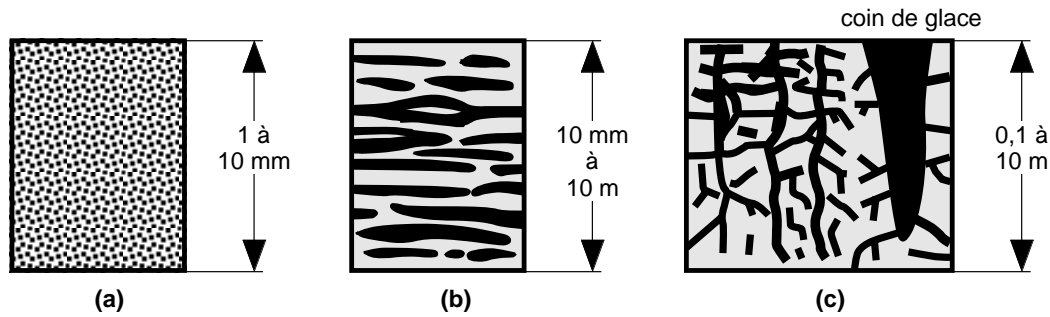
T_f = température de congélation de l'eau du sol (point de congélation)

T_{sc} = température de congélation de l'eau en état instable de surfusion

ΔT = saut de température du point de congélation

T_e = température à laquelle presque toute l'eau liée est gelée

2-3 Gel de l'eau dans un sol



2-4 Trois formes macroscopiques de la glace dans les sols

La glace d'un glacier (sédimentaire) est une forme massive de la glace du type Ih. Celle des lentilles des sols gelés (ségréguée) est aussi du type Ih, mais, dans ce cas, l'orientation des cristaux est différente.

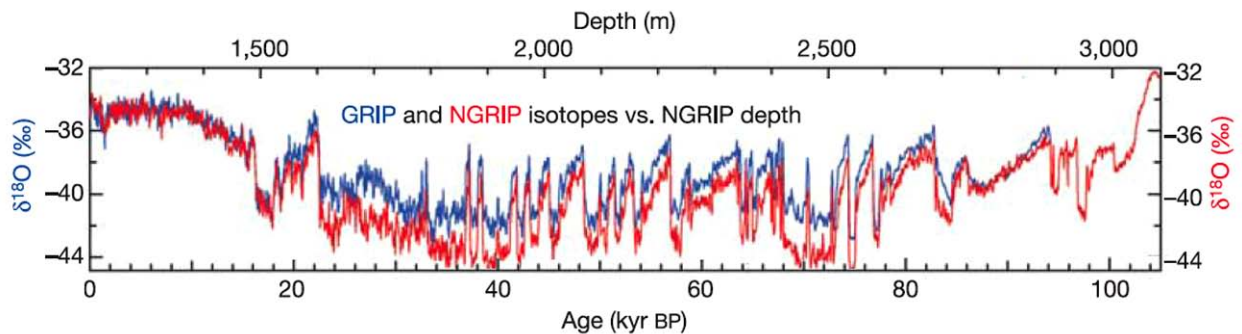
Si les caractéristiques microscopiques de la glace qui nous intéressent ne varient pas, elle peut contenir divers *isotopes* (atomes d'un même élément avec un nombre de neutrons différent et donc une masse différente) de l'eau qui permettent de différencier, certes difficilement, ses formes macroscopiques.

Parmi ces isotopes, deux sont particulièrement intéressants :

- Le ^{18}O , un isotope stable, à savoir non radioactif, de l'oxygène qui contient 8 protons et 10 neutrons (d'où le nombre de 18 qui caractérise cet isotope), alors que l'oxygène « normal » ^{16}O n'en contient que 8 neutrons. L'oxygène est constitué d' ^{16}O (99,76%), d' ^{18}O (0,20%) et de très peu d' ^{17}O . L' ^{18}O étant plus lourd que l' ^{16}O , il est possible de les séparer par des procédés chimiques ou biologiques. Seule la comparaison entre l' ^{18}O et l' ^{16}O est intéressante ; on utilise pour cela le rapport $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ de la glace examinée avec celui de l'eau de mer dénommé $(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{SMOW}}$ (SMOW = Standard Mean Ocean Water). La différence par rapport à l'eau de mer (SMOW) est exprimée en ‰ par $\delta^{18}\text{O} = 1000((^{18}\text{O}/^{16}\text{O})/(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{SMOW}} - 1)$. Lors d'une chute de neige, lorsque la vapeur d'eau commence à se condenser, l' ^{18}O est le premier à rejoindre le cristal de glace. Plus l'air devient froid moins il y a d' ^{18}O . Ainsi et comme Dansgaard *et al.* l'ont montré déjà en 1973, le $\delta^{18}\text{O}$ peut être corrélé avec la température de l'air en le mesurant sur une neige dont la température de formation est connue avec précision. Le $\delta^{18}\text{O}$ est un thermomètre de la période de formation de la glace (plutôt de la neige qui s'est ensuite transformée en glace) et il est utilisé pour évaluer les températures de l'air avant sa mesure par l'homme. Par des forages dans la glace, on a ainsi pu évaluer l'évolution des températures de l'air de ces 100'000 dernières années au Groenland (fig 2-5) et de ces 400'000 dernières années en Antarctique.
- Le deutérium (D), un isotope de l'hydrogène (H) qui possède un proton et un neutron alors que l'hydrogène ne contient qu'un seul proton. Le deutérium est plus lourd que l'hydrogène. Dans la nature, on le trouve à raison de 0,015% par rapport à l'hydrogène. Pour le deutérium, on utilise le rapport en ‰ $\delta\text{D} = 1000((\text{D}/\text{H})/(\text{D}/\text{H})_{\text{SMOW}} - 1)$.

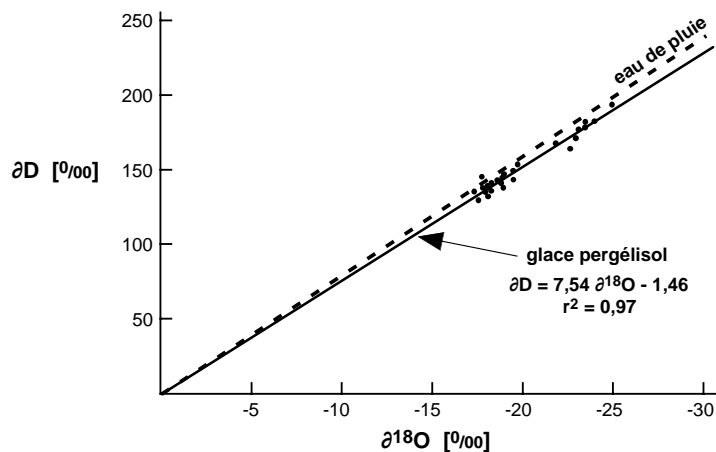
Pour tenter de différencier les origines de différentes glaces, on peut utiliser des corrélations entre le $\delta^{18}\text{O}$ et le δD , corrélations que l'on compare avec celle, standard, de l'eau de pluie. La

figure 2-6 tirée de Ingolfsson & Loktantz (2003), est un exemple de ces corrélations pour de la glace d'un pergélisol de Sibérie. Cette figure montre qu'il est difficile de faire la différence entre une glace de glacier et une glace formée par la percolation de l'eau de pluie !



2-5 Exemple de mesure du $\delta^{18}\text{O}$ - Forages GRIP et NGRIP (Groenland)

Andersen *et al.* (2004)



2-6 Exemple de corrélations $\delta^{18}\text{O} / \delta\text{D}$

Adapté de Ingolfsson & Loktantz (2003)

Un autre isotope de l'eau, cette fois radioactif, le tritium (^3H) est utilisé pour dater les récentes venues d'eau dans les pergélisols, sa fréquence (demi-vie) étant d'environ 12 ans.

D'autres éléments chimiques permettent de dater l'âge de la glace des pergélisols. Ce sont, et par exemple :

- Les radionucléides provenant des essais de bombes nucléaires qui ont été interrompus en 19** (^{210}Pb , ^{238}U , ^3H , ^{36}Cl , ^{35}S , etc.), (Harberli *et al.*, 2006).
- La matière organique (pollen, spores, mousse) qui peut être datée à quelque 100 ans près par le ^{14}C ; par exemple, 3 mètres sous la couche active du glacier rocheux de Mürtel-Corvatsch, une telle datation a donné un âge de 2250 ± 100 ans BP (Haeberli *et al.*, 1999).
- Diverses impuretés provenant notamment des roches environnantes (Baltensperger *et al.*, 1990).

Dans la glace, on trouve de minuscules bulles d'air dont l'analyse permet de faire certains constats intéressants. En particulier, ces analyses ont montré que la quantité de dioxyde de carbone et de méthane était plus faible pendant les périodes glaciaires que pendant les périodes chaudes (Masson-Delmotte & Augustin, 2002).

2.3 Gel des sols

2.3.1 Film actif et frange de gel

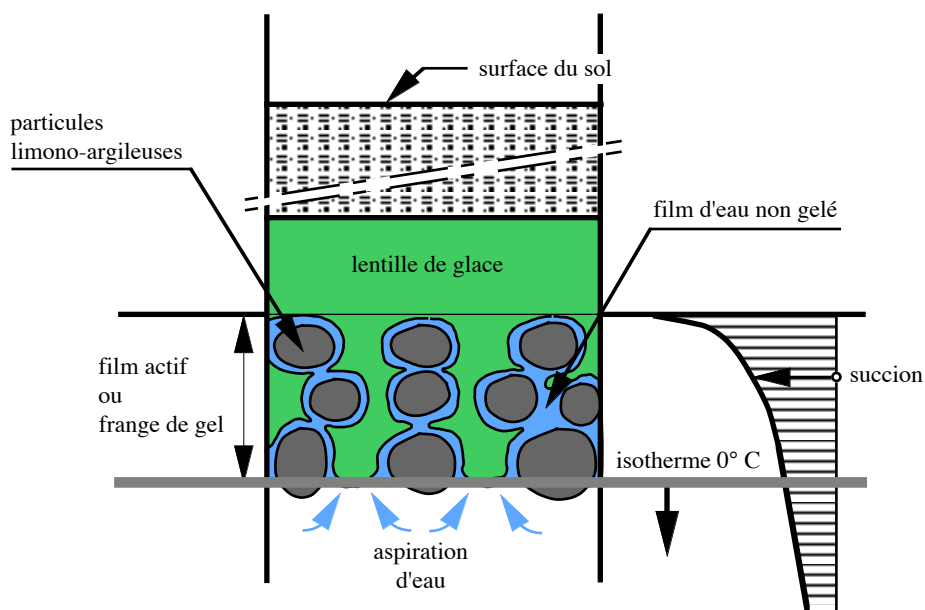
Taber (1930), puis Beskow (1935) ont montré que la croissance des lentilles de glace était possible, dans certains sols fins, par le fait qu'elles sont en contact avec un mince film d'eau continu, dénommé film actif, similaire à une couche adsorbée. Ils ont aussi observé que la dimension des grains et la durée du gel n'étaient pas les seuls facteurs qui déterminent le gonflement d'un sol; l'importance de facteurs tels que la texture minéralogique des particules, la vitesse du refroidissement et la contrainte s'exerçant sur les lentilles ne leur avaient pas échappé. Les principes du modèle de Taber sont toujours considérés comme valables par la plupart des spécialistes du gel dans les sols. Ils ont été confirmés par de nombreux essais sur différents types de matériaux fins et avec différents liquides autres que l'eau. En outre, ils sont en accord avec les lois de la physique moléculaire et de la thermodynamique.

2.3.2 Formation

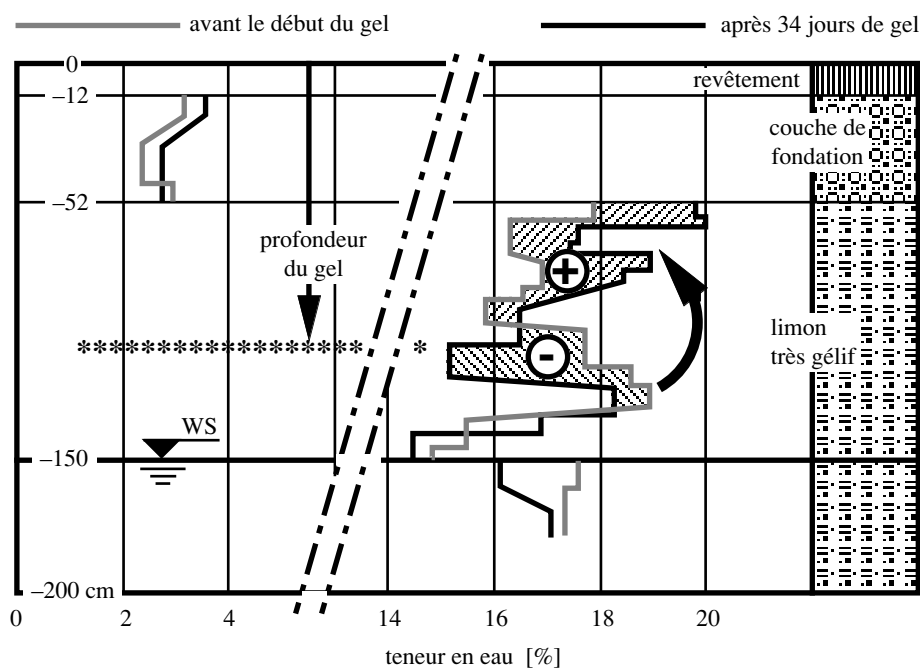
Lorsqu'une molécule d'eau à la surface du film est absorbée par un cristal de glace, elle est immédiatement remplacée au-dessous par une autre molécule d'eau provenant du sol adjacent non saturé. La teneur en eau du sol juste sous le film diminue donc ce qui induit une augmentation de la succion capillaire. Cette succion fait que l'eau juste au-dessous de la lentille gèle à une température un peu inférieure à 0° C. L'épaisseur du film actif dénommé aussi frange de gel peut ainsi être délimité par la surface inférieure de la lentille et l'isotherme 0° C (fig. 2-7). Les molécules d'eau placées plus bas sont ainsi aspirées vers le front de gel. Cette diminution de la teneur en eau est démontrée par, entre autres, les mesures de teneur en eau entreprises lors des essais de gel en vraie grandeur d'une route, essais réalisés par le LMS (Dysli & Pfister, 1980) et dont un exemple fait l'objet de la figure 2-8.

Cette migration de l'eau va cependant être contrariée par le fait que la conductivité hydraulique d'un sol non saturé diminue en même temps que sa teneur en eau. Cette antinomie entre les variations de la succion capillaire et celles de la conductivité hydraulique d'un sol permet d'expliquer toutes les particularités liées au phénomène de la gélivité des sols.

Le mode de formation et la répartition des lentilles de glace dans un sol ne peut être démontré par le concept simplifié du film actif exposé plus haut ou par le modèle graphique du comportement au gel proposé par Dysli (1991a). Comment expliquer pourquoi les lentilles de glace se répartissent, dans un sol gélif, sous forme de plusieurs couches subhorizontales, d'épaisseur et d'expansion latérale limitées?



2-7 Lentille de glace et film actif
(tiré de Dysli , 1991a)



2-8 Variation de la teneur en eau sous le front de gel
(tiré de Dysli , 1991a)

L'horizontalité des niveaux de glace s'explique par l'horizontalité de l'isotherme 0° C et par l'homogénéité de la conduction thermique du sol. Des anomalies dans cette horizontalité des lentilles sont souvent la conséquence d'hétérogénéités dans la conductivité thermique du sol. Elles se rencontrent, par exemple, dans les environs de gros grains plus conducteurs que la matrice fine. Miller (1972) a proposé une démonstration pour expliquer ce mode de formation ; elle sera discutée au § 2.7.3.

2.3.3 Pression de gonflement

La formation des lentilles de glace engendre des pressions de gonflement importantes, pressions qui dépendent, pour un sol donné, de la vitesse de formation des lentilles.

Le résultat du gonflement est un travail qui consomme de l'énergie, énergie qui doit être prise quelque part et qui provient de la chaleur latente de fusion des molécules d'eau. En fournissant une énergie comme une pression au-dessus de la zone de formation des lentilles de glace, il doit être possible d'arrêter la formation des lentilles de glace; une pression limite de gonflement existe en effet et elle a été évaluée par Radd et Oertle (1973) à :

$$p_{glim} = -1140 \cdot T \quad (2-1)$$

avec : p_{glim} [kPa] = pression limite de gonflement à une profondeur donnée

T [° C] = température à cette profondeur.

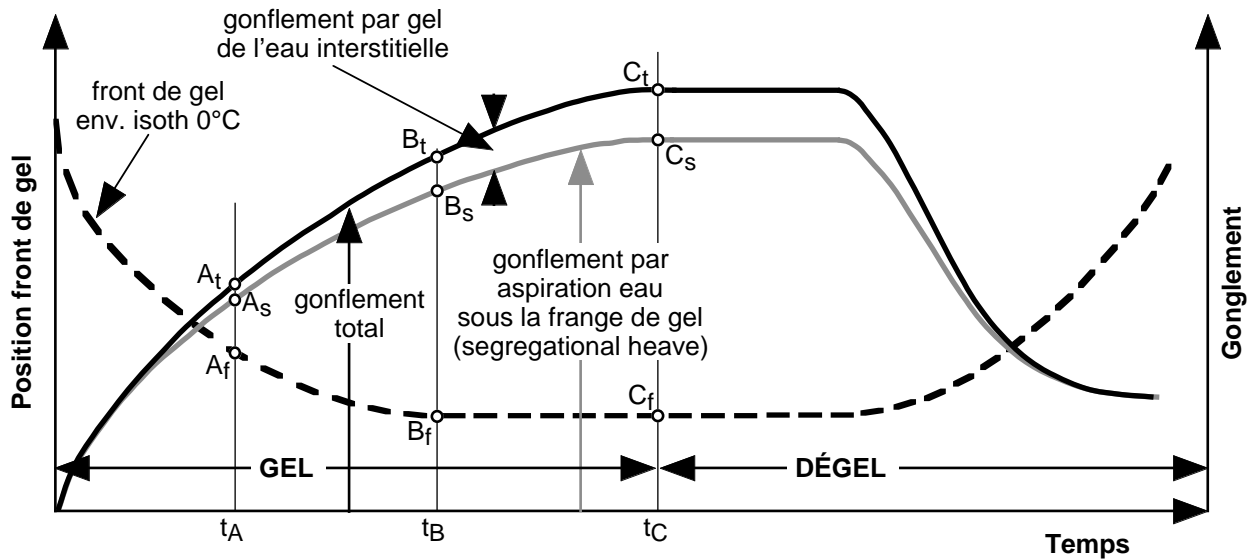
Cette pression limite est très élevée; pour une température de -1° C elle devrait être, selon la relation (2-1), de 1140 kPa. Dans un pergélisol d'une masse volumique de $2 \text{ t}\cdot\text{m}^{-3}$, cela signifierait qu'il n'y a plus de croissance de lentilles de glace au-delà d'une profondeur de 60 m, ceci en admettant que la température soit à cette profondeur de -1° C.

2.3.4 Vitesse de gonflement

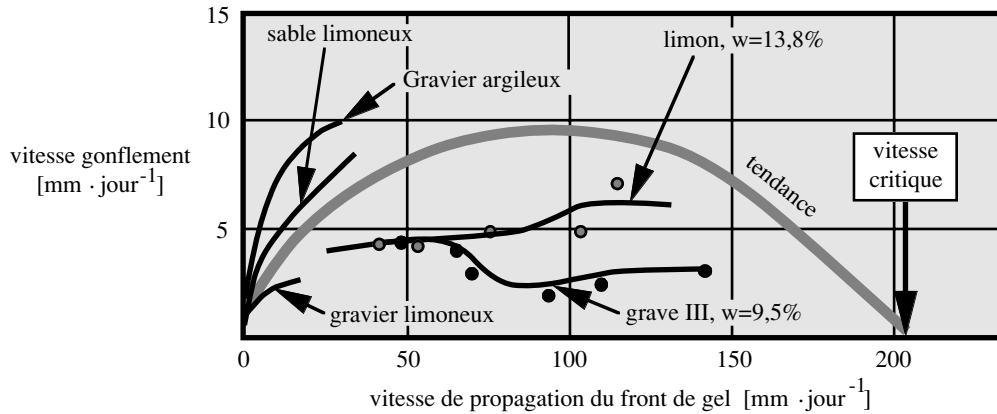
La vitesse de gonflement, soit la vitesse de formation et de croissance des cristaux de glace et, surtout pour les sols gélifs, celles des lentilles de glace par l'eau aspirée vers le front de gel, est fonction de très nombreux paramètres dont les plus importants sont la granulométrie, la minéralogie du sol, sa masse volumique qui peut être caractérisée par son indice de vide, sa teneur en eau et la vitesse de propagation du front de gel (ou la vitesse d'extraction de la chaleur). Cette dernière a une influence déterminante sur le processus de formation des lentilles de glace et donc sur la vitesse de gonflement. Cet effet de la vitesse du front de gel sur le gonflement est schématisé par la figure 2-9. On y voit notamment que la vitesse de gonflement s'annule en même temps que la vitesse de pénétration du front de gel. Les points A, B et C seront utilisés par la suite. Les tassements du dégel sont aussi représentés sur cette figure, mais ils ne seront pas discutés dans ce paragraphe.

Quelques exemples de mesure de l'effet de la vitesse de propagation du front de gel sur la vitesse de gonflement sont donnés sur la figure 2-10.

L'allure générale de cette relation est donnée sur cette même figure par la courbe tendance en gris; elle montre que la vitesse de gonflement croît tout d'abord avec la vitesse de propagation du front de gel, se stabilise, puis diminue jusqu'à devenir nulle. Cette vitesse limite, où les lentilles de glace n'ont plus le temps de se former, est dénommée *vitesse critique*. Au-delà de cette vitesse, seuls des cristaux de glace disséminés dans la matrice solide peuvent se former. La vitesse critique augmente avec la proportion des particules fines du sol, soit lorsque la perméabilité du sol diminue.



2-9 Effet de la vitesse du front de gel sur le gonflement



2-10 Exemples de l'influence de la vitesse de propagation du front de gel (tiré de Dysli, 1991a)

L'indice de vide a un effet sur la vitesse de gonflement. Les nombreux essais de gonflement au gel entrepris avec l'ancienne procédure suisse, montrent que le gonflement maximum correspond souvent et approximativement à la teneur en eau de l'optimum Proctor w_{opt} . La quantification du gonflement des sols, lors de leur gel, peut tout d'abord être abordée par une très simple *approche hydraulique* du phénomène qui utilise la relation de Darcy dans la frange de gel. Cette approche est illustrée par la figure 2-11 qui définit aussi les paramètres utilisés. Dans la frange de gel, l'équation de Darcy peut s'écrire :

$$v_w = \frac{\Delta s}{d} \cdot k_D = \left(\frac{\Delta s}{T_s} \cdot k_D \right) \cdot \text{grad}T \tag{2-2}$$

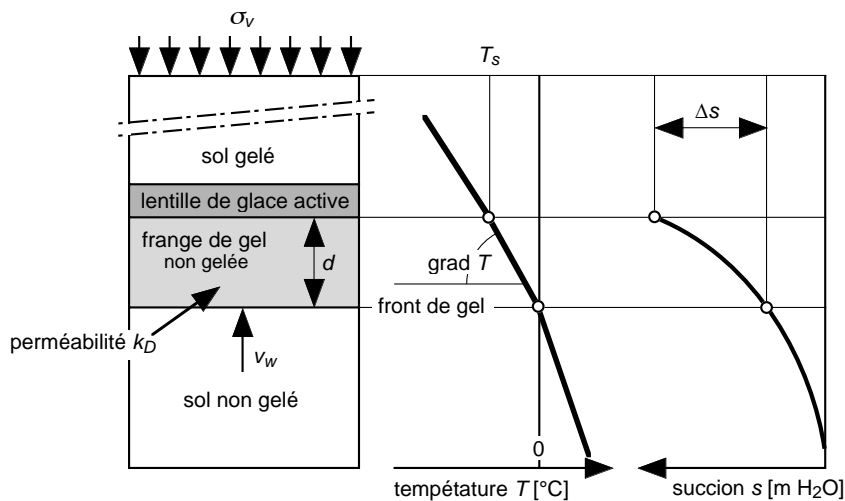
où : v_w = vitesse de gonflement dû à l'eau aspirée vers le front de gel
 d = épaisseur de la frange de gel
 k_D = perméabilité
 Δs = part de la succion dans la frange de gel (voir fig. 2-11)
 T_s = température au-dessus de la frange de gel
 $\text{grad}T$ = gradient de la température dans la frange de gel.

Konrad et Morgenstern (1981) ont dénommé le terme de l'équation (2-2) entre parenthèses : SP = Segregation Potential = potentiel de ségrégation [$\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$] donné en [$10^{-5} \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$], ce qui permet d'écrire cette équation sous la forme suivante :

$$v_w = SP \cdot \text{grad}T \quad (2-3)$$

Dans les sols très gélifs, si l'on néglige le gonflement dû à la cristallisation de l'eau interstitielle qui est faible relativement à celui dû de l'eau aspirée vers le front de gel, on peut admettre que :

$$v_{\text{gonfl}} \approx v_w.$$



2-11 Paramètres de l'approche hydraulique

Le potentiel de ségrégation varie fortement en fonction des caractéristiques du sol. Konrad et d'autres auteurs ont cependant réalisé de nombreux essais qui permettent d'évaluer ce potentiel en fonction de quelques caractéristiques standards (Konrad 1988, Seto & Konrad 1994, Konrad & Nixon 1994, Konrad, 1999). Selon Konrad, SP est fonction des caractéristiques du sol comme : la granulométrie, la minéralogie, l'indice de vide, la masse volumique et l'OCR (Taber, 1929 avait déjà démontré la relation entre l'OCR et le gonflement) et de la contrainte verticale appliquée au-dessus de la frange de gel. Cette contrainte agit sur v_w par réduction de la perméabilité sous la frange de gel et sur la succion dans cette même zone.

La vitesse de propagation du front de gel, qui a une influence déterminante sur la vitesse de gonflement, est directement liée à la vitesse d'extraction de la chaleur qu'elle soit positive (gel) ou négative (dégel). Une *approche énergétique* est donc intéressante. On peut utiliser pour cela la relation de Loch (1979). Elle est la suivante :

$$q = v_w \cdot L_i + \theta_0 \cdot L_i \cdot dz_f/dt \quad (2-4)$$

où : q = vitesse d'extraction de la chaleur [$W \cdot m^{-2}$]
 v_w = vitesse de l'eau aspirée vers le front de gel [$m \cdot s^{-1}$]
 L_i = chaleur latente volumique de congélation de l'eau [$W \cdot s \cdot m^{-3}$]
 θ_0 = teneur en eau volumique initiale [-]
 dz_f/dt = vitesse de propagation du front de gel [$m \cdot s^{-1}$].

Le premier terme $v_w \cdot L_i$ du deuxième membre de l'équation (2-4) décrit la puissance utilisée par l'aspiration de l'eau du sol non gelé vers la frange de gel. Le deuxième, $\theta \cdot L_i \cdot dz_f/dt$, décrit la puissance nécessaire au déplacement du front de gel.

En sachant que $q = k_f \cdot \text{grad } T$, avec k_f [$W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$] la conductivité thermique dans la frange de gel (sol non gelé en surfusion), et que la vitesse de gonflement s'exprime très simplement par l'équation (2-5) (Dysli, 1991a) qui néglige le léger accroissement de volume dû au gel de l'eau interstitielle,

$$v_{gonfl.} = (\rho_w/\rho_i) \cdot v_w \approx 1.1 \cdot v_w \quad (2-5)$$

l'équation (2-4) peut alors s'écrire dans un système à une dimension (le gradient est un vecteur) :

$$v_{gonfl} = 1,1 \left(\frac{k_f}{L_i} \cdot \text{grad}T - \theta_0 \cdot dz_f / dt \right) \quad (2-6)$$

Cette dernière forme est intéressante, car elle utilise des paramètres qui peuvent être déterminés en pratique : k_f , L , θ_0 voire dz_f/dt , et elle permet de démontrer l'importance de la vitesse de propagation du front de gel dz_f/dt sur la vitesse de gonflement. $v_{gonfl.}$ Pour que le gonflement s'annule, il faut que $(k_f/L_i)\text{grad}T = dz_f/dt$.

On peut enfin ajouter à l'équation (2-6) le léger accroissement de volume dû au gel de l'eau interstitielle ou sa diminution lors du dégel :

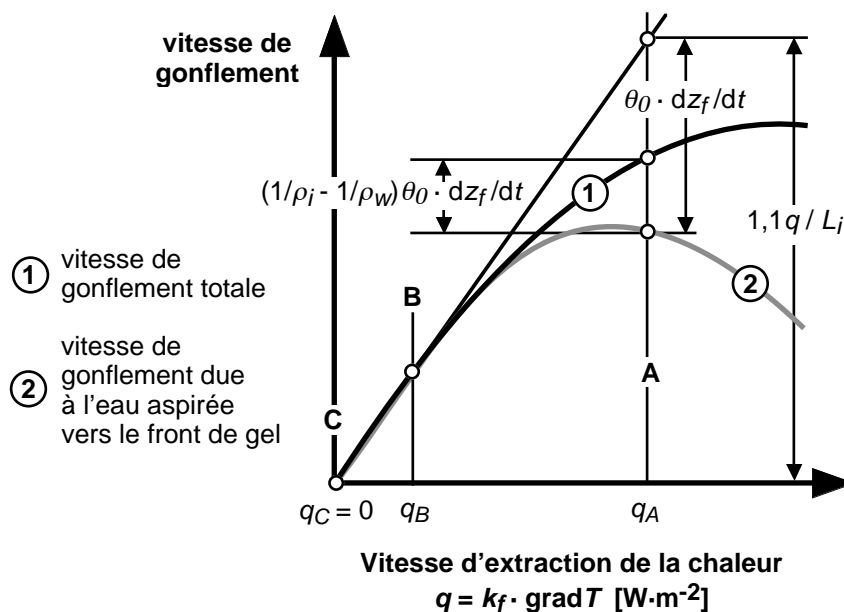
$$v_{gonfl} = 1,1 \left(\frac{k_f}{L_i} \cdot \text{grad}T - \theta_0 \cdot dz_f / dt \right) + \left(\left(\frac{1}{\rho_i} - \frac{1}{\rho_w} \right) \theta_0 \cdot dz_f / dt \right) \quad (2-7)$$

La relation (2-7) fait l'objet de la figure 2-12 qui ne montre toutefois pas une courbe intrinsèque, car les valeurs de la vitesse d'extraction de chaleur dépendent des conditions thermiques aux limites de la frange de gel. Celles choisies pour cette figure correspondent approximativement à un point de la fondation d'une route soumis à un gel et à un dégel saisonnier.

Analysons maintenant le comportement d'un sol gélif, au gel et au dégel, sur la base de l'équation (2-7) et sa représentation graphique de la figure 2-12. Les points A, B et C sont ceux de la figure 2-9 qui décrit les gonflements lors du gel en fonction du temps. Dans des conditions plus ou moins naturelles du gel d'un sol, au début du phénomène (point A), le puissant gradient thermique détermine une forte vitesse d'extraction de la chaleur q_A et aussi une forte vitesse de gonflement v_{gonfl} . A ce moment, la part de la vitesse de gonflement due au gel de l'eau interstitielle (dernier terme de l'équation (2-7)) est importante. Avant d'atteindre le point B le gel

est transitoire et la vitesse de migration de l'eau vers le front de gel modifie l'équilibre thermique dans le sol et absorbe de la chaleur latente.

Le gel et le gonflement se poursuivent jusqu'au point B de la figure 2-9. À ce moment, le front de gel devient stationnaire et une lentille de glace se forme. La vitesse de gonflement de l'eau interstitielle s'annule et, sur la figure 2-12, le point B se trouve sur l'asymptote de pente $1,1 \cdot L_i$. Le gonflement n'est alors plus dû qu'à l'eau aspirée sous le front de gel. Il se poursuit jusqu'à ce que les conditions thermiques aux limites se modifient et annulent la vitesse d'extraction de la chaleur q (point C de la figure 2-12). Au point B, il ne se forme qu'une seule lentille de glace. Pour qu'une deuxième lentille se forme, il faut que la vitesse d'extraction de la chaleur q_B augmente.

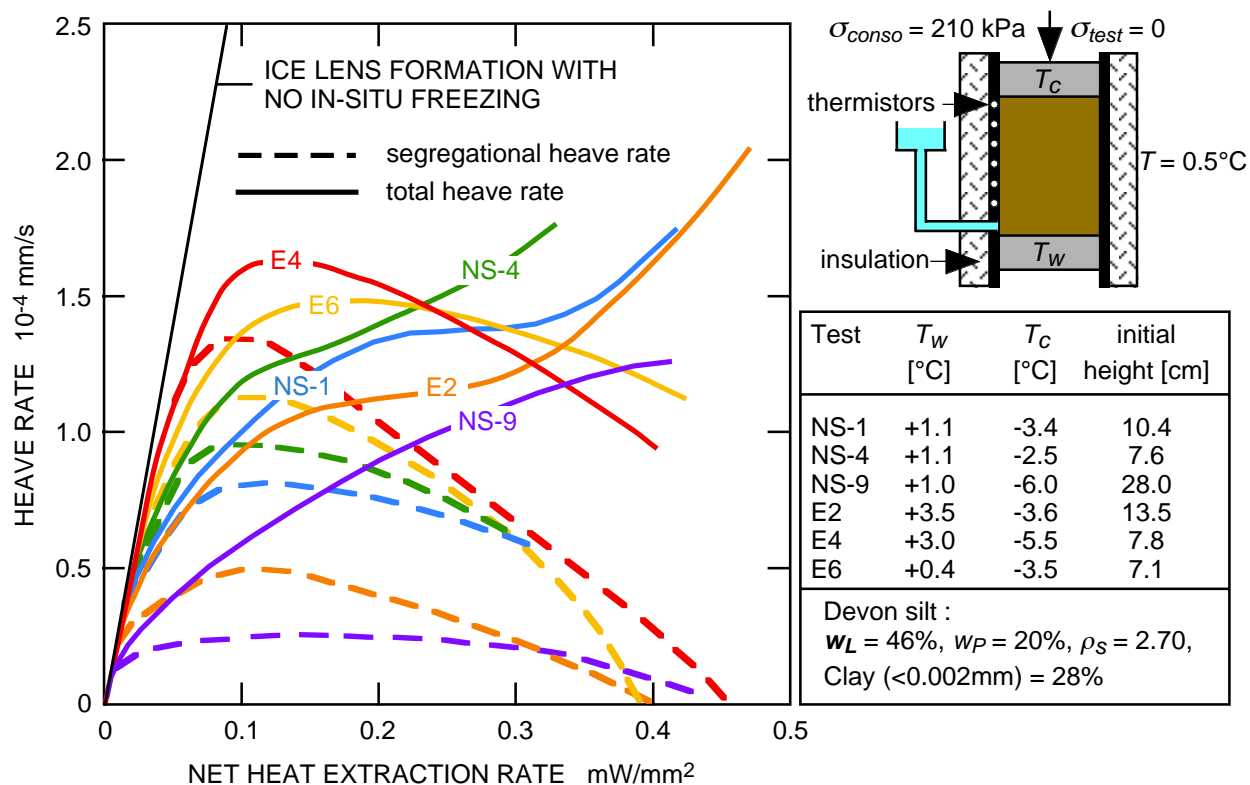


2-12 Influence de la vitesse d'extraction de la chaleur sur la vitesse de gonflement / tassement

Konrad (1987) a réalisé plusieurs essais sur un limon très gélif pour démontrer le rôle de la vitesse d'extraction de chaleur sur la vitesse de gonflement. Leurs résultats sont d'un grand intérêt et, certains d'entre eux font l'objet de la figure 2-13. Sur cette figure, le terme « segregational » signifie que la vitesse de gonflement est uniquement celle produite par l'eau aspirée vers le front de gel. On constate notamment sur cette figure que, pour le même limon gélif, les courbes varient fortement en fonction des conditions thermiques aux limites de l'éprouvette.

2.3.5 Le modèle graphique

Pour tenter d'expliquer le phénomène complexe de la gélivité des sols, Dysli, 1991a a utilisé un modèle graphique composé de trois diagrammes : celui donnant la teneur en eau non gelée en fonction de la température, celui donnant la succion capillaire en fonction de la teneur en eau et celui donnant la conductivité hydraulique en fonction de la teneur en eau (fig. 2-14).



2-13 Vitesse de gonflement en fonction de la vitesse d'extraction de chaleur

Adapté de Konrad (1987)

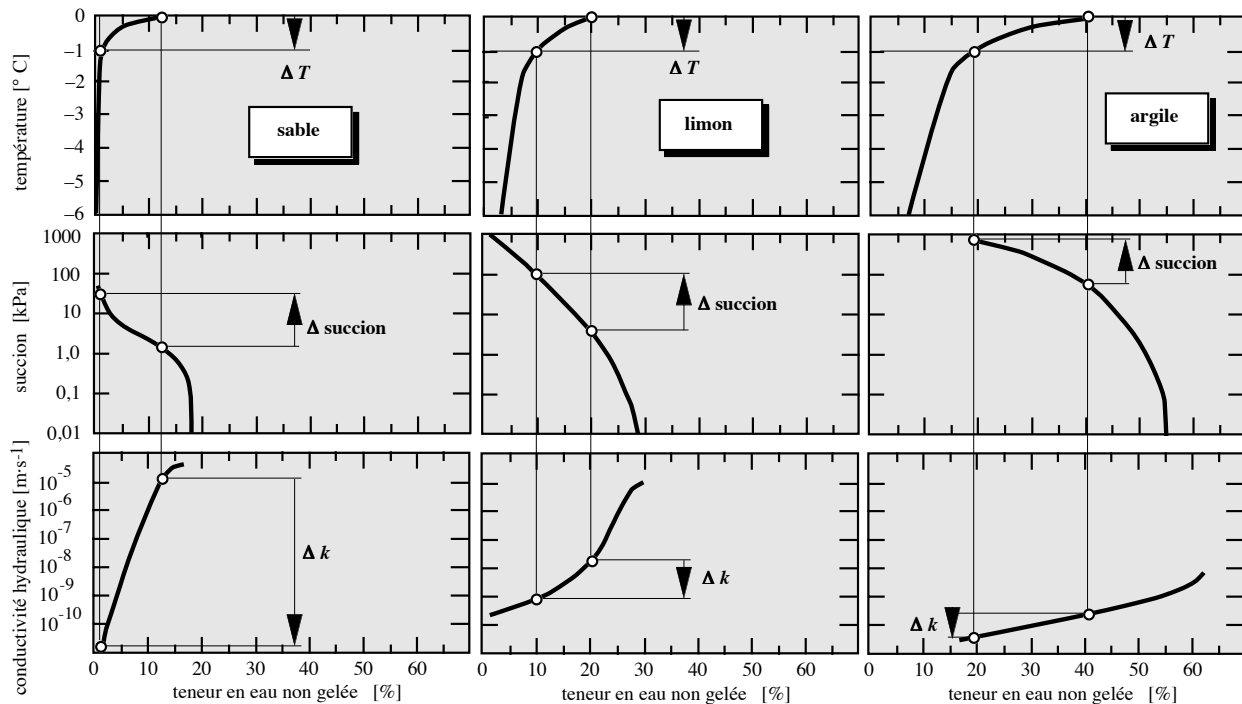
La figure de gauche montre ce qui se passe dans un sol grossier comme un sable. Avec ce sable, lorsque la température descend jusqu'à -1°C , la teneur en eau non gelée passe de quelque 12% à environ 1% ce qui fait passer la succion capillaire d'environ 1 à environ 30 kPa. Comme le montre le diagramme inférieur de la figure, cet abaissement de la teneur en eau conduit, de par la forme de la courbe du sable fin, à une très forte diminution de la conductivité hydraulique; elle passe d'environ $10^{-5}\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ à environ $10^{-11}\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Ce sable devient ainsi quasi imperméable et presque aucun mouvement d'eau ne se produit en direction du front de gel. Lors d'un gel saisonnier, ce sol n'est donc pas gélif.

La figure du milieu montre ce qui se passe dans un sol limoneux. Avec ce sol, lorsque la température descend jusqu'à -1°C , la teneur en eau non gelée passe de quelque 20% à environ 10%, ce qui fait passer la succion capillaire d'une valeur de quelque 5 kPa à plus de 100 kPa. Cet abaissement de la teneur en eau conduit, de par la forme de la courbe du limon, à une diminution de la conductivité hydraulique relativement faible par rapport au sable; elle passe d'une valeur légèrement supérieure à $10^{-8}\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ à la valeur d'environ $10^{-9}\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Ce limon reste ainsi assez perméable pour que des mouvements d'eau puissent se produire en direction du front de gel et permettre la formation de lentilles de glace. Lors d'un gel saisonnier, ce sol est donc gélif.

Enfin, la figure de droite montre le cas de l'argile où la teneur en eau passe, au moment de la congélation du sol à -1°C , de 40% à 19% ce qui augmente la succion capillaire d'environ 50 kPa à environ 1000 kPa. À la teneur en eau de 40% correspond une conductivité hydraulique de quelque $3\cdot 10^{-10}\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; ce sol est, avant congélation, est déjà très imperméable et les

mouvements d'eau y sont très lents. La congélation à -1°C ne provoque qu'une faible diminution de la conductivité hydraulique. Il y a ainsi création d'un mouvement d'eau vers le front de gel et, intrinsèquement l'argile est gélive. Cependant, dans les régions tempérées à froides, la durée des hivers est trop courte pour produire une migration d'une quantité d'eau suffisante à la formation de lentilles de glace. Ainsi, lors d'un gel saisonnier, l'argile est considérée comme non gélive.

Dans les pergélisols, qui ne sont soumis aux variations annuelles de température que dans leur partie supérieure, des lentilles de glace peuvent par contre se former dans les sols argileux et l'on en a découvert certaines de plusieurs mètres d'épaisseur.



2-14 Le modèle graphique (tiré de Dysli, 1991a)

2.3.6 Gélivité des sols

La gélivité d'un sol peut être définie comme étant la propriété qui favorise l'écoulement de l'eau interstitielle vers le front de gel et qui permet le développement de lentilles de glace dans certaines conditions thermiques. Il est admis qu'il existe une corrélation entre la gélivité d'un sol et les dégâts provoqués par la perte de portance lors de la fonte des lentilles de glace. Ces dégâts dépendent cependant d'autres facteurs, comme de la quantité d'eau disponible pour la formation des lentilles, du gradient thermique et des conditions de drainage lors du dégel.

La gélivité d'un sol dépend de sa granulométrie, de sa texture minéralogique, de son degré de consolidation et de son état de contrainte. Des corrélations peuvent être établies entre la gélivité et certains paramètres classiques obtenus par des essais standards de mécanique des sols. On classe ainsi le sol selon son *degré de gélivité* sur la base d'un ou de plusieurs essais. Les méthodes d'essai et les critères de classement associés sont très nombreux. Presque chaque pays des régions froides à tempérées du globe a sa propre méthode de désignation de la gélivité ! On peut les classer en trois groupes de méthodes :

- Les méthodes basées sur le pourcentage de particules plus petites que 0,02 mm ou 0,074 mm et sur différents autres paramètres tels que le degré d'uniformité, les limites d'Atterberg, la classification USCS, la minéralogie ou la perméabilité.
- Les méthodes basées sur la mesure de la vitesse de gonflement ou du gonflement total obtenu pour certaines conditions de gel.
- Les méthodes basées sur la mesure de la perte de portance au dégel, ceci généralement par un essai CBR en laboratoire sur une éprouvette ayant subi un ou plusieurs cycles de gel-dégel.

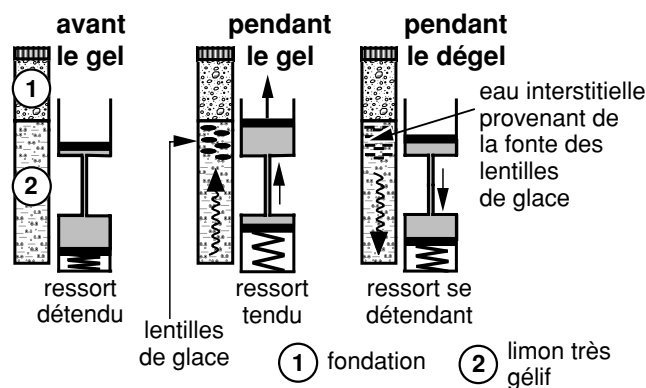
Nous pouvons citer parmi les méthodes du premier groupe la classification établie par l'*US Army Corps of Engineers* et celle établie par le *Cold Region Research and Engineering Laboratory USA* (CRREL) (Kaplur, 1974), ou encore celle des normes suisses (SN 670 140, tableau 1). Pour le second groupe, la méthode française (NF P 98-234-2) est intéressante ; dans cette méthode, la valeur de la pente de la courbe de gonflement détermine la classe de sensibilité au gel. Dans ce groupe, il faut aussi citer le potentiel de ségrégation SP (Konrad & Morgenstern, 1980, 1981) qui sera présenté plus en détail au paragraphe 2.7.1. Enfin, pour le troisième groupe, la norme suisse SN 670 321 est un bon exemple.

Dysli (1991a) donne plus de détails sur ces critères de gélivité et leur mode de détermination.

2.4 Dégel des sols

2.4.1 Dégel des lentilles de glace

Lors du dégel, l'eau provenant de la fonte des lentilles de glace est drainée vers la zone où les pressions interstitielles sont les plus faibles, à savoir et dans presque tous les cas, vers la zone qui a été mise en dépression capillaire lors du gel. En quelque sorte, l'eau revient à l'endroit où elle avait été prélevée lors du gel. Dysli (1991a) a proposé le schéma de la figure 2-15 pour expliquer ce phénomène. Avant le gel, le ressort sous le piston est au repos ; pendant le gel, l'eau est aspirée vers le front de gel et le ressort se tend. Pendant le dégel, la succion diminue et le ressort tendu réaspire l'eau dans son cylindre de départ.



2-15 Schéma du mode de drainage au dégel de la forme de la fondation (eau non pesante).

Si la perméabilité du sol ne permet pas un drainage rapide et si l'eau en excès est mise en pression par des charges extérieures, la résistance au cisaillement du sol peut être dépassée. C'est le phénomène de la diminution de la portance au dégel ; sous les voies de communication, elle peut conduire à leur destruction et, dans une pente, elle est parfois la cause de leur rupture superficielle.

Deux phénomènes liés au dégel ont été surtout étudiés : les tassements et la consolidation du sol lors du dégel.

2.4.1.1 Tassements lors du dégel

La prévision des tassements dus au dégel est surtout utile pour les pergélisols du Grand nord, par exemple pour estimer le tassement sous des ouvrages sources de chaleur comme les oléoducs. Elle est possible grâce à des essais en laboratoire dont les premiers ont été exécutés il y a très longtemps (Tsytovitich & Sumgin 1937, Morgenstern & Smith 1973, Luscher & Afifi 1973). Pour les infrastructures des voies de communication et, d'une manière générale, dans tous les gélisols (gel et dégel saisonnier) le problème est d'estimer le tassement résiduel sous des charges comme le trafic. Le tassement résiduel est le tassement après un ou plusieurs cycles de gel-dégel. Il est dû :

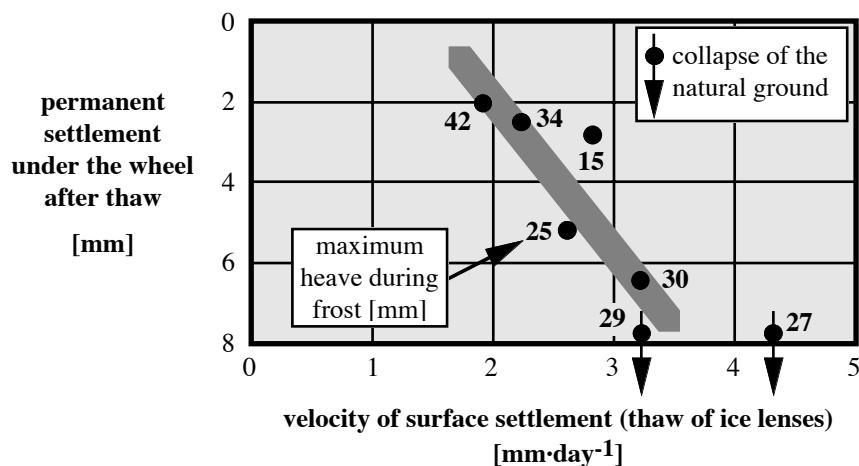
- Dans une faible mesure, à la succion capillaire engendrée par le phénomène du gel ; ce cas sera traité dans le paragraphe 2.4.1.3.

- Au cisaillement du sol lors du dégel, lorsque la résistance au cisaillement non drainé est dépassée. La figure 2-16 est un exemple d'un tassement très important dû au poinçonnement de la fondation d'une route par le trafic lourd.

La quantification de ce tassement est cependant difficile. Les essais en vraie grandeur réalisés dans la halle fosses de l'EPFL à Écublens ont notamment montré qu'il était fonction de la vitesse du dégel (Dysli, 1998). La figure 2-17 montre cette relation. Dysli (1979) et Dysli et Pfister (1981) donnent plus d'explications sur cette importante figure.



2-16 Poinçonnement d'une route lors du dégel (hiver 1962-63)

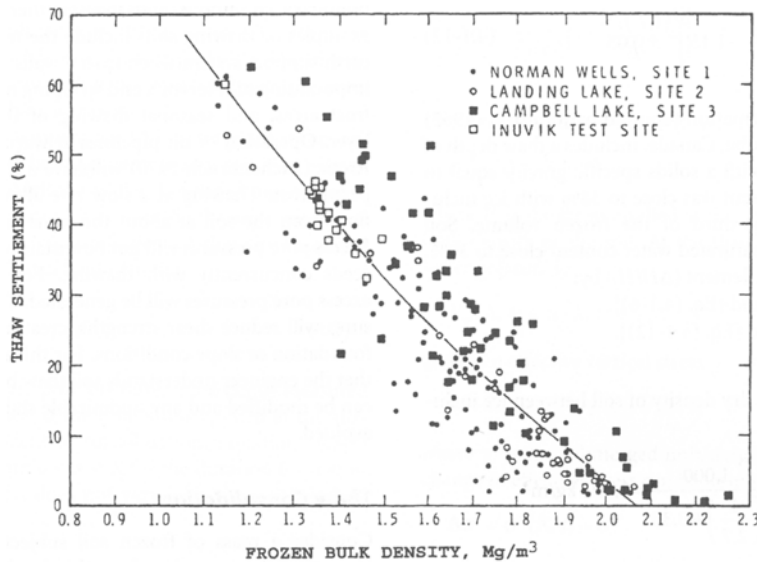


2-17 Relation entre la vitesse du dégel et le tassement après dégel (tiré de Dysli, 1998)

Pour différents sols plutôt argileux, Speer, Watson et Rowley (1973) on établit une intéressante corrélation entre la déformation dans la couche dégelée et la masse volumique du sol gelé (fig. 2-18). La dispersion de cette corrélation est cependant importante. Son équation a été établie par Ladanyi (1994) :

$$\varepsilon [\%] = 85 \left[1 - \left(\frac{\rho_f}{\rho_w} - 1,10 \right)^{1/2} \right] \pm 8 \quad (2-8)$$

avec : ε = déformation après dégel [%]
 ρ_f = masse volumique du sol gelé [$t \cdot m^{-3}$]
 ρ_w = masse volumique de l'eau [$t \cdot m^{-3}$]



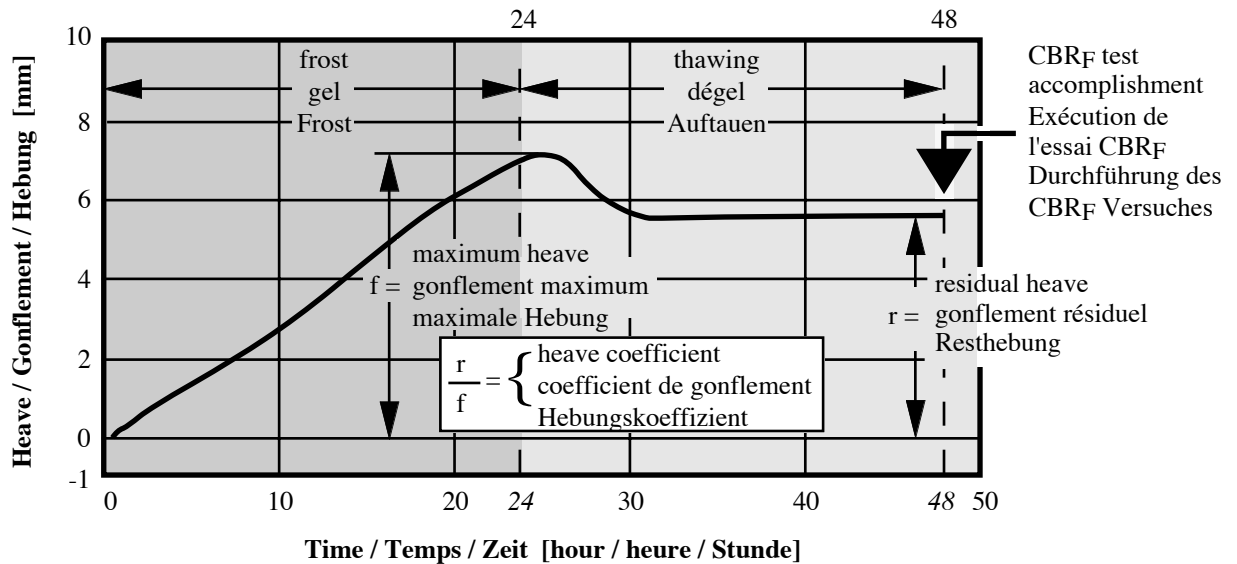
2-18 Corrélation entre la masse volumique du sol gelé et le tassement après dégel

(tiré de Speer, Watson et Rowley, 1973)

Cette corrélation tient compte implicitement de la teneur en glace mais pas de la vitesse du dégel. D'autres corrélations du même type ont été établies, entre autres, par Johnson, McRoberts et Nixon (1984), Nixon et Ladanyi (1978) et Ladanyi (1994).

2.4.1.2 Gonflement résiduel lors du dégel

Dans les *sols graveleux* sans surcharge importante, le résultat d'un cycle de gel-dégel est un gonflement. Ce type de sol subit en effet pendant le gel une désorganisation interne qui n'est pas rétablie lors du dégel. Thorel et Dysli (1990) ont développé un essai pour déterminer la gélivité d'un sol et estimer ce tassement résiduel. Cet essai fait l'objet de la norme SN 670 321. Il définissait entre autres un coefficient de gonflement lors du dégel (fig. 2-19). Après quelques années d'utilisation de cette norme, l'usage pratique de ce coefficient de gonflement a cependant dû être abandonné car il présentait divers inconvénients.

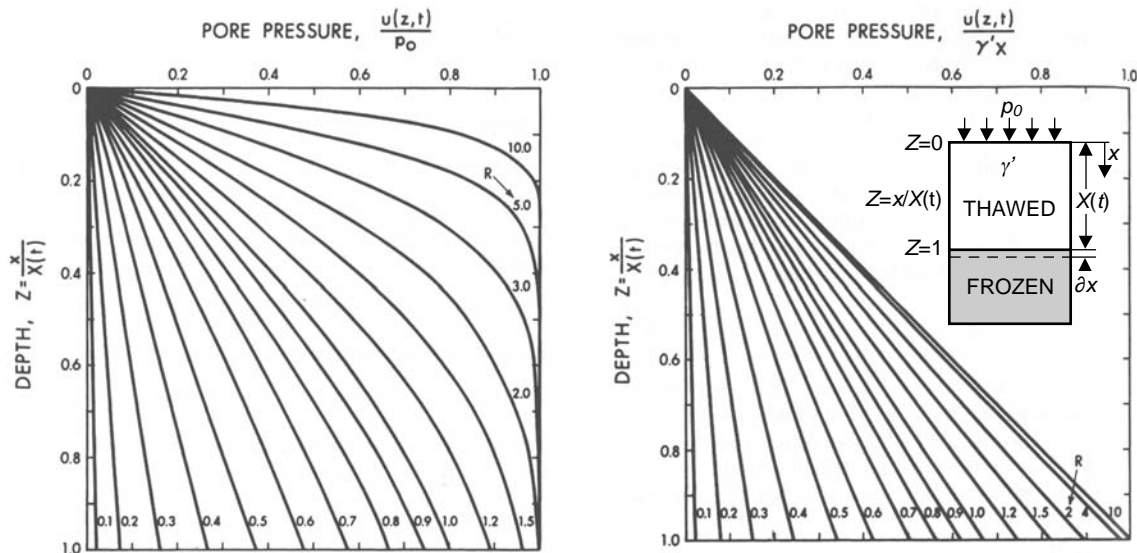


2-19 Gonflement lors du dégel pour des sols graveleux

(tiré de la norme SN 670 321)

2.4.1.3 Consolidation par le dégel

Lors du dégel, lorsque le front de gel pénètre dans la zone gelée, les lentilles de glace fondent et, sous l'effet de la contrainte verticale due au poids propre du sol ou/et à une surcharge, la pression interstitielle en excès est régie par l'équation de la consolidation (2-18). La position du front de gel n'est cependant pas constante ; elle se déplace dans la zone en cours de dégel. Avec des conditions aux limites appropriées et l'équation de la diffusion thermique (2-9) on peut, comme l'ont fait Morgenstern et Nixon (1971), déterminer la pression interstitielle en excès à un niveau déterminé et obtenir des relations du type de celles de la figure 2-20. Le graphique de gauche concerne un sol non pesant et une surcharge p_0 et celui de droite un sol de masse volumique γ' sans surcharge. L'indice de consolidation par dégel R est égal à $\alpha \cdot 2(c_v)^{1/2}$, avec c_v le coefficient de consolidation et α une constante tirée de la solution de Stefan de l'équation de la diffusion thermique (voir Dysli, 1991a, p. 100 ou Andersland et Ladanyi, 2004, p.60 et suivantes). L'indice de consolidation par dégel R exprime l'équilibre entre la vitesse de la fonte des lentilles (génération d'eau non gelée) et la possibilité du sol dégelé d'expulser cette eau en excès (consolidation).



2-20 Pression interstitielle en excès

(tiré de Morgenstern et Nixon, 1971)

2.4.1.4 Contraintes dans les sols lors d'un cycle de gel-dégel

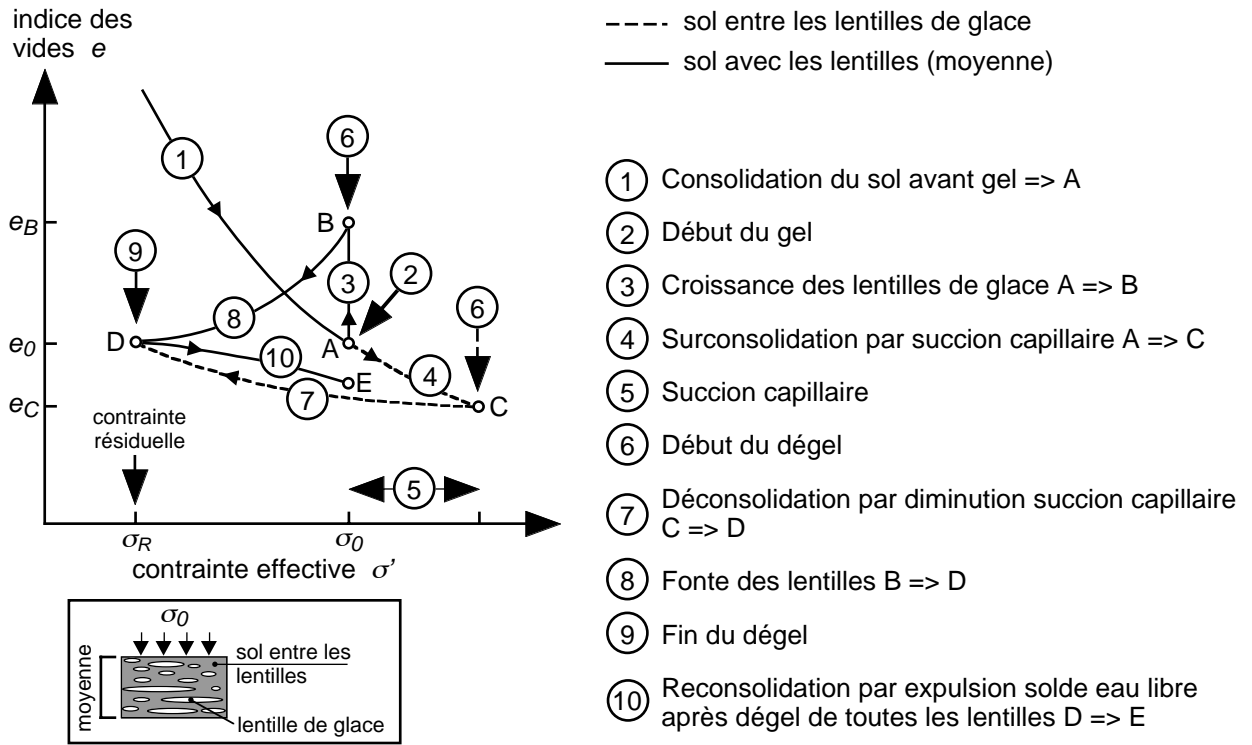
Quel est le chemin des contraintes lors du gel et du dégel d'un sol ? Pour le déterminer, nous allons, dans une certaine mesure, utiliser la publication de Nixon et Morgenstern (1973) et le diagramme oedométrique de la figure 2-21. Il s'agit d'une approche un peu théorique qui ne tient pas compte de l'hétérogénéité du sol, autre que celle provoquée par les lentilles de glace, et de la variation des paramètres en fonction de la profondeur. En outre, elle concerne plutôt un premier cycle de gel-dégel.

Le sol gélif est tout d'abord consolidé sous son propre poids et, éventuellement, une surcharge verticale (\Rightarrow A sur la figure 2-21), ce qui détermine la contrainte initiale σ_0 . À la fin de cette consolidation, il n'y a plus d'excès de pression interstitielle et σ_0 est une contrainte effective. À ce moment, le gel intervient. Sur la figure 2-21 deux cas sont examinés : celui du sol entre les lentilles de glace (traitillé) et celui du sol avec les lentilles (trait plein, sol complet). Pour le sol complet, l'expansion due au gel de l'eau interstitielle et à la formation des lentilles de glace conduit à une augmentation importante de l'indice de vide ($A \Rightarrow B$). Entre les lentilles, le sol est soumis à la succion capillaire engendrée par le phénomène du gel ; ce sol subit une surconsolidation, et son indice des vides diminue ($A \Rightarrow C$).

Le dégel intervient alors. Entre les lentilles, la succion capillaires diminue et l'indice des vides augmente (suppression presque totale de la surconsolidation) ($C \Rightarrow D$). Dans le sol complet, l'eau de fonte des lentilles de glace est en partie réaspirée sous la frange de gel (fig. 2-15), ce qui conduit à une forte diminution de l'indice des vides ($B \Rightarrow D$). En ce point, la contrainte effective est dénommée *contrainte résiduelle* σ_R . Durant le dégel, une augmentation de la pression interstitielle est observée. Pour des indices de vide importants, la pression interstitielle peut approcher ou égaler la contrainte totale. La contrainte effective résiduelle est fortement réduite et peut approcher de zéro, ce qui peut conduire à la plastification complète (à la rupture) du sol. Au point D, toutes les lentilles de glace ont fondu. Il reste cependant un peu d'eau libre en excès et

une reconsolidation du sol se produit (D => E). Elle conduit à un nouvel équilibre et à un nouvel indice de vides défini par le point E.

Durant tout le cycle de gel-dégel, avec une contrainte extérieure constante σ_0 (poids propre, surcharge), le sol a subi une diminution de volume représenté par A => E. Cette reconsolidation est semblable à une surconsolidation d'un sol non gelé. Elle est surtout marquée lors d'un premier cycle de gel-dégel. Pour les suivants, elle diminue pour tendre vers zéro.



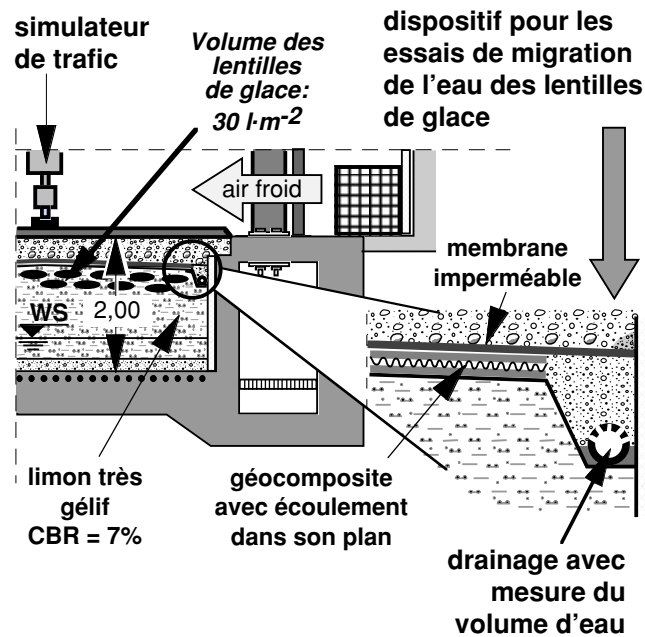
2-21 Chemin des contraintes lors d'un cycle de gel-dégel

2.4.2 Mouvement de l'eau après dégel

Après une recherche bibliographique importante, cependant non exhaustive, force est de constater que le problème du mouvement de l'eau du dégel après ce dernier n'a pas fait l'objet de nombreuses publications. Les seuls essais importants sont ainsi et probablement ceux de Lefebvre et Dysli (1988), résumés par Dysli (1993).

Avant ces essais en vraie grandeur, diverses théories existaient, dans le milieu des ingénieurs routiers, sur les mouvements de l'eau de fonte des lentilles de glace : Certains pensaient que l'eau en excès s'évacuait vers le haut (d'où les importantes couches de drainage placées, dans certains pays, au-dessus des sols gélifs de l'infrastructure), d'autres latéralement et très peu pensaient qu'elle puisse revenir de l'endroit d'où elle provenait.

Ces essais ont été entrepris dans le dispositif d'essai décrit par la figure 2-22.



2-22 Dispositif d'essai pour l'étude des mouvements de l'eau de fonte des lentilles de glace

(tiré de Dysli, 2000)

Un des champs d'essai était pourvu d'un géocomposite drainant dans son plan de 5 mm d'épaisseur placé à l'interface entre la couche de limon très gélif et la couche de fondation en gravier concassé. Deux drains latéraux devaient recueillir l'eau drainée par le géocomposite et la diriger vers un dispositif de mesure de son volume. Afin qu'aucune quantité d'eau provenant de la fonte des lentilles de glace ne puisse pénétrer dans la fondation de la route et ainsi être soustraite aux mesures de volume, le géocomposite était recouvert d'une membrane de caoutchouc synthétique. Un autre champ d'essai avait la même superstructure et la même membrane de caoutchouc, mais était dépourvu de couche de drainage.

Ces deux champs furent soumis à deux cycles de gel et dégel. La durée et les conditions thermiques du gel ont été les mêmes pour les deux essais. Compte tenu des gonflements mesurés pendant ces deux essais (47 mm à l'axe longitudinal), et en tenant compte du gonflement plus faible sur les bords de la fosse, le volume des lentilles de glace a pu être estimé à quelque 30 litres par m².

Le dégel du premier essai a été progressif et lent; la température de la surface du revêtement a passé de -4° C à +3° C en 25 jours. Lors de cette longue période de dégel, absolument aucune eau n'a été récoltée dans le dispositif de mesure.

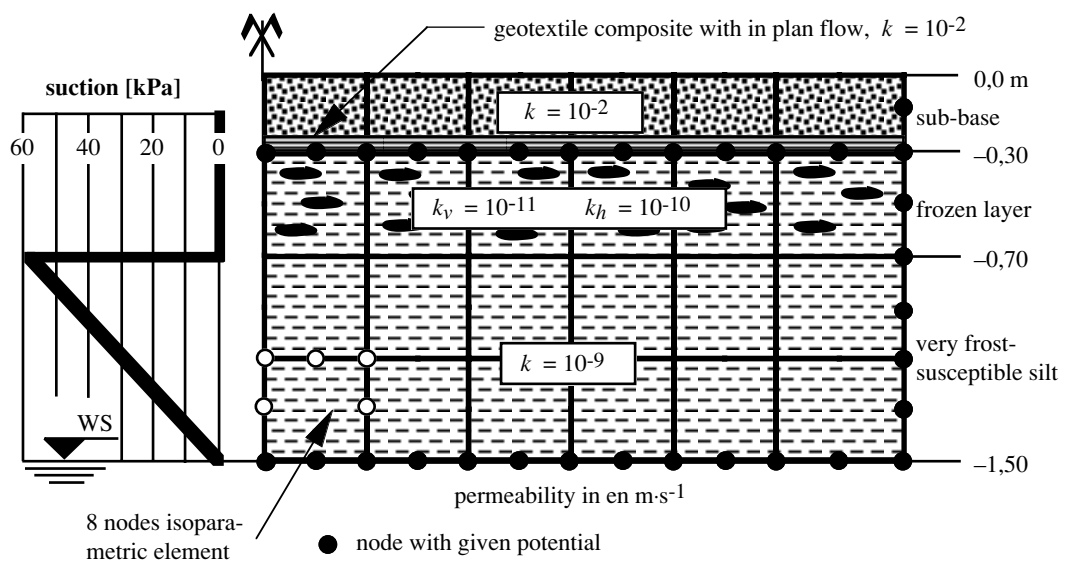
Lors du deuxième essai, un dégel extrêmement rapide a été produit : passage instantané de la température de l'air de -8° C à environ +20° C (surface du revêtement : -4° C à +7° C en 7 jours). Lors de ce dégel très rapide, seulement 0,45 litres d'eau par m² de route a été drainé par la couche drainante (à comparer aux 30 l·m⁻² des lentilles de glace). La première goutte d'eau a été récoltée 3 jours après le début du dégel et la dernière 9 jours après. En considérant la saturation du géocomposite, constatée par une fouille de reconnaissance exécutée juste après le dégel, on peut admettre à quelque 0,5 l·m⁻² le volume d'eau drainé par le géotextile. Cette quantité d'eau

correspond à environ 2% du volume des lentilles de glace et elle a été obtenue sous des conditions de dégel qui sont absolument irréalistes, même dans les vallées à foehn des Alpes.

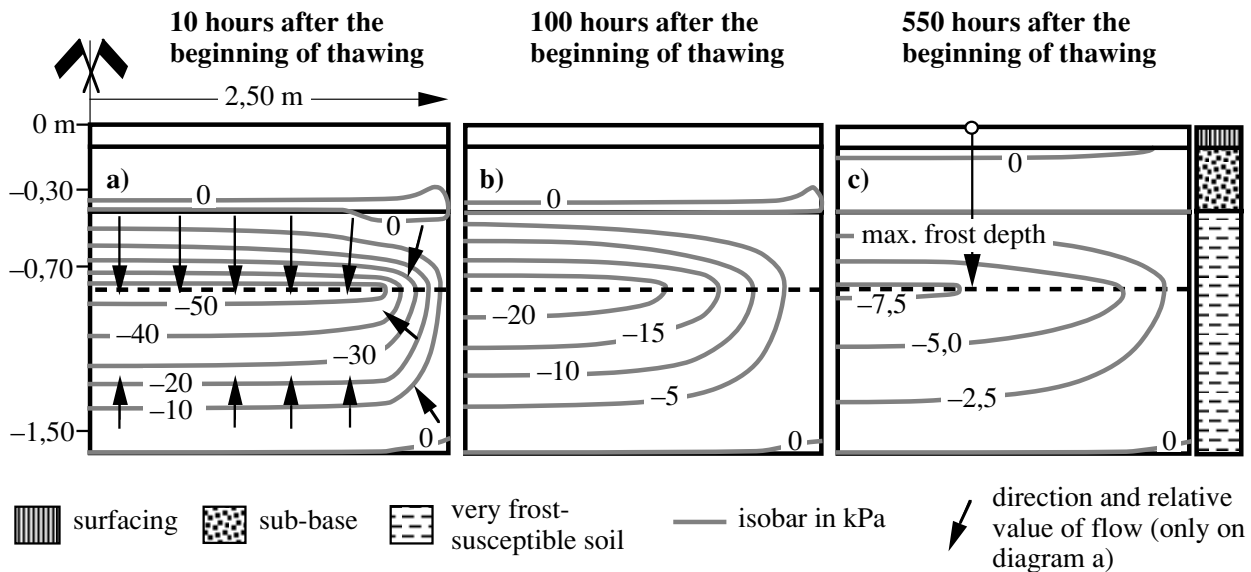
Après donc 9 jours de dégel, à un moment où environ la moitié du dégonflement de la surface de la route s'est produit, plus aucune eau n'est recueillie. L'isotherme 0°C avait pénétré d'environ 22 cm dans la couche de limon, valeur à comparer aux quelque 50 cm de la zone gelée. Il semble donc que le drainage de la forme de l'infrastructure n'a permis de récolter l'eau provenant du dégel que sur les premiers centimètres de la couche de limon.

Puisque le drainage ne récolte que très peu d'eau dégelée, quel est le cheminement de l'eau de fonte des lentilles de glace lors du dégel ? Pour essayer de répondre à cette question, une modélisation des écoulements a été effectuée à l'aide d'un programme de calcul basé sur la méthode des éléments finis qui permet de simuler des écoulements souterrains transitoires ou permanents dans un milieu composé de plusieurs couches. La conductivité hydraulique du sol de chaque couche peut être soit orthotropique et constante dans le temps, soit isotropique et fonction de la pression interstitielle (zone non saturée). Les principales données de cette simulation font l'objet de la figure 2-23; les valeurs numériques que l'on peut y lire sont celles de la simulation dont les résultats sont présentés sur la figure 2-24.

Les 3 graphiques de la figure 2-24 présentent les résultats, obtenus par la simulation par le modèle d'éléments finis, à différents moments après le début du dégel. Ils montrent que la succion capillaire engendrée par le phénomène du gel réaspire progressivement toute l'eau de fonte des lentilles de glace vers le bas et qu'aucun flux ne s'écoule vers la couche drainante simulée par une couche de grande perméabilité ($10^{-2}\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$). La succion capillaire diminue au cours du dégel et le modèle non linéaire utilisé pour la simulation le montre bien. La figure 2-15 schématise ce phénomène.



2-23 Données de la simulation, par la méthode des éléments finis, de la fonte des lentilles de glace.
(Adapté de Dysli, 1993)

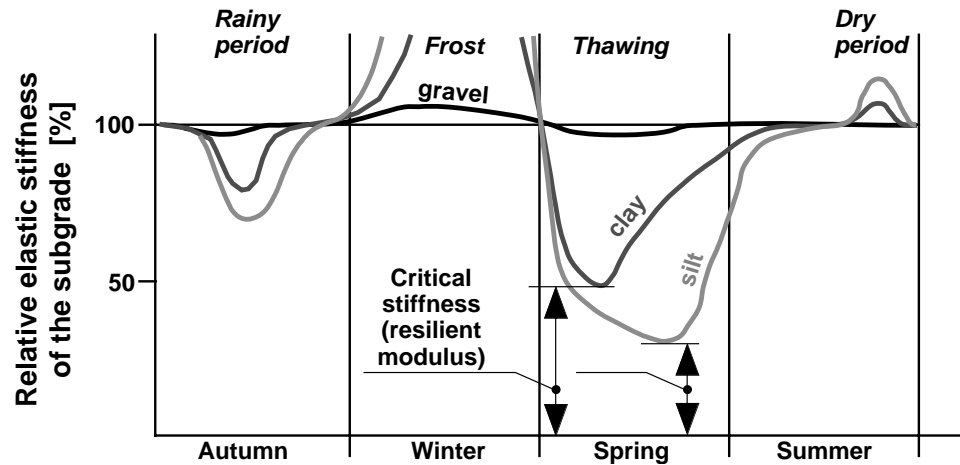


2-24 Résultats de la simulation, par la méthode des éléments finis, de la fonte des lentilles de glace.
(tiré de Dysli, 1993)

2.4.3 Module résilient

Dans le domaine du gel et du dégel des sols, le module de déformation résilient M_r est le module de déformation du sol de fondation d'un ouvrage pendant et surtout après le dégel (routes, voies ferrées et autres constructions). Cependant, ce terme est général et il peut s'appliquer à tout module de déformation d'un matériau ayant subi une transformation, par exemple par des cycles de charge-décharge hors gel.

On devrait pouvoir dimensionner au dégel une telle fondation avec le module résilient au dégel car cette méthode est plus rationnelle que les méthodes empiriques qui sont encore aujourd'hui largement utilisées. Elle est en effet une transposition du phénomène naturel. Cependant la détermination d'un module résilient réaliste correspondant à la capacité portante du sol de fondation lors du dégel est difficile. Ce module est en effet fonction de nombreux facteurs dont le type du sol de fondation, le niveau des contraintes, les conditions climatiques à la surface de la chaussée pendant le gel et le dégel (notamment la vitesse du dégel : voir fig. 2-17) et du gonflement pendant le gel (eau accumulée sous forme de lentille de glace). La figure 2-25 montre, pour la Finlande, les variations relatives de ce module en fonction du type du sol de fondation et de la saison.



2-25 Variation de la rigidité de quelques sols en fonction de la saison (Finlande)

Tiré de Saarelainen (2000)

Cette méthode de dimensionnement au dégel est ou a été utilisée en Finlande depuis 1985 environ (Norme finlandaise : Teiden Suunnittelu, TVL, Dysli 1987 & 1991a). Dans ce pays c'est un modèle multicouche élastique qui est utilisé pour évaluer l'épaisseur de chaque couche de la route dont on connaît le module de déformation.

Cole *et al.* (1986), du CREEL, ont développé une première méthode de laboratoire pour évaluer ce module (essai triaxial à chargements répétés avec variation des températures), car, d'après ce laboratoire, la détermination du module résilient au dégel doit se faire par un essai spécifique en laboratoire et non pas par des corrélations avec certaines propriétés classiques du dimensionnement des voies de communication comme le CBR. Aujourd'hui (2005), aux USA, son usage commence à se généraliser. En Europe, on en parle beaucoup, mais, à part la Finlande, aucun pays ne l'utilise pour le dimensionnement des voies de communication.

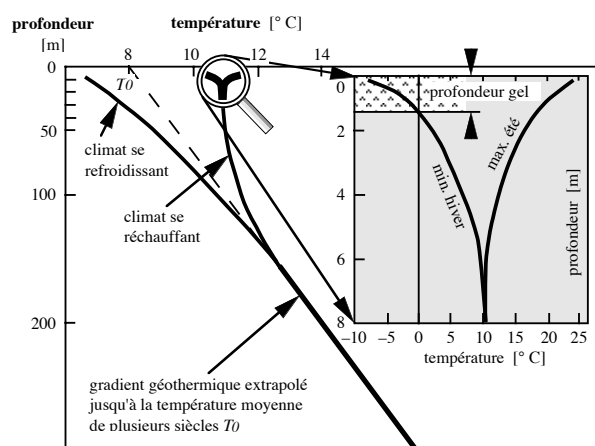
Comme ce sujet est un des objets important de la présente recherche, nous n'allons pas poursuivre cet état des connaissances actuelles qui sera repris en détail au chapitre 10.

2.5 Les pergélisols alpins et les glaciers rocheux

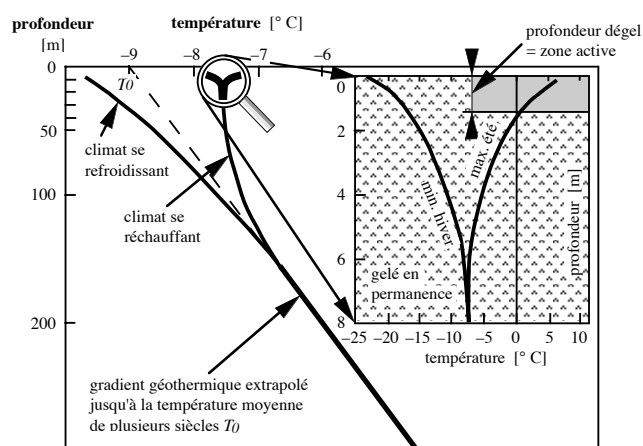
2.5.1 Introduction

Selon la valeur de la température moyenne multiannuelle et ses variations au cours des siècles, un sol peut être un gélisol ou un pergélisol (permafrost en anglais). Un *gélisol* se trouve dans les régions où la température moyenne multiannuelle est supérieure à environ -2°C . Seule sa tranche supérieure gèle pendant l'hiver et dégèle au printemps. La figure 2-26 (Dysli 1991a) présente, pour ce gélisol, les courbes de variation de la température en fonction de la profondeur. Les gélisols concernent surtout les zones du globe tempérées à froides, dont la Suisse fait partie.

Un *pergélisol* se situe dans les régions très froides du monde où la température moyenne multiannuelle est inférieure à environ -2°C . Si dans le cas des gélisols seule la couche supérieure du sol gèle en hiver et dégèle au printemps, *tout est inversé dans les pergélisols*. Ils sont gelés en permanence en profondeur et seule leur couche superficielle dégèle du printemps à l'automne, couche dénommée *zone active*. La figure 2-27 (Dysli 1991a) présente les courbes de variation des températures en fonction de la profondeur pour ces pergélisols.



2-26 Variation des températures en fonction de la profondeur dans un gélisol



2-27 Variation des températures en fonction de la profondeur dans un pergélisol

D'une manière générale, un pergélisol se définit comme un sol ou un massif rocheux dont la température moyenne est égale ou en dessous de 0°C pendant au moins deux ans (par exemple : Brown & Péwé, 1973). En ce qui concerne le pergélisol alpin, il n'y a pas de définition précise; on pourrait cependant le définir comme un pergélisol dont le comportement et le mode de formation sont influencés par un relief accentué et/ou par la proximité de glaciers. Ils ne sont pas fonction de l'altitude ; par exemple les pergélisols des grands plateaux tibétains ne sont pas des pergélisols alpins bien que leur altitude dépasse souvent 4000 m.s.M.

L'étude systématique et scientifique des pergélisols alpins est assez récente (Barsch 1969, Haerberli 1975). Elle avait été cependant précédée par l'étude des glaciers rocheux qui avaient

éveillé l'intérêt de quelques géomorphologistes comme A. Chaix en 1923. Aujourd'hui (2005), les principaux sujets d'intérêt scientifique et technique des pergélisols alpins sont :

- Les conséquences du réchauffement du climat sur la stabilité des pentes pergélées. La fonte d'un pergélisol alpin peut conduire à la formation de laves torrentielles qui peuvent détruire des zones habitées et des voies de communication.
- La fonte des pergélisols alpins par la chaleur produite par les constructions érigées sur ces derniers. Ce phénomène concerne aussi les autres types de pergélisols. Dans les zones montagneuses des pays économiquement bien développés, ce problème concerne surtout les cabanes, hôtels de haute montagne et les stations, généralement supérieures, des remontées mécaniques.
- La fonte des pergélisols alpins sous les supports des moyens de transport (pylônes de téléphériques ou de lignes électriques, télésièges, voies de chemins de fer de montagne) ou sous les fondations de certains ouvrages comme les prises d'eau des aménagements hydro-électriques, fonte provoquée par leur fonction conductrice de la chaleur produite par le rayonnement solaire.
- La congélation de l'eau dans les conduites (par exemple dans la conduite d'évacuation des eaux usées de la station supérieure du train du Jungfraujoeh).
- La diminution des réserves d'eau contenue dans les pergélisols alpins par réchauffement du climat. Ce phénomène est moins marqué que celui de la fonte des glaciers, mais il ne doit cependant pas être négligé.
- L'initiation d'éboulements dans les parois rocheuses par la fonte de la glace cimentant les fissures, fonte pouvant provenir du réchauffement du climat comme d'autres causes (par exemple : écroulement d'une partie du refuge des Cosmiques près de Chamonix, fortement chauffé grâce à un câble électrique tiré depuis la station supérieure du téléphérique de l'Aiguille du Midi).

2.5.2 Types et localisation

2.5.2.1 Types

Les hautes montagnes des régions froides à chaudes du globe comprennent de très nombreuses zones de pergélisols dans lesquelles le volume de glace est parfois plus important que celui de la matière minérale alors que, lorsque les névés ont fondu, leur surface est minérale (éboulis, blocs) et parfois végétalisée.

Dans les régions montagneuses, on fait la différence entre:

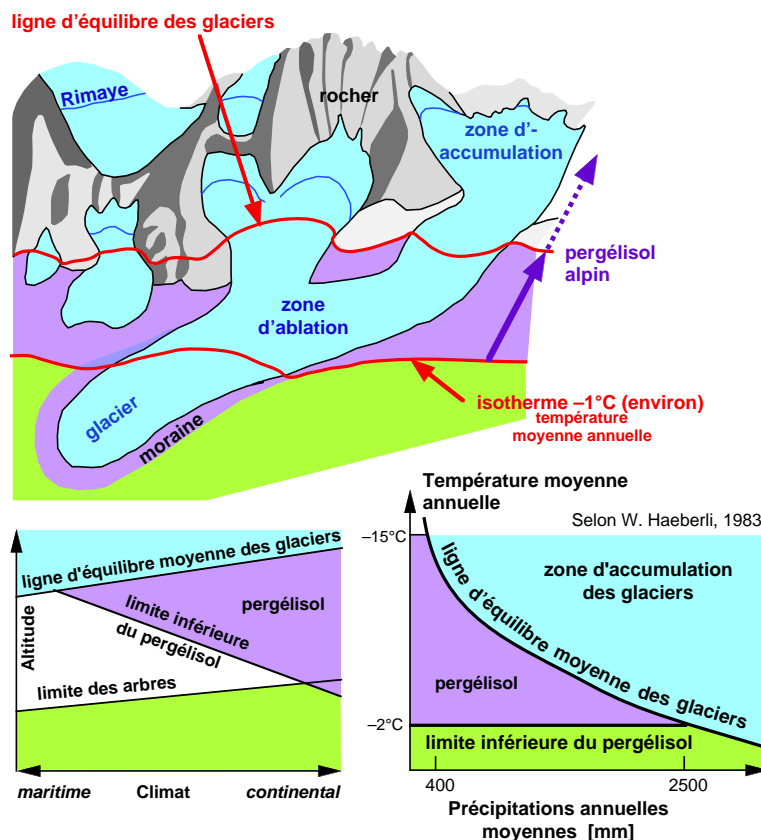
- les *pergélisols actifs* qui contiennent un volume important de glace, qui sont soumis au fluage et/ou dans lesquels le gel saisonnier pénètre sous la couche active;
- les *pergélisols inactifs* qui contiennent un peu de glace, mais qui ne sont plus ou pas encore soumis à des mouvements importants
- et les *pergélisols fossiles* qui sont d'anciens pergélisols qui ont conservé une partie de la structure des pergélisols actifs. Dans toutes les régions d'Europe qui ont été recouvertes par les

glaciers würmiens et rissiens, les géologues ont reconnu d'innombrables zones de pergélisols fossiles. En particulier, il y en a un grand nombre dans le Jura et les Préalpes.

2.5.2.2 Localisation en altitude

On rencontre le pergélisol alpin au-dessus de l'isotherme -2°C (environ car cette valeur dépend de l'effet des radiations solaires) (fig. 2-28). Certains auteurs le définissent entre cette isotherme et la ligne d'équilibre des glaciers, à savoir la limite entre la *zone d'accumulation* où le bilan annuel du volume de neige est positif et la *zone d'ablation* où le volume de glace diminue chaque été par fusion. Au-dessus de la ligne d'équilibre des glaciers, le sol est cependant gelé en permanence, mais il est constitué surtout de rocher.

La limite inférieure des pergélisols alpins dépend de différents facteurs climatiques, ce que tentent de schématiser les deux diagrammes du bas de la figure 2-28. En plus des températures moyennes annuelles, cette limite dépend surtout du volume des précipitations. Dans les régions au climat très maritime, les pergélisols alpins sont absents et dans celles au climat très continental, on peut les trouver sous des forêts.

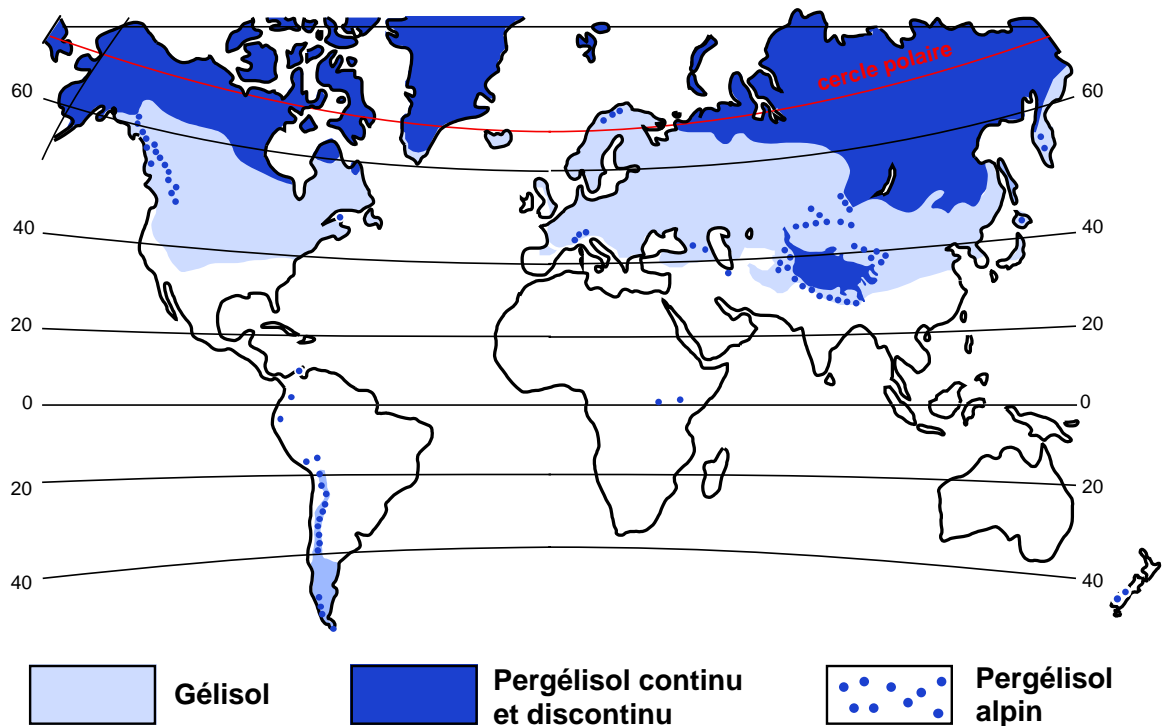


2-28 Localisation des pergélisols alpins en fonction de l'altitude

2.5.2.3 Localisation dans le monde

On trouve des pergélisols alpins sur toute la surface du globe, dans l'hémisphère nord, dans l'hémisphère sud et même dans la zone équatoriale, au-dessus de quelque 5'000 msM. Par exemple, un pergélisol alpin proche du Mt Kenya a été étudié par Hastenrath (1973) et Grab

(1996). La carte de la figure 2-29 donne un aperçu des pergélisols du monde et, en particulier, des pergélisols alpins.



2-29 Les pergélisols dans le monde

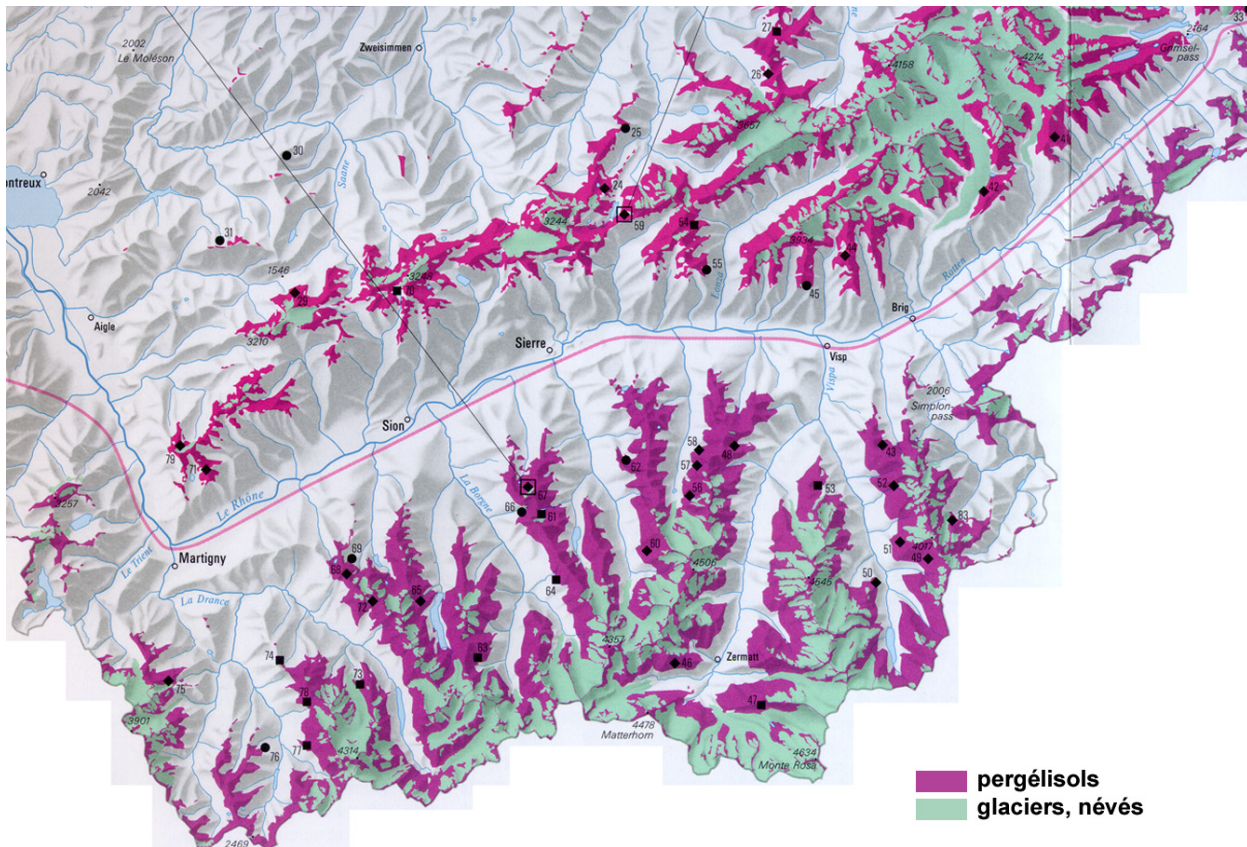
Dans les Alpes suisses et sur les versants peu ensoleillés, les pergélisols alpins se rencontrent approximativement à partir d'une altitude de 2100 m au nord des Alpes et à partir de 2400 m au sud. La figure 2-30 montre l'étendue des pergélisols alpins dans la région des Alpes valaisannes. Elle est extraite de l'Atlas de la Suisse édité par le Service topographique fédéral, Wabern-Berne. Aujourd'hui, il existe des cartes des pergélisols de toutes les Alpes suisses au 1 :50 000, établies au moyen de simulations numériques basées sur le modèle numérique du terrain, les températures et les radiations solaires en fonction de l'orientation des pentes. Elles sont disponibles à l'Office fédéral de l'environnement.

2.5.3 Effet des radiations solaires

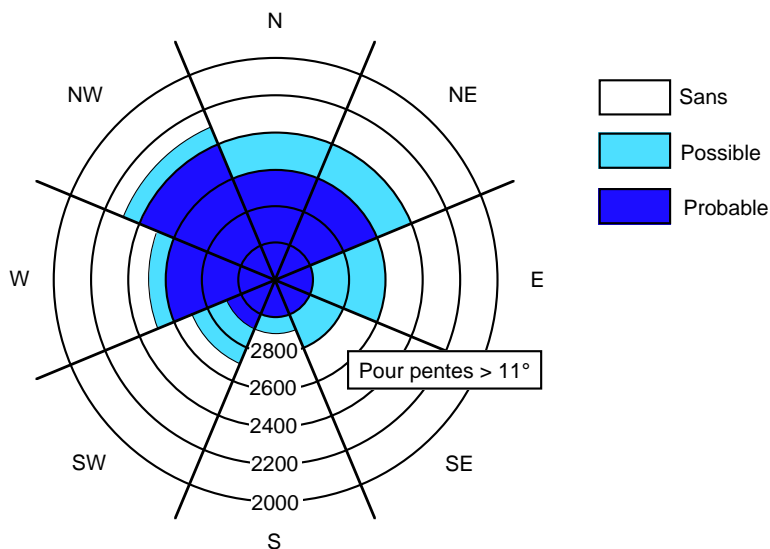
La présence ou non d'un pergélisol alpin dépend aussi fortement de la radiation solaire reçue par le sol. Cette radiation varie en fonction de l'orientation de la pente et des ombres portées. Pour cette raison, les pentes orientées au sud ne sont congelées qu'à haute altitude.

La présence certaine ou possible de pergélisols alpins peut être évaluée au moyen de diagrammes du type de celui de la figure 2-31 qui est dérivée d'une loi empirique (Tips und Faustregeln) donnée par Haerberli (1975) et confirmée par environ 20 ans d'observations.

Des méthodes plus scientifiques ont été cependant établies pour déterminer l'influence des radiations solaires (par exemple : Stocker-Mittaz 2002).



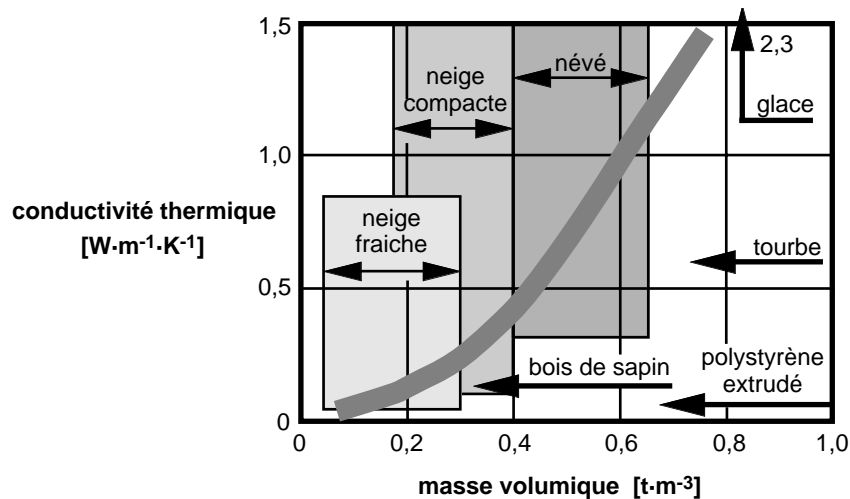
2-30 Les pergélisols des Alpes valaisannes
 Tiré de l'Atlas de la Suisse, Service topographique fédéral, Wabern-Berne



2-31 Distribution des pergélisols suisses en fonction de l'orientation de la pente et de l'altitude

2.5.4 Effet de la neige

La neige est un bon isolant. Sa conductivité thermique varie cependant fortement en fonction de sa densité (fig. 2-32). Elle joue un rôle important dans l'évolution des pergélisols alpins.



2-32 Conductivité thermique de la neige (Dysli, 1991a)

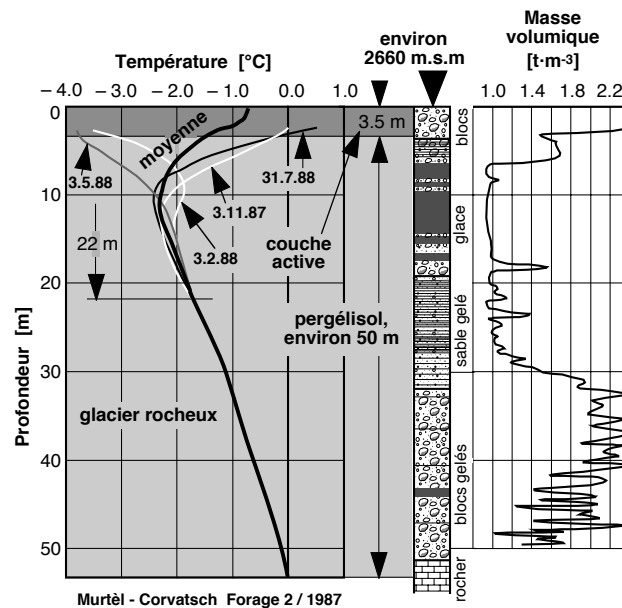
Par exemple, si l'épaisseur de la couche de neige est importante, les températures de l'air pendant l'hiver n'atteignent pas la surface du sol. À l'opposé, un automne froid et un début d'hiver sans neige, permettent un refroidissement important et rapide de la couche supérieure du pergélisol.

La neige est aussi un réflecteur de la radiation solaire (albédo) et empêche ainsi le réchauffement du pergélisol par cette radiation. Sous des avalanches, cette protection contre le réchauffement (isolation et réflexion des radiations) peut durer jusqu'au début de l'été, voire plus longtemps.

Plusieurs études ont été récemment entreprises sur l'effet de la neige sur les températures dans les pergélisols alpins et, d'une manière plus générale, sur le bilan énergétique à l'interface sol-air, par exemple : Dysli *et al.* 1997, Bernhard *et al.* 1998, Mittaz *et al.* 2000, Keller & Tamas 2003, Luetschg *et al.* 2003.

2.5.5 Constitution

De quoi est constitué un pergélisol alpin ? La structure interne des pergélisols alpins était très mal connue jusqu'à ces dernières années, où des constructions en haute montagne (téléphériques) et des moyens financiers importants dévolus à des recherches scientifiques ont permis la réalisation de forages de reconnaissance dans des pergélisols alpins. Ces forages ont montré que la teneur en glace des pergélisols alpins était beaucoup plus importante que ce que l'on présu-mait précédemment. Par exemple, un forage exécuté dans une moraine congelée lors de la construction du téléphérique du Petit-Cervin a montré que la teneur en glace massive était comprise entre 50 % et 80 % (plus de glace que de minéral). La figure 2-33 décrit brièvement les résultats d'un forage entrepris en 1987 par la «Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie» de l'ETHZ dans un pergélisol (glacier rocheux) situé près de la station intermédiaire du téléphérique du Corvatsch (GR-CH) (Vonder Mühl 1993). On y constate aussi que la teneur en glace est très importante. Aujourd'hui, les nombreuses reconnaissances géophysiques dans les pergélisols alpins (résistivité géoélectrique DC, réfraction sismique, radar basse fréquence, etc.) permettent de connaître avec fiabilité leurs modes de constitution.



2-33 Résultats d'un forage dans un pergélisol alpin
Adapté de Vonder Mühl, 1993

2.5.6 Formation

Comment se crée un pergélisol alpin ou un glacier rocheux ? Différentes théories existent, dont certaines sont contestées. Pour certains, les pergélisols alpins sont les «restes» d'un retrait glaciaire (e.g. Potter 1972 ; Steig *et al.* 1998). Ce sont les épaisses lentilles de glace, trouvées dans les pergélisols alpins, qui ont conduit certains géomorphologues à penser que ces pergélisols pouvaient être d'origine glaciaire.

Pour d'autres, c'est une formation propre à certaines conditions climatiques et géologiques (e.g. Wahrhaftig & Cox 1959 ; Haeberli 1985, 1989 ; Barsch 1987, 1988, 1996 ; Haeberli & Vonder Mühl 1996) et les plus prudents optent pour les deux modes de formation, combinés ou non. Par exemple, les moraines sont pergélées par contact avec le glacier.

La formation des pergélisols alpins et des glaciers rocheux sera reprise en détail au chapitre 11.

2.5.7 Les glaciers rocheux

Un glacier rocheux pourrait, en quelque sorte, être défini comme un pergélisol alpin fluant sous l'effet de la gravité. En fait, un glacier rocheux a une morphologie particulière qui implique une teneur en glace élevée car c'est la viscosité de la glace qui détermine des vitesses de fluage élevées et, par conséquent, des formes qui sont celles de la plupart des matériaux visqueux soumis à la gravité : forme lobée ou en langue. Le terme de *glacier rocheux* vient ainsi de ses formes qui s'apparentent à celles d'un glacier. Cependant les formes d'un glacier rocheux s'apparentent plus à celles des laves volcaniques qu'à celles de glaciers recouverts de débris qui ont une surface chaotique et une section transversale plutôt concave. La rhéologie des glaciers rocheux et des laves volcaniques est celle d'un mélange de composants rigides et plastiques (la glace). Les photographies de la figure 2-34 montrent quelques glaciers rocheux des Alpes.

Une moraine peut être pergelée sans présenter la morphologie d'un glacier rocheux. Elle peut aussi se transformer en glacier rocheux. Dans le premier cas, sa teneur en glace est trop faible pour induire des vitesses de fluage suffisantes à la formation d'un glacier rocheux.

La surface d'un glacier rocheux est, en général, constituée d'une couche d'éboulis de granulométrie grossière. Dans certain cas, elle peut être légèrement végétalisée.



2-34 Quelques glaciers rocheux des Alpes

- ① Val Sassa, Parc national de l'Engadine, Suisse. © Photo Office fédéral de topographie.
- ② Bas glacier rocheux de Reichenkar, Stubai, Autriche. Photo Université Innsbruck.
- ③ Vallon d'Arbole près d'Aoste, Italie. Photo Dysli.

2.5.8 Âge des pergélisols alpins et des glaciers rocheux

Quand les pergélisols alpins et les glaciers rocheux se sont-ils formés ? Si le pergélisol est d'origine glaciaire, ce qui est, probablement, rarement le cas, la réponse est simple : la période du retrait glaciaire. Dans les Alpes, ces pergélisols peuvent provenir du Dryas Récent (11-12'000 ans BP) ou du présent retrait qui a débuté à la fin du Petit âge glaciaire (env. 1850 AD). Pour les autres, à savoir et probablement la majorité, la réponse est plus difficile. Elle nécessite l'analyse des isotopes de la glace et de divers éléments chimiques et organiques contenus dans la matière minérale (voir § 2.2). La formation de nombreux de ces pergélisols a débuté au Dryas Récent. Par exemple, l'analyse des pollens d'un échantillon prélevé à 6 mètres de profondeur dans un des forages réalisés dans le glacier rocheux de Murtèl-Corvatsch, a donné un âge

compris entre 8'000 et 2'000 BP. Le plus jeune âge a été confirmé par des analyses au ^{14}C (Haeberli *et al.* 1999).

Dans la même région, près du col du Julier, Regula Frauenfelder *et al.* (2001) ont montré que la formation de glaciers rocheux avait débuté entre 3'000 et 5'000 BP. Ils ont utilisé une technique très différente des analyses d'isotopes et d'autres éléments chimiques ou organiques. Ils ont en effet utilisé des photogrammétriques et une mesure de l'altération des roches par un scléromètre.

2.5.9 Fonte des pergélisols alpins

Aujourd'hui (2005), deux phénomènes contribuent à la fonte des pergélisols alpins.

Le premier phénomène, le plus important, est le *réchauffement du climat*. Depuis la fin du Petit âge glaciaire (1550 à 1850 environ), le climat des régions alpines se réchauffe. Pour les Alpes et des altitudes comprises entre 1600 et 2500 m, cet accroissement de température a été d'environ 1° C de 1900 à aujourd'hui. La conséquence première de ce réchauffement est le retrait des glaciers et la fonte des pergélisols alpins, le premier pouvant être la cause du second.

Le second phénomène découle de la *chaleur produite par les constructions établies sur les pergélisols alpins*. Elle peut provenir d'un chauffage intérieur ou de la radiation solaire reçue par ces constructions. Cette chaleur fait fondre le pergélisol, ce qui peut avoir des conséquences néfastes pour leur pérennité. Des solutions techniques adaptées aux pergélisols de montagne doivent donc être trouvées si l'on veut éviter des désordres dans ces constructions. Les constructions les plus touchées par cette fonte sont les refuges destinés à la pratique de l'alpinisme, les gares supérieures d'installations de remontée mécanique, les pylônes de ces installations, et les ouvrages d'aménagements hydroélectriques comme des prises d'eau.

Le problème de la fonte des pergélisols alpins sera discuté un peu plus en détail au chapitre 11.

2.6 Modèles mathématiques fondamentaux

Avant de présenter l'état des connaissances actuelles en matière de modélisation numérique des phénomènes du gel et du dégel des sols, il n'est pas inutile de discuter rapidement des principaux modèles de base pouvant être utilisés dans cette dernière. Cela évitera de répéter plusieurs fois certaines équations fondamentales. En outre, certaines particularités de ces modèles, qui ne sont pas toujours bien connues, vont être exposées.

Les unités des différentes variables utilisées sont données à titre d'exemple.

2.6.1 Diffusion thermique

2.6.1.1 Equations

La loi de Fourier donnée par la relation (2-9), est utilisée pour la modélisation numérique de la diffusion thermique dans un solide. Par simplification, dans les équations qui suivent, la conductivité thermique k a été admise constante dans toutes les directions.

$$q = -k \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2-9)$$

avec : q = flux thermique [$\text{J}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$]
 k = conductivité thermique [$\text{J}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]
 T = température [K ou °C]

La conductivité thermique k peut dépendre de la température. Le signe négatif indique qu'un flux thermique positif dans la direction x , est donné par un accroissement de température T dans cette direction $\partial T/\partial x < 0$.

Dans un système cartésien x,y,z , l'équilibre des flux thermiques à l'intérieur d'un solide conduit à l'équation de la diffusion thermique en régime transitoire :

$$k \cdot \nabla^2 T = -q_{\text{int}} + C \frac{\partial T}{\partial t} \quad (= 0 \text{ en régime permanent}) \quad (2-10)$$

avec : ∇^2 = laplacien
 q_{int} = flux thermique volumique sans effet de capacité thermique [$\text{J}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-3}$]
 C = capacité thermique volumique [$\text{J}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$]

La capacité thermique volumique C peut dépendre de la température.

L'équation (2-10) doit satisfaire aux deux conditions aux limites générales suivantes :

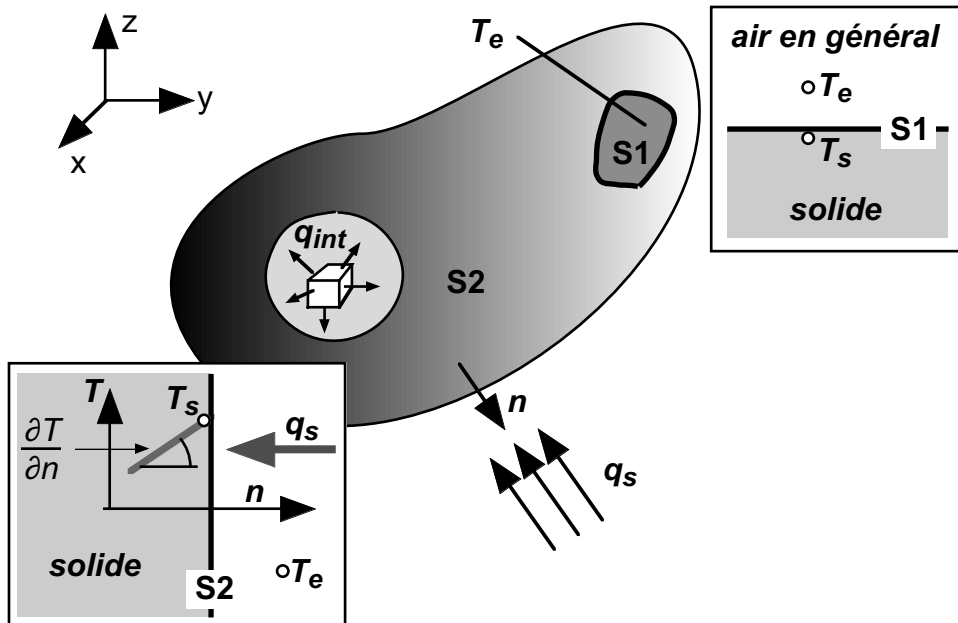
$$T|_{S1} = T_e \quad (2-11)$$

avec : $T|_{S1}$ = température sous la surface limite $S1$
 T_e = température externe (environnementale)

$$k \cdot \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{S2} = q_s \quad (2-12)$$

avec : n = direction normale à la surface $S2$
 q_s = flux thermique entrant [$J \cdot s^{-1} \cdot m^{-2}$]
 $S2$ = surface où pénètre le flux q_s

Le solide et les surfaces $S1$ et $S2$ sont définies par la figure 2-35.



2-35 Corps soumis à un transfert de chaleur

Diverses conditions aux limites particulières sont utilisées fréquemment dans les problèmes de transfert de chaleur, à savoir :

2.6.1.2 Températures en des points ou sur des surfaces

Dans ce cas, les températures sont données, en des points de la surface du solide ou sur des zones de cette surface désignées par $S1$ sur la figure 2-35. L'équation (2-11) est alors valable.

2.6.1.3 Flux thermiques externes

Des flux thermiques sur les limites du modèle peuvent être définis sur des surfaces désignées par $S2$ sur la figure 2-35 et par l'équation (2-12).

2.6.1.4 Flux thermiques internes

C'est le flux q_{int} de l'équation (2-10). Il peut dépendre de la température et être positif (apport de chaleur à l'intérieur du solide) ou négatif (perte de chaleur). Un changement de phase peut être considéré comme un flux interne.

2.6.1.5 Limite convective

Elle est incluse dans l'équation (2-12), et s'exprime par la relation :

$$q_s = h_c (T_e - T_s) \quad (2-13)$$

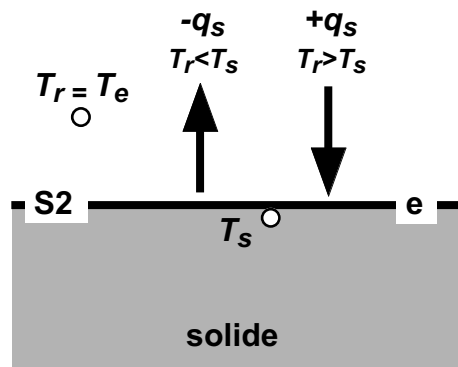
avec : h_c = coefficient de convection [$\text{J}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$] dépendant de différents facteurs dont, surtout, la vitesse du vent.

T_s = température sous la surface du solide (inconnue).

Si $T_e > T_s$ un flux thermique pénètre dans le solide. Dans le cas contraire, le solide perd de la chaleur.

2.6.1.6 Limite radiative

Elle est incluse dans l'équation (2-12) et ses paramètres sont définis sur la figure 2-36.



2-36 Condition aux limites radiative

Elle s'exprime par la relation :

$$q_s = \sigma_{SB} \cdot em \cdot (T_r^4 - T_s^4) \quad (2-14)$$

avec : q_s = flux thermique [$\text{J}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$]

σ_{SB} = constante de Stefan-Boltzmann = $5,68 \cdot 10^{-8}$ [$\text{J}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$]

em = émissivité (0 à 1) ; peut être fonction de la température

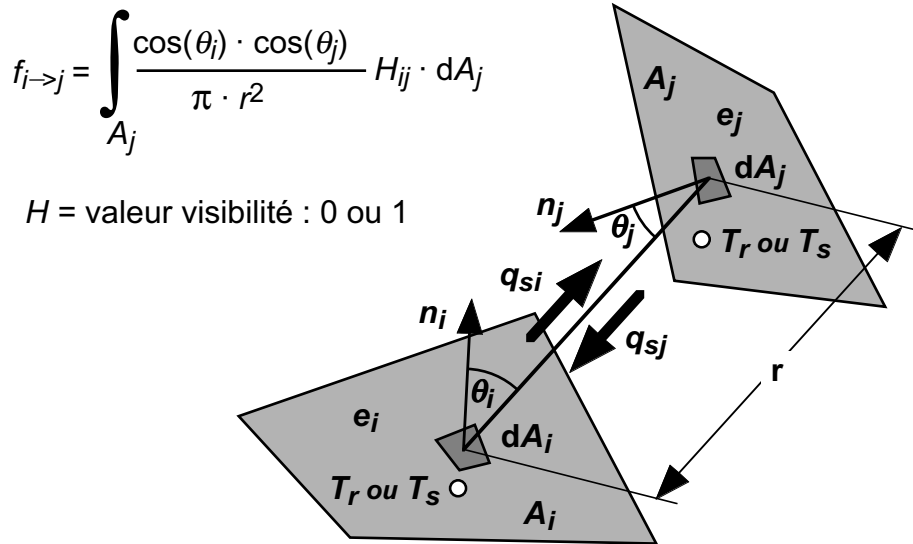
T_r = température de la source radiative (connue) [K].

T_s = température sous la surface du solide (inconnue) [K].

Si $T_r > T_s$ un flux thermique pénètre dans le solide. Dans le cas contraire, le solide perd de la chaleur.

2.6.1.7 Limite de type « radiosité »

Le terme radiosité vient de la production d'images de synthèse où il faut simuler les effets d'émission et de réflexion de la lumière. La figure 2-37 décrit les paramètres définissant ce type de condition aux limites.



2-37 Condition aux limites de type "radiosité"

Une condition aux limites de type « radiosité » s’exprime par la relation (2-15) qui est presque la même que celle définissant une limite radiative :

$$q_s = \sigma_{SB} \cdot f \cdot em \cdot (T_r^4 - T_s^4) \tag{2-15}$$

- avec : q_s = flux thermique [$J \cdot s^{-1} \cdot m^{-2}$]
- σ_{SB} = constante de Stefan-Boltzmann = $5,68 \cdot 10^{-8}$ [$J \cdot s^{-1} \cdot m^{-2} \cdot K^4$]
- f = facteur de forme modélisant l’interaction entre les deux surfaces A_i et A_j [-]
(appelé aussi facteur de « vue » ou facteur d’« angle ») (voir fig. 2-37)
- em = émissivité [-] (0 à 1) ; peut être fonction de la température
- T_r = température connue de la source radiative [K]
- T_s = température sous la surface du solide (inconnue) [K].

2.6.1.8 Changement de phase

Il n’est pas à proprement parler une condition aux limites. Il peut être introduit par une augmentation brutale de la capacité thermique C autour de la température du changement de phase ou par un flux interne q_{int} .

2.6.2 Ecoulements à potentiel de vitesse

2.6.2.1 Equations

La loi de Darcy (1856) donnée par la relation (2-16), est utilisée pour la modélisation numérique des écoulements dans les milieux poreux qu’ils soient saturés ou non. Par simplification, dans les équations qui suivent, la conductivité hydraulique, dénommée aussi perméabilité, k_D a été admise constante dans toutes les directions.

$$v = k_D \cdot i \quad (2-16)$$

avec : v = vitesse du fluide (eau) [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]
 k_D = conductivité hydraulique de Darcy ou perméabilité [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]
 i = gradient hydraulique

Dans un système cartésien x,y,z , l'équilibre des flux hydrauliques à l'intérieur du milieu poreux conduit au même type d'équation que celui de la diffusion thermique, à savoir une équation de Laplace (1782) avec second membre en régime non permanent, qui est en fait une équation de Poisson (1833) :

$$\nabla^2 h = -q_{D\text{int}} + \frac{1}{k_D} \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (= 0 \text{ en régime permanent}) \quad (2-17)$$

avec : h = charge hydraulique = $z + u / \gamma_w$ [m]
 z = élévation [m]
 u = pression interstitielle [$\text{kPa} = \text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$]
 γ_w = poids volumique de l'eau [$\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$]
 θ = teneur en eau volumique [-]
 $q_{D\text{int}}$ = flux hydraulique appliqué à l'intérieur du milieu poreux.

On peut démontrer (voir par exemple Dysli, 1991a), que l'équation (2-17) peut aussi s'écrire :

$$\nabla^2 h = q_{D\text{int}} + \frac{1}{k_D} \cdot m_v \cdot \gamma_w \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{1}{c_v} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2-18)$$

avec : m_v = coefficient de compressibilité volumétrique [kPa^{-1}]
 c_v = coefficient de consolidation [$\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$]

La correspondance des termes de l'équation de la diffusion thermique avec ceux de l'équation des écoulements souterrains est donnée par le tableau 2-38. Cette correspondance est importante car un code numérique du type « diffusion thermique » peut être utilisé presque sans modification pour la simulation d'un écoulement souterrain.

2-38 Correspondance des termes des équations de la diffusion thermique et des écoulements souterrains

Diffusion thermique	Écoulements souterrains
T = température	h = charge hydraulique
C = capacité thermique volumique	$m_v \cdot \gamma_w$
k = conductivité thermique	k_D = conductivité hydraulique

L'équation (2-18) doit satisfaire aux deux conditions aux limites générales suivantes qui sont un peu les mêmes que celles de l'équation de la diffusion thermique (2-10) :

$$h \Big|_{S1} = h_e \quad (2-19)$$

avec : $h \Big|_{S1}$ = charge hydraulique sous la surface limite S1
 h_e = charge hydraulique externe

$$k_D \cdot \frac{\partial h}{\partial n} \Big|_{S2} = q_D \quad (2-20)$$

avec : n = direction normale à la surface S2
 q_D = flux hydraulique entrant [$m \cdot s^{-1}$]
 $S2$ = surface où pénètre le flux q_D

Par analogie, les surfaces S1 et S2 peuvent aussi être définies par la figure 2-35.

Diverses conditions aux limites particulières sont utilisées fréquemment dans les problèmes d'écoulement dans les milieux poreux, à savoir :

2.6.2.2 Charge hydraulique en des points ou sur des surfaces

Dans ce cas, les charges hydrauliques sont données, en des points de la surface du solide ou sur des zones de cette surface désignées par S1. L'équation (2-19) est alors valable.

2.6.2.3 Flux hydraulique externe

Il est défini par l'équation (2-20), et peut être prescrit en un point ou sur une surface S2.

2.6.2.4 Flux hydraulique interne

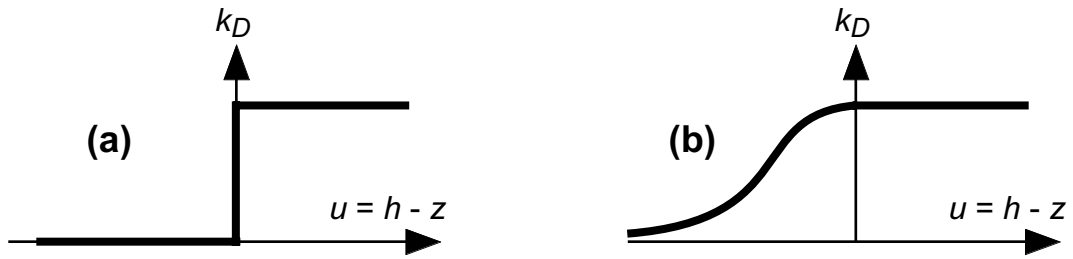
C'est le terme q_{Dint} des équations (2-17) et (2-18).

2.6.2.5 Surface phréatique

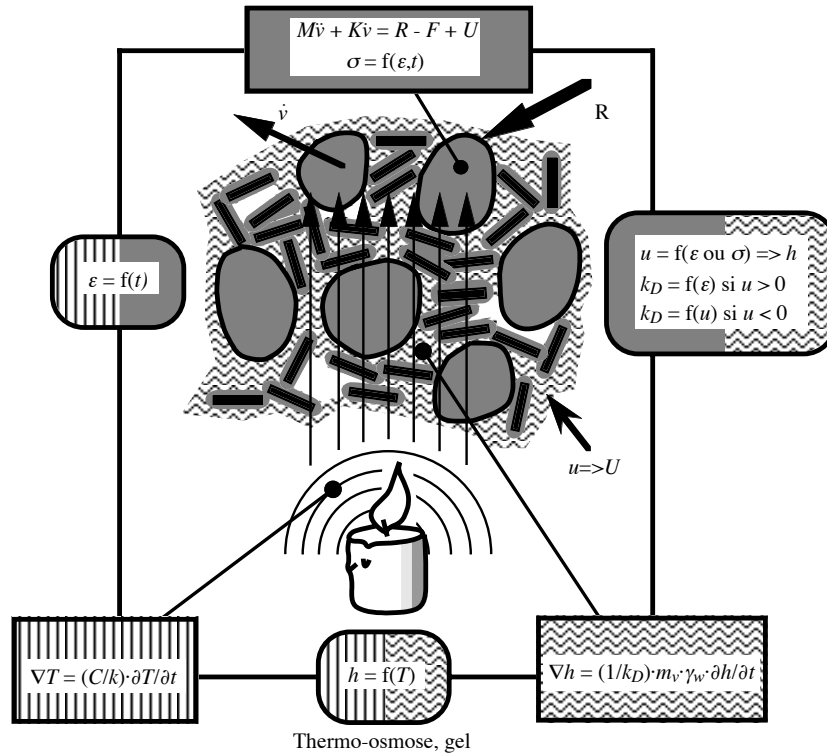
Une limite particulière est donnée par la relation $u = 0$. Dans les sols, c'est la surface phréatique dénommée aussi surface piézométrique. Cette limite est fixée par une relation entre la conductivité hydraulique k_D et la pression interstitielle u . La figure 2-39 illustre les deux façons d'introduire cette limite dans un modèle numérique. La première (a) est la plus simple mais elle ne permet pas de simuler le milieu non saturé qui se trouve au-dessus de la nappe. La seconde (b) permet au contraire cette simulation ; il faut alors connaître la relation $k_D = f(u)$ pour $u < 0$. Cette relation est empirique.

2.6.3 Couplage

Les phénomènes du gel et du dégel des sols sont, avant tout, le résultat d'un couplage entre la diffusion thermique et l'écoulement de l'eau dans le milieu poreux non saturé qu'est un sol. La figure 2-40 montre la plupart des couplages que l'on peut rencontrer dans un sol.



2-39 Introduction de la nappe phréatique



2-40 Les principaux couplages dans un sol (Dysli, 1991a)

2.6.4 Détermination des relations et paramètres empiriques

Plusieurs relations empiriques sont utilisées dans les couplages décrits par la figure 2-40. Certaines intéressent particulièrement le problème du gel et du dégel. Ce sont :

- La relation donnant la teneur en eau non gelée en fonction de la température.
- La relation permettant d'estimer, dans un sol non saturé, la pression interstitielle en fonction de la teneur en eau non gelée.
- La relation évaluant la conductivité hydraulique en fonction de la pression interstitielle, ceci pour le sol non saturé.

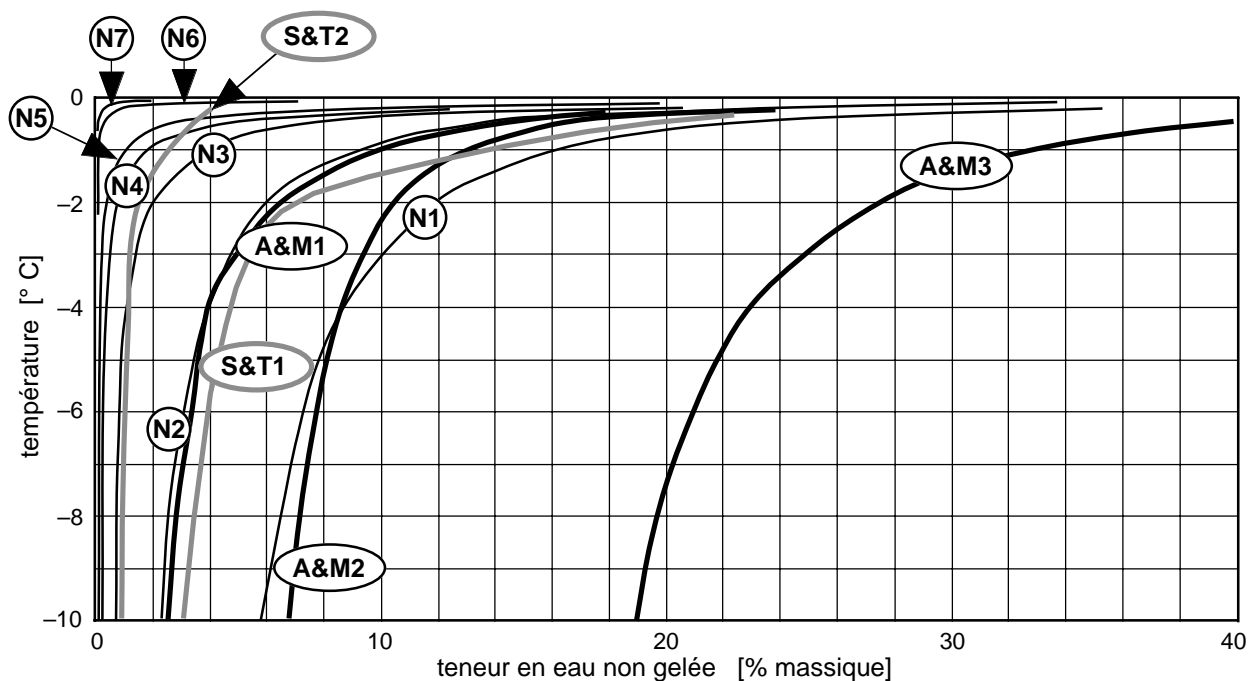
Toutes ces relations sont déterminées en laboratoire par différentes méthodes qui vont être brièvement discutées après.

2.6.4.1 Teneur en eau non gelée en fonction de la température

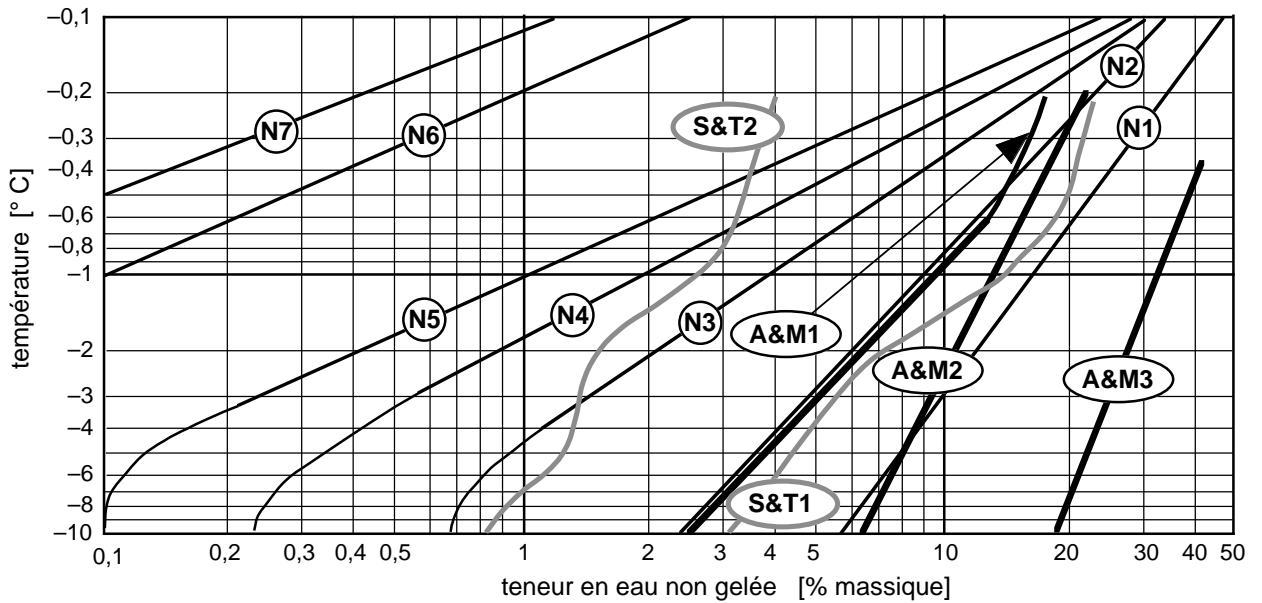
La relation teneur en eau non gelée w_u en fonction de la température négative T est très importante et est à la base du phénomène de la formation des lentilles de glace dans les sols. Plusieurs méthodes sont utilisées pour la déterminer dont la « Time Domain Reflectometry » : TDR et la « Nuclear Magnetic Resonance » : NMR. Les principes de la méthode TDR, utilisée pour la recherche faisant l'objet de ce rapport, sont donnés au chapitre 4. La méthode NMR détermine l'état de l'eau contenue dans un sol dû à l'interaction entre un champ magnétique et les dipôles magnétiques nucléaires. Smith et Tice (1988) donnent plus de détails sur ces deux techniques. La figure 2-42 est un florilège de cette relation pour différents sols, ceci dans un espace géométrique et la figure 2-43 montre ces mêmes relations dans un espace doublement logarithmique. Le tableau 2-41 décrit les sols figurant sur les figures 2-42 et 2-43.

2-41 Sols des figures 2-42 et 2-43

Sols norvégiens Nordal & Refsdal, 1989	Anderson & Morgenstern, 1973	Smith et Tice, 1988
N1 argile CH	A&M1 limon argileux	S&T1 limon argileux
N2 argile limoneuse CM	A&M2 argile limoneuse	S&T2 gravier limoneux
N3 limon argileux CL	A&M3 argile CH	
N4 limon ML		
N5 limon ML avec sable		
N6 sable morainique SW		
N7 sable et gravier SM à GM		



2-42 Florilège de la relation $w_u = f(T)$ pour différents sols – échelles géométriques



2-43 Florilège de la relation $w_u = f(T)$ pour différents sols – échelles logarithmiques

On peut exprimer cette relation par l'équation :

$$w_u = \alpha \cdot (-T)^\beta \tag{2-21}$$

α et β étant des paramètres caractéristiques du sol.

Quelques exemples de la relation (2-21), pour des sols d'infrastructure, sont donnés sur le tableau 2-44 (Bigl & Berg, 1996b).

2-44 Quelques constantes α et β pour la teneur en eau non gelée

Bigl & Berg, 1996

Sols		USCS	w_L [%]	I_p [%]	matière organique [%]	α	β
Sable	argileux	SC	30,6	10,6	1,1	10,038	-0,250
Limon	argileux sableux	CL	31,2	14,3	1,4	9,285	-0,369
Limon	argileux sableux	CM	37,0	18,5	1,5	11,085	-0,274
Limon argileux sableux		CL	26,4	19,9	0,7	8,121	-0,303

Dans un graphique doublement logarithmique, cette équation est une droite. La figure 2-43 est une transposition du graphique de la figure 2-42 dans ce type de graphique. On y constate que les sols norvégiens et ceux examinés par Anderson et Morgenstern (1973) répondent bien à l'équation (2-21), ceci à l'exception des teneurs en eau très faibles ; ce n'est, par contre, pas le cas pour ceux examinés par Smith et Tice (1988).

2.6.4.2 Pression interstitielle en fonction de la teneur en eau

C'est la pression interstitielle négative qui nous intéresse, à savoir la succion capillaire ou le potentiel capillaire ou matricielle $\psi = u_a - u_w$, avec u_w = pression de l'eau interstitielle et u_a = pression de l'air. Ce potentiel s'exprime en pF (\log_{10} de la hauteur d'eau en centimètres correspondant à la succion) ou en unité de pression, kPa par exemple. La teneur en eau est soit la teneur massique w , soit la teneur volumique θ . La teneur en eau est souvent remplacée par le degré de saturation.

Ce type de relations, que l'on appelle la *courbe caractéristique de sol-eau* (SWCC : Soil Water Characteristic Curve) ou, parfois, *courbe de rétention sol-eau*, est connu depuis longtemps pour différents types de sol. C'est Buckingham (1907) qui a déterminé, pour la première fois, cette relation pour divers types de sols (fig. 2-45), mais c'est probablement Shofield (1935) qui l'a déterminée par des essais proches de ceux réalisés aujourd'hui et qui l'a présentée sous sa forme actuelle.

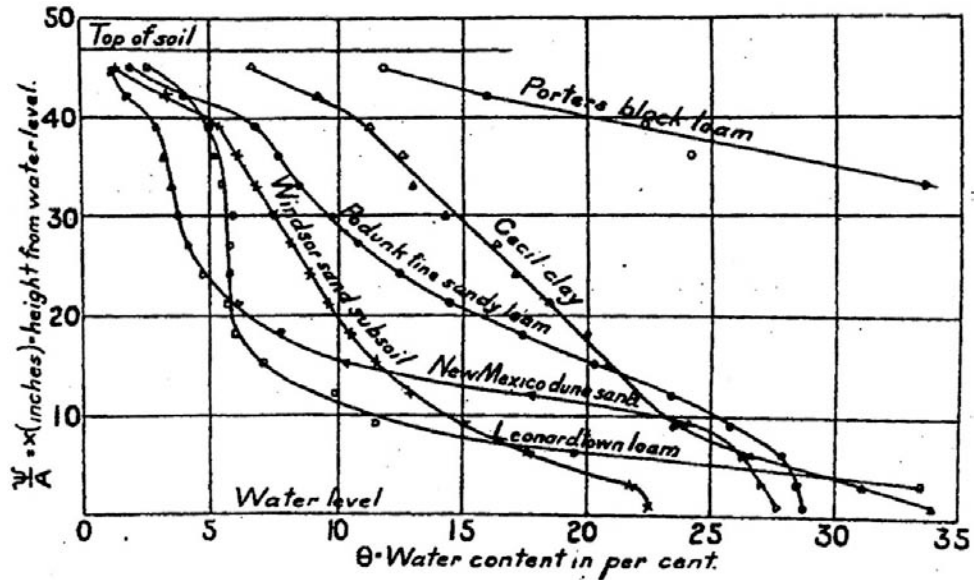
Il existe plusieurs méthodes pour obtenir ces relations, à savoir la marmite à pression, l'œdomètre, l'essai triaxial, un appareil spécialement conçu pour ce type de détermination, comme celui de Fredlund (Vanapalli, Fredlund & Pufahl, 1999) qui est un œdomètre avec contrôle de la pression d'air, voire une petite centrifugeuse (Khanzode, Fredlund & Vanapalli, 2000). La figure 2-46 est un exemple de cette relation pour un sol limoneux. Sur cette figure, la succion est représentée en échelle logarithmique et en échelle arithmétique. La pression d'entrée d'air, à savoir la pression d'air nécessaire requise pour que l'air puisse traverser la totalité des pores du sol, est définie sur le diagramme semi-logarithmique. On voit que le mode de représentation est important : Dans la représentation arithmétique, la pression d'entrée d'air n'est presque plus perceptible. La figure 2-47 montre les courbes caractéristiques sol-eau de quelques sols caractéristiques (diverses sources dont en particulier Yong et Warkentin, 1975).

2.6.4.3 Conductivité hydraulique en fonction de la pression interstitielle

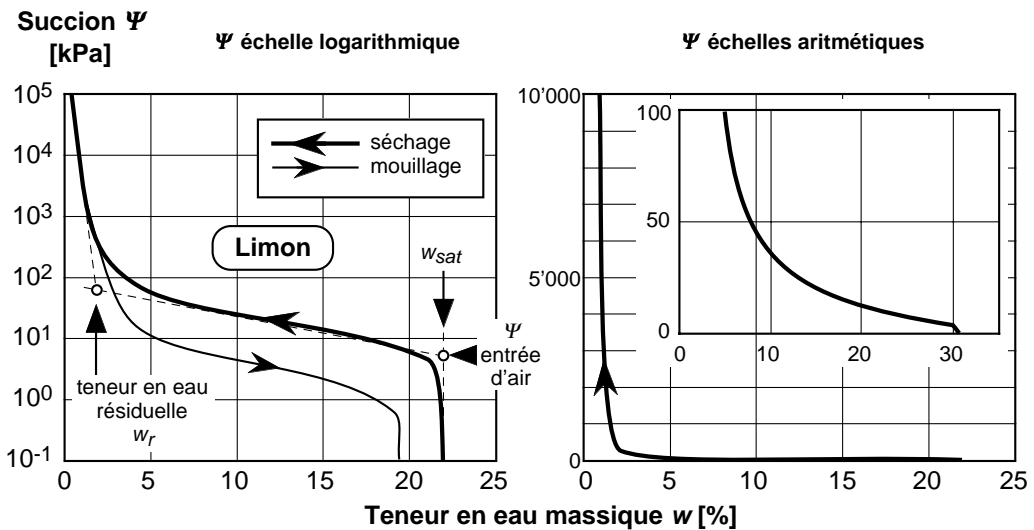
C'est toujours la pression interstitielle négative qui nous intéresse, à savoir la succion capillaire. On commence par déterminer la relation entre la conductivité hydraulique et la teneur en eau (ou le degré de saturation). La mesure se fait soit en régime permanent, soit en régime transitoire. En régime permanent, la différence de potentiel capillaire est mesurée par deux tensiomètres et le débit est mesuré par la variation du volume d'eau dans les deux tubes capillaires alimentant le dispositif de mesure. La détermination de la teneur en eau de l'échantillon correspondant à cette conductivité est réalisée après l'essai. Les tubes capillaires étant en contact avec l'atmosphère, la succion maximale ne peut dépasser environ 60 kN.m^{-2} . La mesure en régime transitoire se fait dans la marmite à pression. Avec ce dispositif, on mesure la vitesse avec laquelle l'eau contenue dans l'échantillon de sol non saturé s'en échappe. Une pression d'air est appliquée dans la marmite et l'on mesure la perte d'eau en fonction du temps par lecture du déplacement du ménisque dans le tube connecté à la céramique poreuse. Lorsqu'il n'y a plus de mouvement d'eau dans le tube on augmente la pression et l'on répète les mesures. Les pas de pression doivent être

assez petits pour que l'on puisse admettre que la conductivité hydraulique est constante pendant le pas.

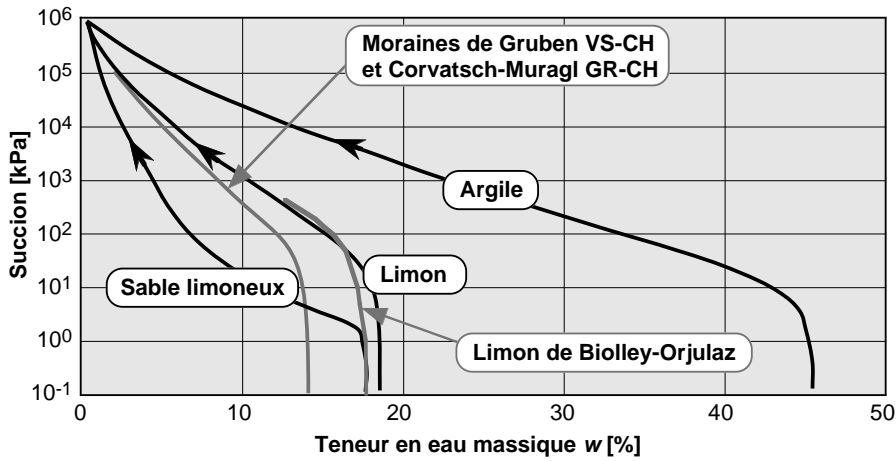
Ensuite, on passe de la teneur en eau à la succion capillaire par une relation du type de celles montrées sur la figure 2-46. La figure 2-48, adaptée de Dysli (1991a), est un exemple de cette relation pour un limon.



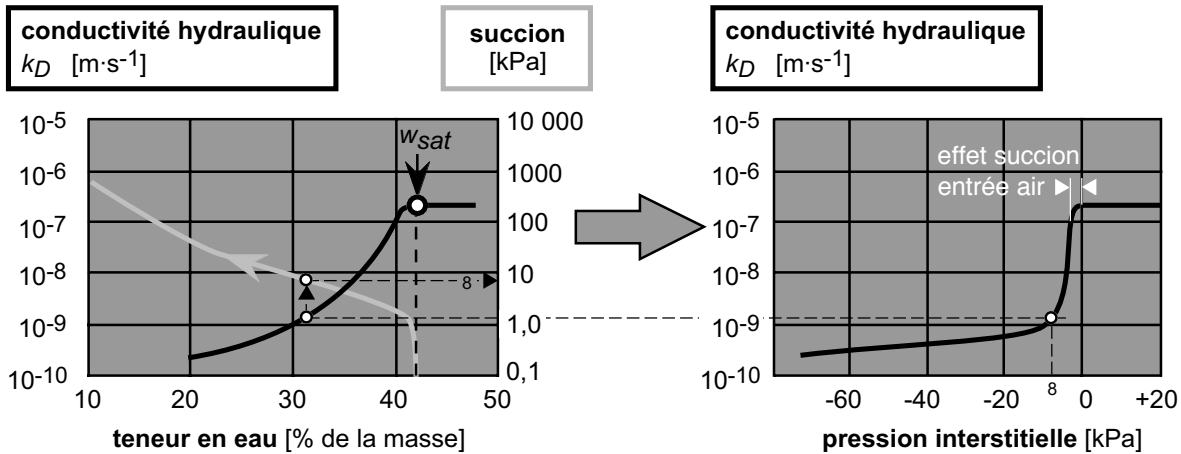
2-45 Courbes de rétention sol-eau (SWCC) déterminées par Buckingham (1907)



2-46 Succion capillaire en fonction de la teneur en eau



2-47 Succion capillaire en fonction de la teneur en eau pour quelques sols



2-48 Conductivité hydraulique en fonction de la pression interstitielle pour un limon

2.6.5 Bilan énergétique à la surface du sol

Pour les problèmes concernant ce rapport, à savoir les infrastructures routières et ferroviaires et les pergélisols alpins, la limite supérieure des modèles est la surface de la route, du ballast ou du sol. En ce qui concerne les transferts de chaleur, c’est une limite qui doit satisfaire l’équation (2-12) ; elle est en outre convective (§ 2.6.1.5) et radiative (§ 2.6.1.6). Les radiations provenant du ciel peuvent aussi être simulées par une condition aux limites du type « radiosité » (§ 2.6.1.7). Une bonne connaissance du bilan énergétique à la surface du sol est primordiale. Ce bilan est décrit par la figure 2-49 qui traite du dégel d’un sol mais qui est aussi applicable au gel. Sur cette figure, les sens des flux sont ceux les plus courants ; ils peuvent cependant être inversés selon les conditions atmosphériques. La convection peut, par exemple, apporter de la chaleur au sol (foehn).

La couche de contact peut être, par exemple, une couche de neige ou de végétation. Lorsque la période de dégel commence, la température à la surface du sol augmente de T_0 à T_f , et, à ce

moment, le dégel du sol commence. Au début d'une saison froide, T_s diminue jusqu'à T_f , et le gel commence ; la température à la surface du sol tend alors à nouveau vers la température initiale T_0 . Par ce moyen, dans un modèle numérique, on peut calculer la température de la surface du sol T_s .

Le flux thermique total q_T [$W \cdot m^{-2}$] sur la surface supérieure de la couche de contact s'exprime par la relation (2-22), adaptée de Dysli, Lunardini, Stenberg (1997).

$$q_T = q_{ID} + q_A + q_{L_{\downarrow}} + q_h + q_{L_{\uparrow}} + q_e + q_{bc} \quad (2-22)$$

Les termes de cette équation sont définis sur la figure 2-49.

Appelons maintenant $q_N = q_{ID} + q_A + q_{L_{\downarrow}} + q_{L_{\uparrow}}$ la radiation nette et $q_s = q_N + q_e + q_{bc}$ le flux thermique provenant de toutes les radiations et autres sources de chaleur, autres que celle provoquée par la convection : $q_T = q_s + q_h$. On peut alors définir une température équivalente T_e qui permet de négliger la surface de contact, par les relations :

$$q_T = q_s + q_h = q_s + h_c' (T_a - T_c) = h_c' (T_e - T_c) = h_c (T_c - T_s) \quad (2-23)$$

$$\text{ainsi } T_e = \frac{q_s}{h_c'} + T_a$$

avec : h_c' = coefficient de convection sur la surface

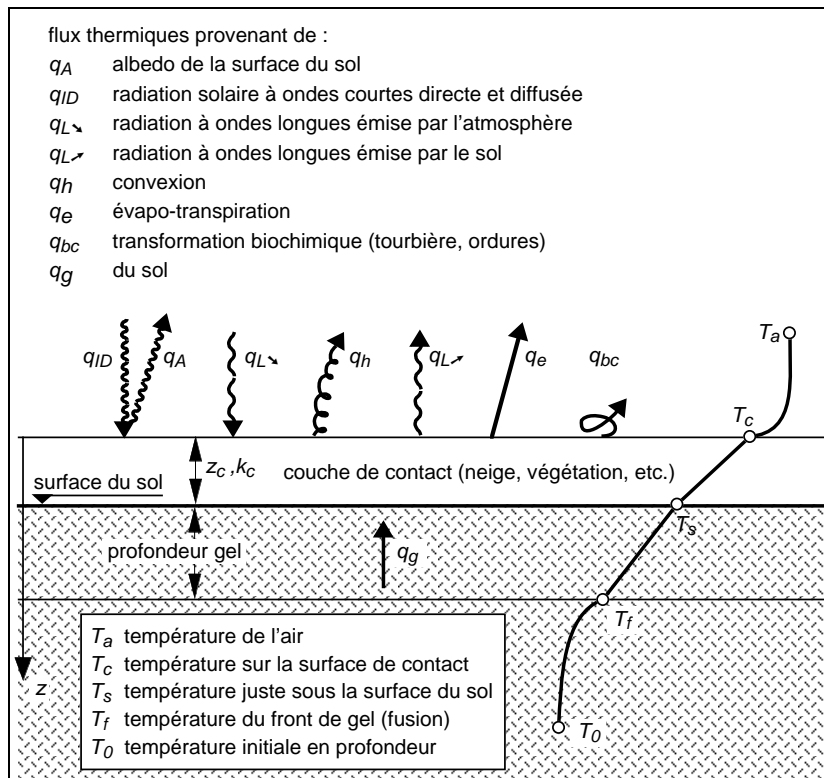
h_c = coefficient de convection de la couche de contact = $1 / (1/h' + z_c/k_c)$

z_c = épaisseur de la couche de contact

k_c = conductivité thermique de la couche de contact.

Les radiations à ondes courtes et longues peuvent être calculées en utilisant des méthodes décrites par Berg et Aitken (1973), Black (1956), Bolsenga (1964), Brunt (1932) et Gerdel, Diamond et Walsh (1954), résumées par Lunardini (1981). Les autres flux (sensibles) entre l'atmosphère et le sol ne peuvent être estimés avec précision ; on peut cependant utiliser les équations de Deacon (1949), Scott (1957) et Swingbank (1964). Des détails de ces calculs sont donnés par Ibrahim (1978).

Le coefficient de convection de surface h_c' est le paramètre le plus difficile à estimer car la modélisation des turbulences atmosphériques est le plus souvent inadéquate (Lunardini 1977). Les très nombreuses mesures faites par Dysli et Engel (1982) sur un site des Préalpes au climat très varié, ont cependant démontré, pour ce qui concerne le gel et le dégel des sols, que l'effet du vent était négligeable.



2-49 Bilan énergétique à la surface du sol

2.6.6 Equation de Clapeyron

Pour établir cette importante équation, il faut partir de l'équation de Gibbs (1892) qui définit le potentiel chimique d'une phase d'un corps. Dans notre cas, il s'agit de l'eau avec sa phase liquide et sa phase solide (glace). La condition d'équilibre thermodynamique entre ces deux phases s'exprime en égalant leur potentiel chimique, ou, autrement dit, en égalant l'énergie libre de l'eau à celle de la glace ; l'énergie libre (souvent dénommée : énergie libre de Gibbs) est la part d'énergie d'un système que l'on peut utiliser pour un travail « utile ». Cette condition d'équilibre conduit à l'équation (2-24) dénommée aujourd'hui équation généralisée de Clapeyron (1834)¹ :

$$\frac{du_w}{\rho_w} - \frac{du_i}{\rho_i} = l \frac{T - T_0}{T_0} \quad (2-24)$$

- où :
- u_w = pression de l'eau [kPa] par rapport à la pression atmosphérique de 101 kPa
 - u_i = pression de la glace [kPa] par rapport à la pression atmosphérique
 - T = température au dessous du point de congélation T_0 [K]
 - T_0 = température de congélation [273 K].
 - l = chaleur latente massique de congélation [env. $3,33 \cdot 10^5$ kJ·s⁻¹]
 - ρ_w = masse volumique de l'eau [env. $1,0$ t·m⁻³]
 - ρ_i = masse volumique de la glace [env. $0,917$ t·m⁻³]

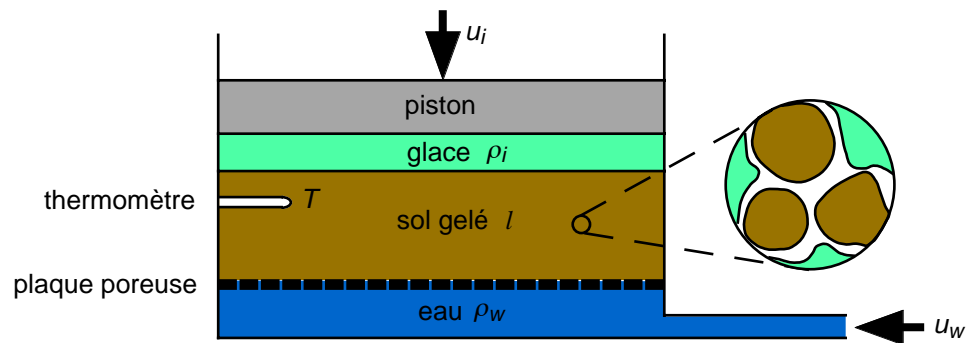
¹ Benoît Paul Emile Clapeyron n'a pas obtenu son équation en passant par l'équation de J. Willard Gibbs car ce dernier n'avait que 5 ans lors de la publication du mémoire de Clapeyron !

Avec une petite approximation, l'équation (2-24) peut se transformer en l'équation (2-25) qui est une forme de l'équation de Clausius-Clapeyron pour les phases de l'eau.

$$\frac{dp}{dT} = \frac{l}{\left(\frac{1}{\rho_w} - \frac{1}{\rho_i}\right)T} = 13500 \text{ kPa} \cdot \text{K}^{-1} \quad (2-25)$$

où : p = pression = dans notre cas : $u_w - u_i$
 dp/dT = pente de la courbe de changement de phase eau-glace dans le diagramme des phases de l'eau (voir Dysli, 1991a).

Dans le cas de la formation des lentilles de glace, l'équation (2-24) s'applique à l'expérience de Miller (1960) schématisée par la figure 2-50, elle-même tirée de Black (1995a).



2-50 Représentation schématique de l'expérience de Miller (1960)

Dans la relation (2-24) il y a trois inconnues : u_w , u_i et T et une seule équation. Cette équation est ainsi seulement décrite quand elle est intégrée et quand deux des variables sont connues. En utilisant les valeurs numériques données en regard des définitions des termes de l'équation (2-24), elle s'écrit :

$$u_w - 1.09 \cdot u_i = 1220 \cdot \Delta T \quad [\text{kPa}] \quad (2-26)$$

En admettant, par exemple, que la pression de la glace correspond à une surcharge, on peut calculer par (2-26) la surcharge qui annule les gonflements ($u_w = 0$); on obtient alors : $u_i = \text{surcharge} = 1120 \cdot \Delta T$, ΔT par rapport à $T_0 = 273 \text{ K}$. Cette pression limite est très élevée : pour une température de -1°C (272 K), elle atteint, sur la base de cette relation théorique, 1120 kPa.

Enfin, en admettant maintenant que c'est la surcharge qui ne varie pas ($u_i = 0$), l'équation (2-26) donne pour la succion la relation : $u_w = 1220 \cdot \Delta T$. L'équation (2-24) explique ainsi la coexistence d'eau non gelée et de glace dans le processus du gel.

2.7 Modélisation numérique du gel

2.7.1 Modèles empiriques

Les *modèles empiriques* sont développés sur la base d'observations empiriques lors d'essais en laboratoire ou de mesures in situ (par ex. : Arakawa 1966 ou Knutson 1973). Certains de ces modèles peuvent être désignés comme semi-empiriques car ils intègrent, dans une certaine mesure, la nature physique des gonflements au gel (Takashi *et al.* 1978, Zhang & Zhu 1983, Chen & Wang 1988, Stenberg 1989, Kulieshius 1991).

Parmi ces modèles, on peut citer les deux plus intéressants, à savoir :

- Celui de Loch (1979) qui a déjà été présenté au paragraphe 2.3.4.
- Celui de Konrad et Morgenstern (1980, 1981) qui a aussi déjà été présenté au paragraphe 2.3.4.

2.7.2 Modèle hydrodynamique

Le *modèle hydrodynamique* couple la diffusion thermique et les transferts de masses. Les codes basés sur ce modèle n'ont pu être développés que lorsque la puissance des ordinateurs a été suffisante. Le premier est celui de Harlan (1973). De nombreuses autres versions de ce modèle ont ensuite été développées (Taylor & Luthin 1978, Sheppard *et al.* 1978, Jansson & Haldin 1979, Fukuda 1982, Fukuda & Nakagawa 1985). Le modèle hydrodynamique le plus élaboré est aujourd'hui celui de Guymon *et al.* (1980, 1993).

Plutôt que d'écrire les équations de ce modèle, nous allons présenter sur la figure 2-51 son ordigramme et discuter, sur le plan pratique, certaines de ses relations.

Sur la figure 2-51, les équations sont uni-dimensionnelles. Dans l'équation des écoulements dans un milieu poreux (2-18) et si le milieu est non saturé, la pression interstitielle, qui est fonction de la teneur en eau non gelée, et la conductivité hydraulique, qui est fonction de la pression interstitielle sont inconnues et doivent être déterminées lors de la boucle de calcul précédente. Cela étant fait, cette équation permet de calculer le débit de l'eau vers le front de gel. La différence du débit entre deux boucles de calcul détermine l'accroissement de la teneur en eau non gelée θ_w qui, elle-même, permet l'estimation de la capacité volumique C , de la chaleur latente L et des conductivités thermiques du milieu gelé k_f et du milieu non gelé k_w . La teneur en eau gelée θ_f est calculée au pas de calcul précédent : $\theta_f = \theta_{wi} - \theta_{wi+1}$. Quant aux conductivités thermiques, elles peuvent être évaluées par la relation empirique (2-27) proposée par Johansen (1975) :

$$k_{f \text{ ou } w} = (k_{sat} - k_{dry})K_e + k_{dry} \quad (2-27)$$

$$\text{avec : } k_{sat} = k_s^{(1-n)} \cdot k_i^{(n-w_w)} \cdot k_w^{w_w}$$

$$k_{dry} = \frac{0,135\gamma_d + 64,7}{2700 - 0,947\gamma_d} \pm 20\%$$

$K_e = \text{Log}S + 1,0$ pour les sols fins non gelée et $K_e = S$ pour les sols gelés

où : n = porosité [-]

S = degré de saturation [-]

w_w = teneur en eau non gelée [-]

γ_d = poids volumique du sol sec [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]

L'équation de la diffusion thermique (2-10) peut alors être utilisée avec l'introduction de la chaleur latente si nécessaire. Elle permet de calculer les températures qui sont ensuite utilisées pour évaluer, au moyen de relations empiriques, la teneur en eau non gelée θ_w et, par cette dernière, la pression interstitielle $u(\theta)$. Cette pression est introduite dans l'équation des écoulements souterrains, dans laquelle elle permet aussi de déterminer la conductivité hydraulique, fonction de cette pression si le milieu est non saturé. La boucle est ainsi bouclée ! Le gonflement en un point donné est calculé au moyen de la somme des différences des teneurs en eau non gelée entre chaque pas de calcul.

2.7.3 Modèle « glace rigide »

Le modèle « *glace rigide* » de gonflement au gel est basé sur la théorie du gonflement secondaire introduite par R. D. Miller (1972). Une lentille de glace se développe à une certaine distance du front de gel et la zone entre ce front et la lentille n'est que partiellement gelée et contient encore de l'eau libre. Dans la théorie du *gonflement secondaire*, Miller utilise l'équation de Bishop et Blight (1963) pour expliquer comment se forme la première lentille de glace. Cette équation est la suivante :

$$\sigma' = \sigma - u_a + \chi(u_a - u_w) \quad (2-28)$$

avec : σ' = contrainte effective

σ = contrainte totale

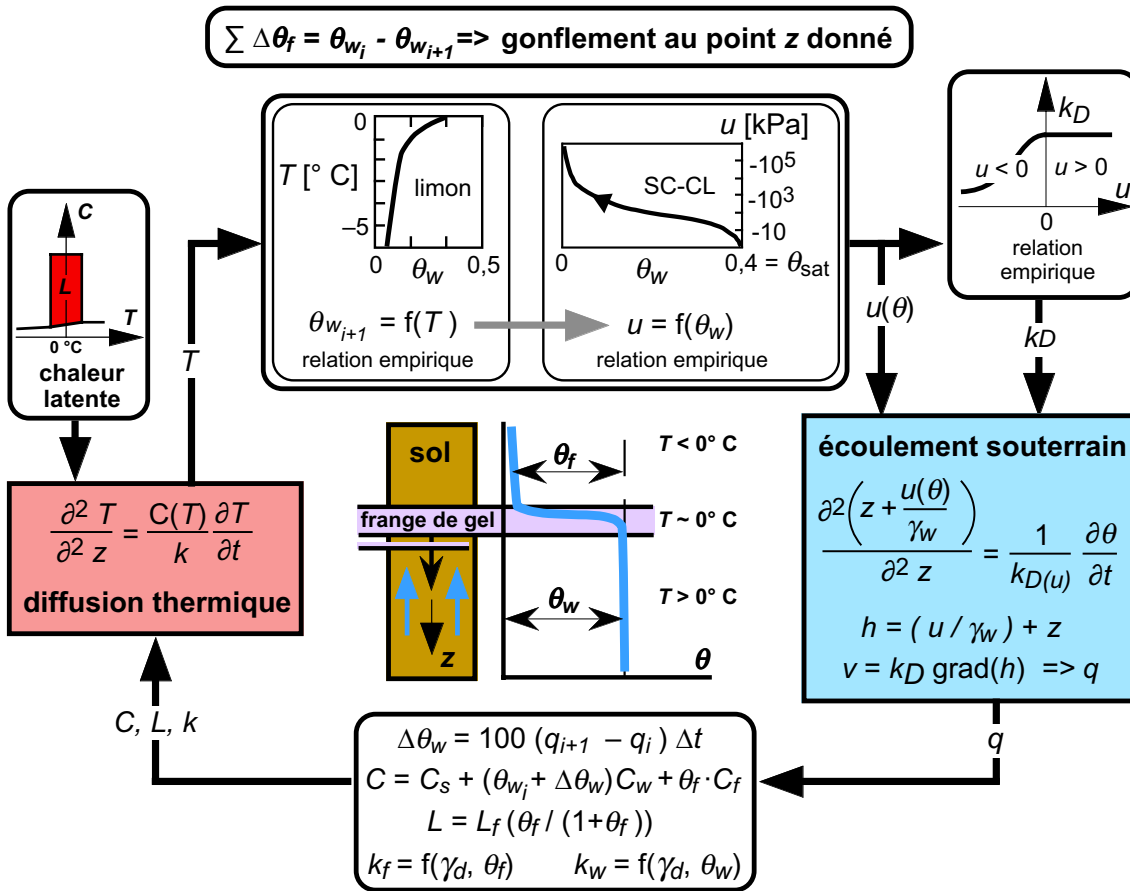
u_a = pression de l'air interstitielle

u_w = pression de l'eau interstitielle

$u_a - u_w$ = succion capillaire

χ = paramètre de Bishop et Blight.

Dans l'équation (2-28) Miller a remplacé la pression de l'air u_a par la pression de la glace u_i . Lorsque l'isotherme 0°C pénètre dans la colonne de sol de la figure 2-52a, l'eau interstitielle gèle, ce qui diminue la contrainte effective σ' ; en effet, la surcharge p , qui représente une certaine épaisseur de sol au-dessus de la colonne, tend à être reprise par la glace plutôt que par les contacts entre les particules du sol.



Les indices ont la signification suivante :

- | | | | |
|---|--------------------------|---|-----------------|
| i | = no du pas de calcul | w | = eau non gelée |
| s | = des particules solides | f | = glace |

2-51 Ordinogramme d'un couplage hydrodynamique

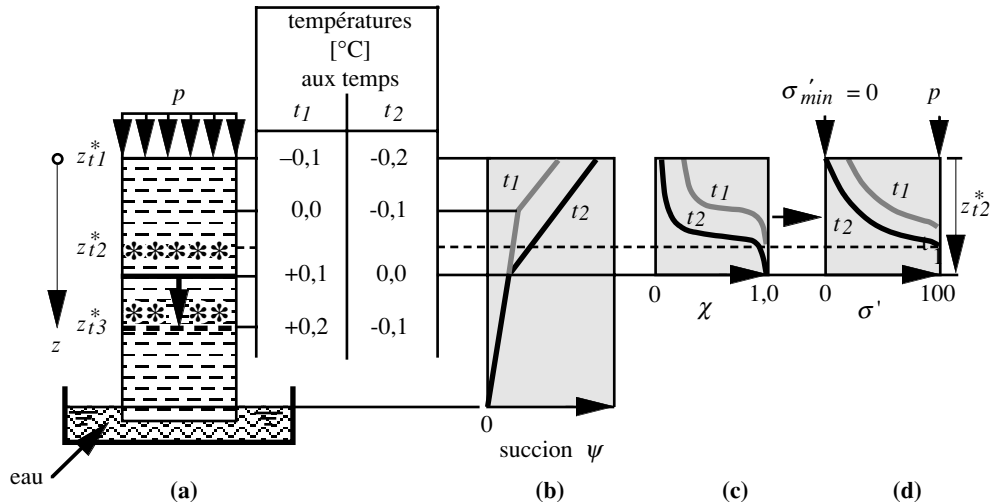
À l'instant t_i , la contrainte effective n'est nulle en aucun endroit de la colonne de sol et aucune lentille de glace ne peut croître. L'isotherme 0°C poursuit sa progression et, au-dessus, la teneur en eau non gelée tend à diminuer car la succion capillaire augmente. À l'instant t_2 , la contrainte effective s'annule juste sous la charge p qui peut alors se mouvoir vers le haut et ainsi permettre à une lentille de glace de se développer au niveau z_{t2}^* juste au-dessus de l'isotherme 0°C . On peut comparer ce phénomène à un renard hydraulique. Sous la lentille ainsi formée, l'isotherme 0°C poursuit sa progression dans la colonne de sol et un même phénomène se répète avec formation d'une nouvelle lentille à la profondeur z_{t3}^* .

La variation de χ et de σ' en fonction de la position de l'isotherme 0°C fait l'objet des figures 2-52c et 2-52d. La variation de χ est tirée de mesures de la teneur en eau à diverses profondeurs, teneur en eau qui est fonction de la succion capillaire donnée à la figure 2-52b :

$$\chi = \theta_w / (\theta_w + \theta_f) \tag{2-29}$$

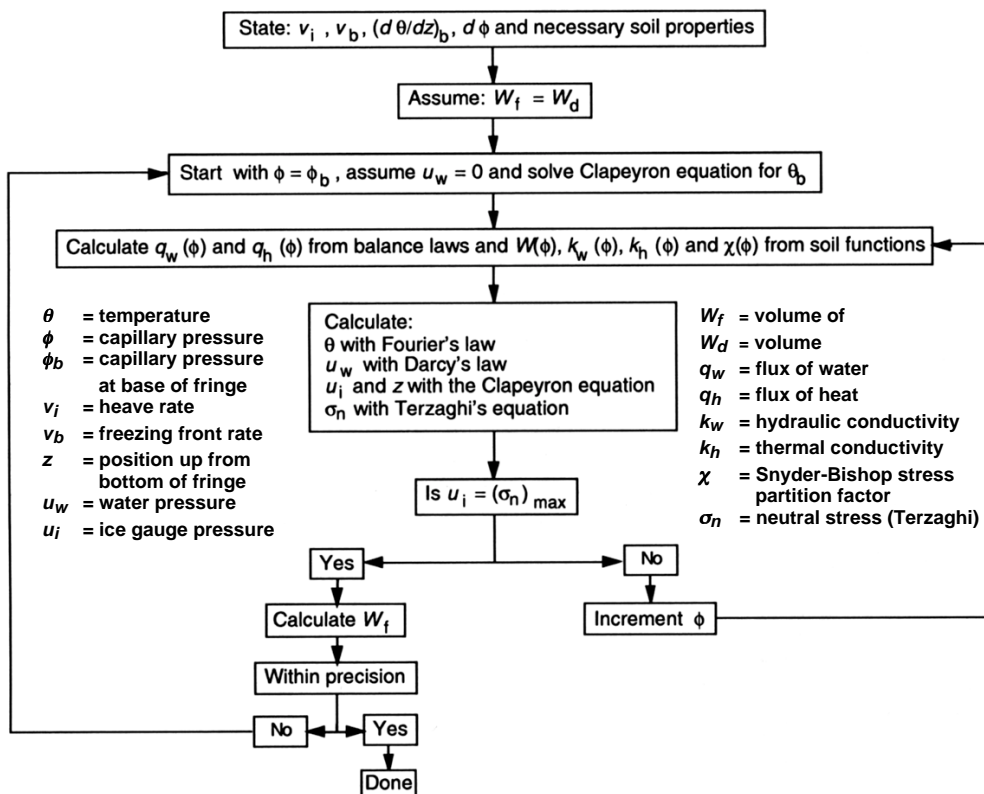
- avec : θ_w = teneur en eau volumique
 θ_f = teneur en glace volumique.

Plusieurs chercheurs ont utilisé cette théorie pour développer des modèles numériques (Gilpin 1980, Hopke 1980, O'Neil & Miller 1982 & 1985, Ladanyi & Shen 1989, Padilla & Villeneuve 1992, Sheng 1994, Black 1995). Le modèle de Black (1995b) : RIGIDICE est intéressant, car il est relativement simple et son code est public. Son algorithme fait l'objet de la figure 2-53.



2-52 Formation des lentilles de glace.

Adapté de Miller (1972)



2-53 Organigramme du code RIGIDICE (Black, 1995b)

2.7.4 Modèle thermomécanique

Le *modèle thermomécanique* est aujourd'hui le plus élaboré. En plus d'un couplage entre la diffusion thermique et les transferts de masses, il tient compte des propriétés mécaniques du sol gelé. Le plus connu est celui créé par l'équipe du professeur Michel Fremond (Duquennoi, Fremond & Lévy 1989).

2.7.5 Autres modèles

Dans ce domaine de la modélisation numérique du phénomène du gel et du dégel, on peut encore citer les chercheurs suivants : Holden, Jones & Dudeck (1980), Miller & Koslow (1980), Guymon *et al.* (1981), Takagi (1982), Fremond & Mikkola (1991), Michalowski (1992), Kujala (1997), Hartikainen & Mikkola (1997), Miyata (1997), Nakano (1997), Talamucci (1997), Okamoto *et al.* (1997), Djaballah-Masmoudi & Aguirre-Puente (1998), Gorelik & Kolunin (2000), Watanabe & Muto (2000).

2.8 Modélisation numérique du dégel

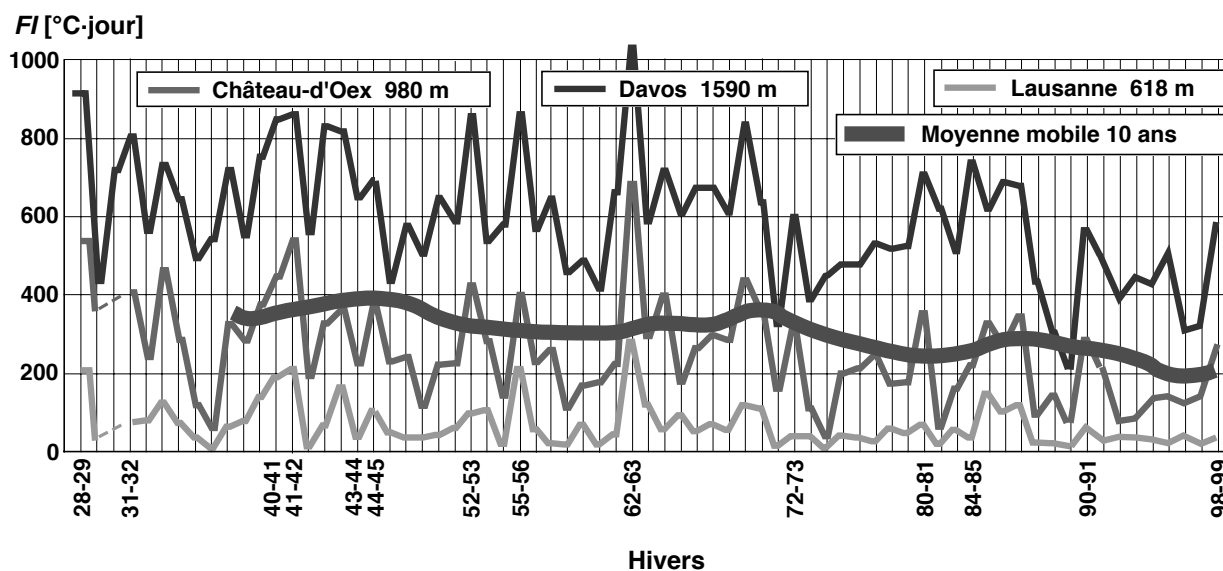
Les seuls modèles numériques du phénomène du dégel sont ceux liés au module résilient au dégel et sont exposés au paragraphe 2.4.3. Des modèles numériques généraux faisant intervenir la plastification du sol lors du dégel, n'existent pas encore car leur complexité est immense. Ils devraient inclure des équations d'état donnant la résistance au cisaillement et la déformabilité du sol tout au long du dégel, ce qui demande un couplage hydraulique et thermique.

2.9 Gel, dégel et réchauffement du climat

Pour conclure cet état des connaissances actuelles, il faut encore dire deux mots sur le réchauffement du climat et ses conséquences sur les méthodes de dimensionnement au gel et dégel des ouvrages du génie civil et en particulier des voies de communication. Cette dernière section va se conclure par une note, un peu provocatrice, qui sort un peu du domaine de cette recherche.

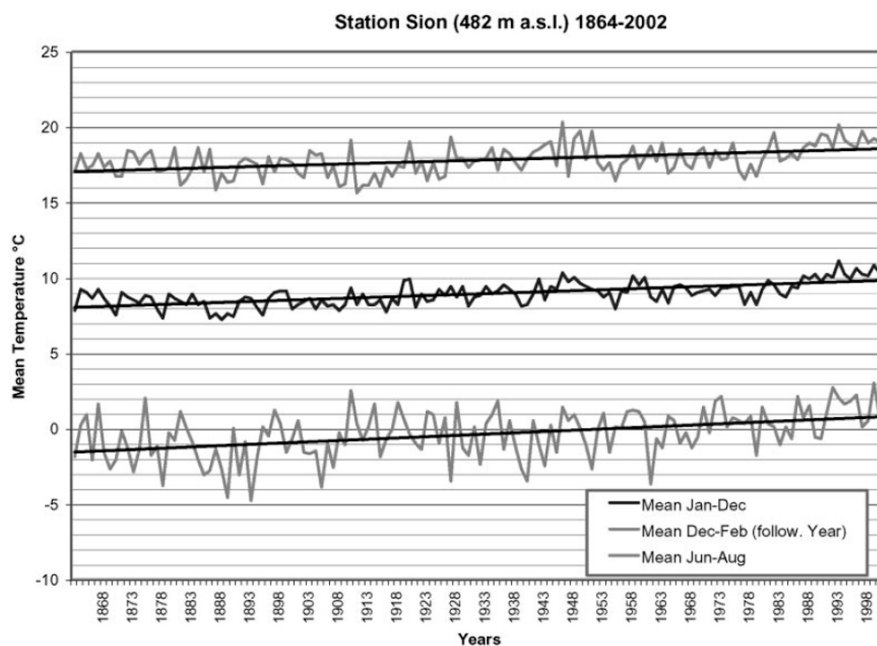
Le climat se réchauffe ; c'est un fait incontestable. Ce réchauffement a débuté à la fin du Petit âge glaciaire, à savoir vers 1850. Comme cette recherche traite plus particulièrement du domaine routier, la figure 2-54 démontre ce réchauffement en utilisant les indices de gel de trois stations de différentes altitudes. Des moyennes mobiles et un lissage permettent de déterminer une tendance qui indique un réchauffement, de 1957 – année de la première version des normes suisses sur le dimensionnement au gel des routes – à 2000 environ, correspondant à une diminution de l'indice de gel moyen des trois stations de quelque 100 °C·jour. La figure 2-55 donne les moyennes des températures des mois de décembre et janvier, décembre à février et juin à août mesurées à Sion (CH-VS) depuis 1864.

Les figures 2-54 et 2-55 démontrent clairement que les paramètres des méthodes actuelles de dimensionnement au gel et dégel des voies de communication doivent être adaptés au réchauffement du climat. En Suisse, cela est prévu depuis la création des normes de dimensionnement au gel et dégel (SN 670 140 en particulier), car les indices de gel significatifs se calculent sur les trente dernières années.



2-54 Indices de gel de l'air FI , de 1929 à 1999, pour Davos, Château-d'Oex et Lausanne.

La moyenne des moyennes mobiles à 10 ans montre la tendance.
 Cette moyenne est elle-même lissée. Tiré de Dysli, 2000 et 2001



2-55 Températures à Sion (CH-VS) de 1864 à 2002

Tiré de Böhm et al. 2001

Cependant, ce réchauffement de la Terre est global et, comme la circulation des vents et courants marins est très complexe, il est très probable que ce réchauffement ne se fait pas sentir de la même manière sur toute la surface du globe. Sur la base des dernières théories et mesures en matière d'évolution du climat, un réchauffement du climat de la Terre entière conduira, probablement et à plus ou moins long terme, à un refroidissement du climat du centre et du nord de l'Europe. L'Europe a, en effet, un climat anormalement chaud. L'indice de gel de la ville de Genève, dont la latitude est de $46^{\circ} 10' N$, est de $170^{\circ} C\cdot jour$ alors qu'au Canada, Montréal, qui est un peu plus au sud que Genève ($45^{\circ} 30'$ de latitude N) et à une altitude inférieure, a un indice de gel d'environ $1000^{\circ} C\cdot jour$. Le Gulf Stream est le responsable de cette différence. Broecker (1995) a démontré qu'un réchauffement global du climat conduit, à plus ou moins long terme, à un refroidissement rapide et important du climat européen. Le réchauffement global produit tout d'abord la fonte partielle des glaces de la calotte glaciaire du Groenland (icebergs plus nombreux). Cela diminue la densité des eaux de surface du nord-est de l'océan Atlantique et cette diminution est la cause d'une réduction importante et rapide de l'effet du Gulf Stream. Cette eau, plus légère, reste en surface et fait plonger le Gulf Stream avant qu'il n'atteigne les côtes de l'Europe. Cette théorie a été vérifiée par des mesures faites sur des carottes de glace prélevées dans des forages réalisés au travers de la calotte glaciaire du Groenland, mesures qui ont montré que ce phénomène s'était déjà produit plusieurs fois durant ces 10'000 dernières années (Alley & Bender, 1998). Le début du Petit âge glaciaire, vers 1350 AD, serait même le résultat d'une des phases de ce phénomène.

Il y a donc encore un futur pour les spécialistes du gel et dégel des sols et pour des recherches en la matière ...

3

Le sol utilisé

3.1 Introduction

L'examen de la fonte des lentilles de glace étant le but principal de l'expérimentation, il s'agissait de trouver un sol très gélif conduisant à une formation rapide de lentilles de glace de bonne dimension. En outre, comme les essais réalisés dans la halle fosses d'Écublens entre 1977 et 1987 devaient être réexploités dans le cadre de cette recherche, les caractéristiques du sol utilisé pour les essais en laboratoire devaient se rapprocher de celles du sol utilisé pour constituer l'infrastructure de la route d'essai en vraie grandeur construite dans la halle fosses. Les caractéristiques de ce sol devaient encore être proches de celles des sols gélifs rencontrés dans la zone de l'Arc alpin. Enfin, une bonne connaissance générale du comportement au gel de ce sol était la bienvenue. Nous avons donc choisi un sol de même provenance que celui utilisé dans la halle fosses d'Écublens et lors de la mise au point du nouvel essai suisse de détermination de la sensibilité au gel des sols (Thorel & Dysli, 1990), à savoir un limon de lavage provenant de la gravière de Biolley-Orjulaz.

Le fait de n'utiliser qu'un seul type de sol pour tous les essais peut être critiqué. Nonobstant lorsque l'on sait qu'un essai dure plus d'un mois, il est évident que l'étude de plusieurs types de sols gélifs était impossible dans le laps de temps et avec le personnel dévolu à cette recherche.

3.2 Granulométrie et limites de consistance

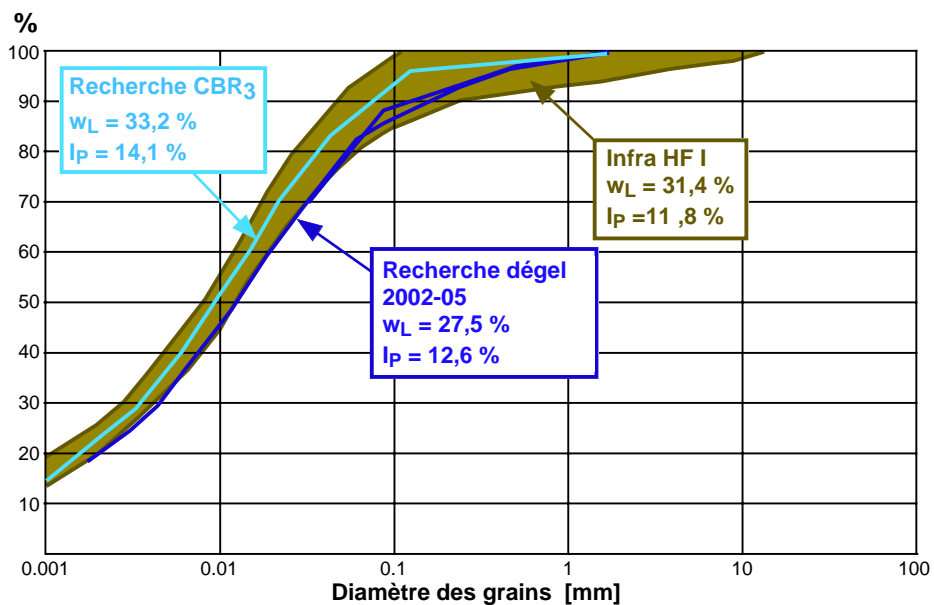
La figure 3-1 compare les *granulométries* et les *limites de consistance* :

- du sol utilisé lors des essais dans la halle fosses d'Écublens (Infra HF 1) ;
- d'un sol, de même provenance, utilisé pour des essais de mise au point d'un nouvel essai de détermination de la sensibilité au gel (Recherche CBR₃) ;
- du sol utilisé pour cette recherche (Recherche dégel 2002-05).

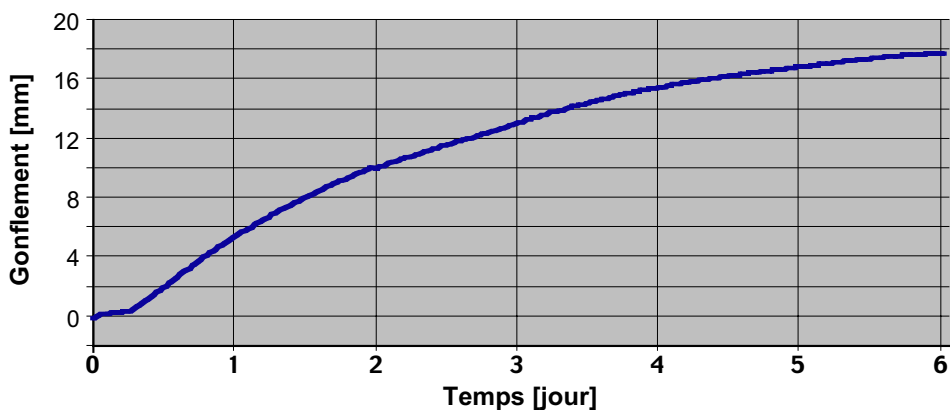
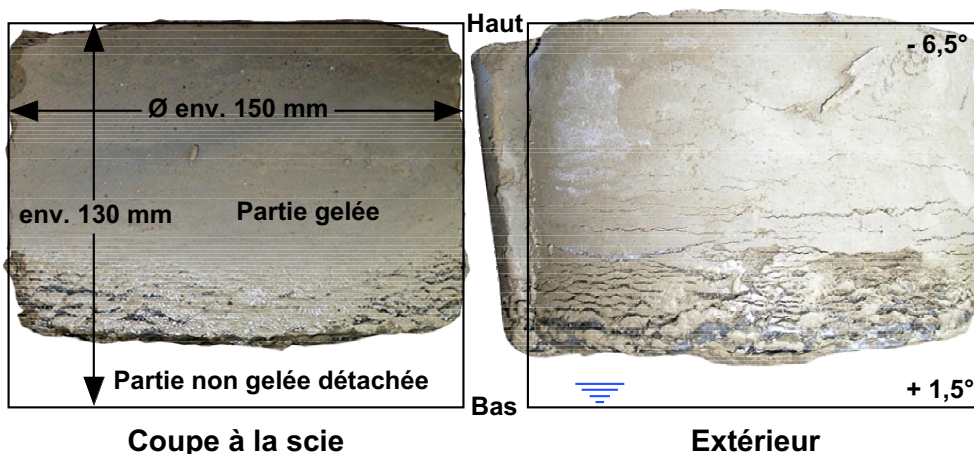
Elle montre notamment que leurs caractéristiques sont proches l'une de l'autre.

3.3 Essai CBR_F (CBR au gel)

Un *essai CBR_F* a été exécuté en partie selon la norme SN 670 321 ; en partie car la durée du gel (6 jours environ) a été beaucoup plus importante que celle prescrite par la norme (un jour), ceci pour se rapprocher des conditions des essais qui seront réalisés dans le cadre de cette recherche. La figure 3-2 est un résumé graphique des résultats de cet essai préliminaire. Elle montre que les lentilles produites sont abondantes et de dimensions permettant l'examen de leur fonte par l'endoscope. La vitesse du gel induite par les conditions aux limites des températures prescrites par l'essai CBR_F semble cependant trop importante. Pour obtenir une meilleure répartition des lentilles sur la hauteur du moule, ainsi que des lentilles de dimensions un peu supérieures, une vitesse de gel plus faible devra être utilisée lors des essais effectués dans le cadre de la recherche, par exemple en abaissant progressivement la température de la tête du moule.



3-1 Comparaison des granulométries du limon argileux de Biolley Orjulaz



3-2 Essai CBR_F sur le limon argileux choisi

3.4 Courbe caractéristique sol-eau

La *courbe caractéristique sol-eau* est, dans l'étude des phénomènes du gel et du dégel des sols, une propriété très importante car ces phénomènes se produisent dans la zone non saturée. Elle donne la relation entre la succion et la teneur en eau massique ou volumique. Elle a été établie par le LMS au moyen d'une cellule de Rowe et Barden (1966) modifiée. L'application de la force verticale se fait par une tige verticale sur laquelle s'appuie un cadre d'oedomètre incrémental standard, et non plus par une pression d'eau agissant sur une membrane. La modification de cette cellule a été réalisée dans le cadre de cette recherche et fait l'objet de la figure 3-4.

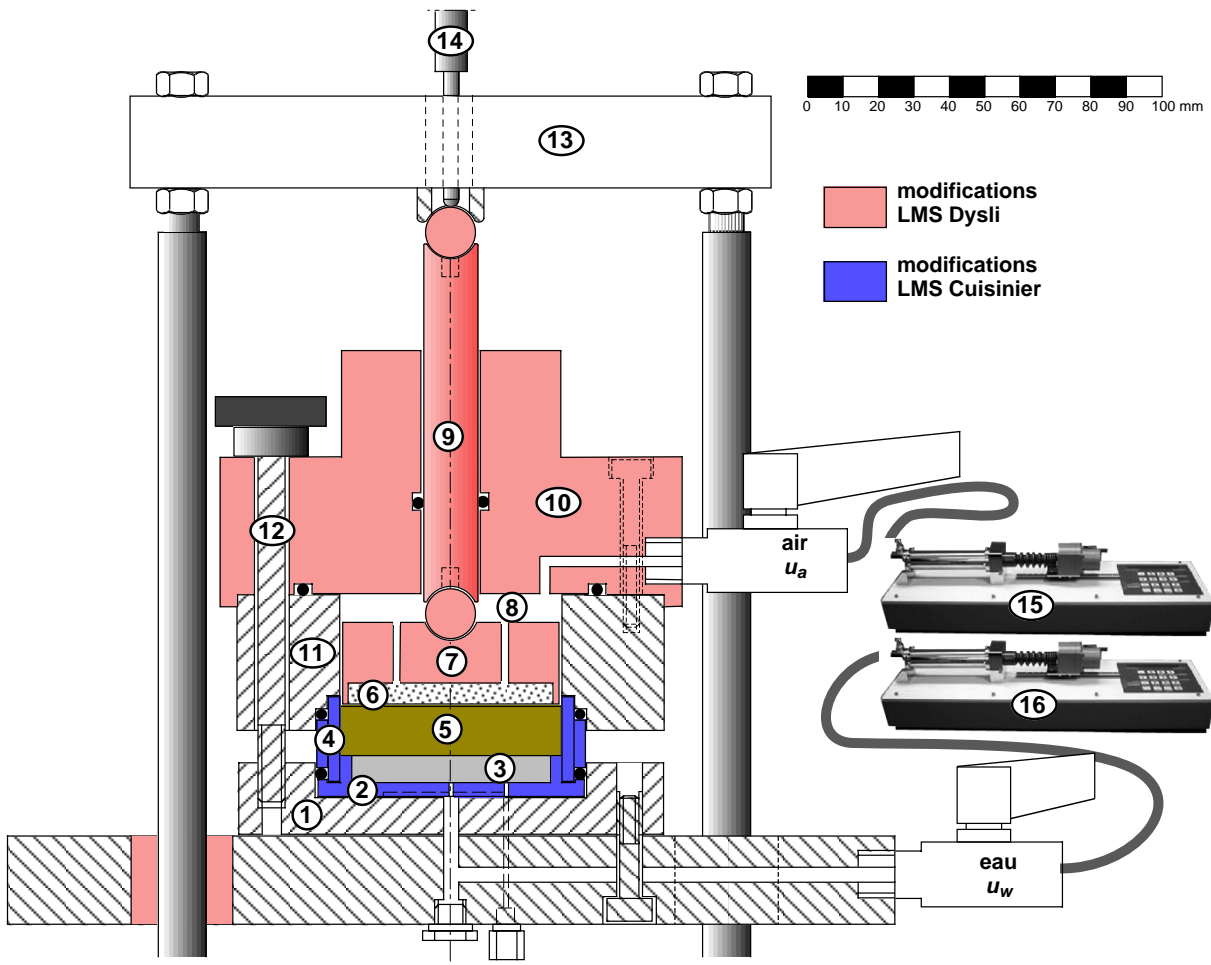
La courbe caractéristique sol-eau obtenue est montrée sur la figure 3-5. Les deux échelles de cette figure sont géométriques. Cet essai permet aussi de déterminer aussi la relation entre la perméabilité et la succion, un peu comme dans un essai oedométrique incrémental. Les relations dérivées : perméabilité = f(succion) et perméabilité = f(teneur en eau) font l'objet des figures 3-6 et 3-7. Ces trois diagrammes seront utilisés sur la figure 3-11.

3.5 Analyse minéralogique

Une *analyse minéralogique* du limon a été demandée à l'Institut de Minéralogie et Géochimie de l'Université de Lausanne. Ses résultats sont consignés sur le tableau 3-3. On y remarque notamment que la quantité de quartz est importante, ce qui conduit à une conductivité thermique élevée.

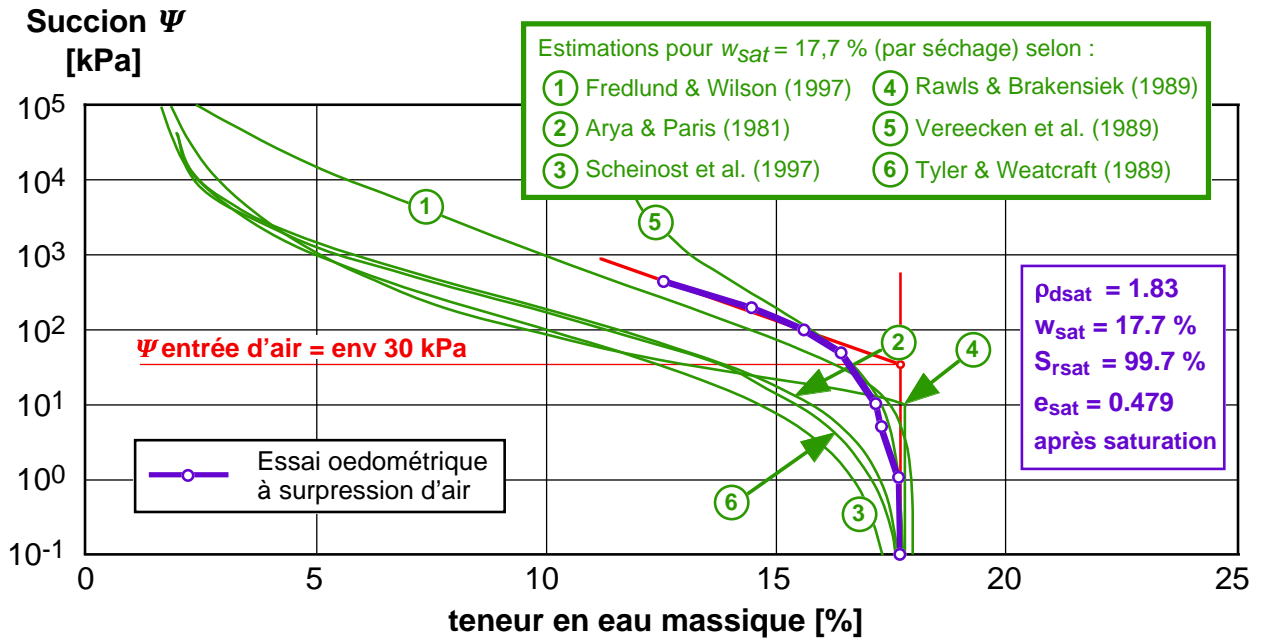
3-3 Analyse minéralogique du limon utilisé

Minéral	% massique
Quartz	40
Calcite	25
Dolomite	10
Chlorite	5
Mica blanc	7
Feldspath potassique	5
Albite	8

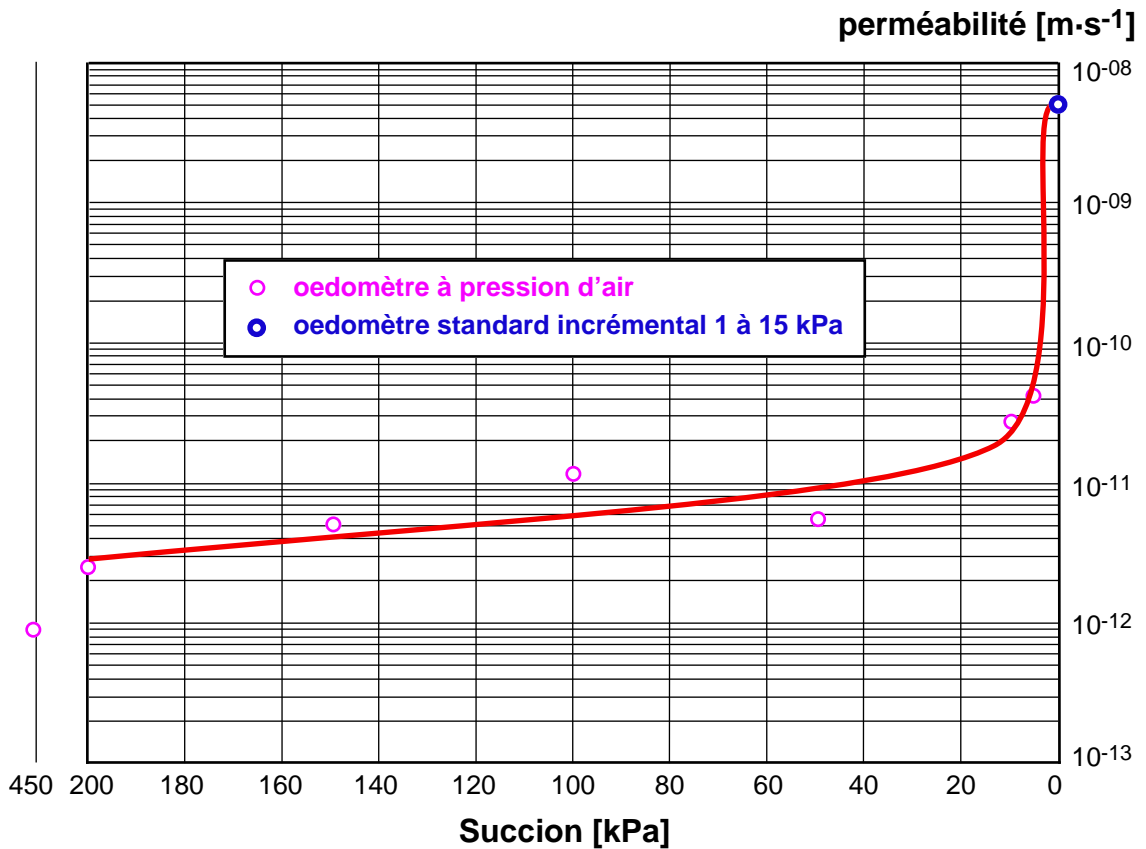


- ① L'embase de l'appareil qui est percée de deux trous et, lors du montage de l'appareil, qui doivent être mis en vis-à-vis des trous du support de la pierre poreuse.
- ② Le support de la pierre poreuse ③ avec un fond rainuré pour permettre de chasser l'air au début de l'essai.
- ③ La pierre poreuse limitant la pression d'entrée d'air
- ④ L'anneau de confinement de l'éprouvette, anneau qui supporte les joints toriques permettant de maintenir la pression d'air.
- ⑤ L'éprouvette \varnothing 63 mm.
- ⑥ Une pierre poreuse à très basse pression d'entrée d'air
- ⑦ La tête de l'éprouvette avec 4 trous \varnothing 5 pour pression air.
- ⑧ La chambre supérieure qui permet d'appliquer la pression de l'air u_a .
- ⑨ La tige qui permet d'appliquer la contrainte verticale σ_v , avec deux billes à chaque extrémité.
- ⑩ La partie supérieure de l'oedomètre.
- ⑪ L'anneau intermédiaire de l'oedomètre.
- ⑫ Les 4 vis qui permettent d'assembler tout le dispositif.
- ⑬ Le cadre oedomètres standards allongé (3665 g \Rightarrow 1,16 kPa).
- ⑭ Le capteur de déplacement mesurant le tassement de l'éprouvette.
- ⑮ La contrôleur GDS pour la pression de l'air u_a .
- ⑯ La contrôleur GDS pour la pression interstitielle u_w .

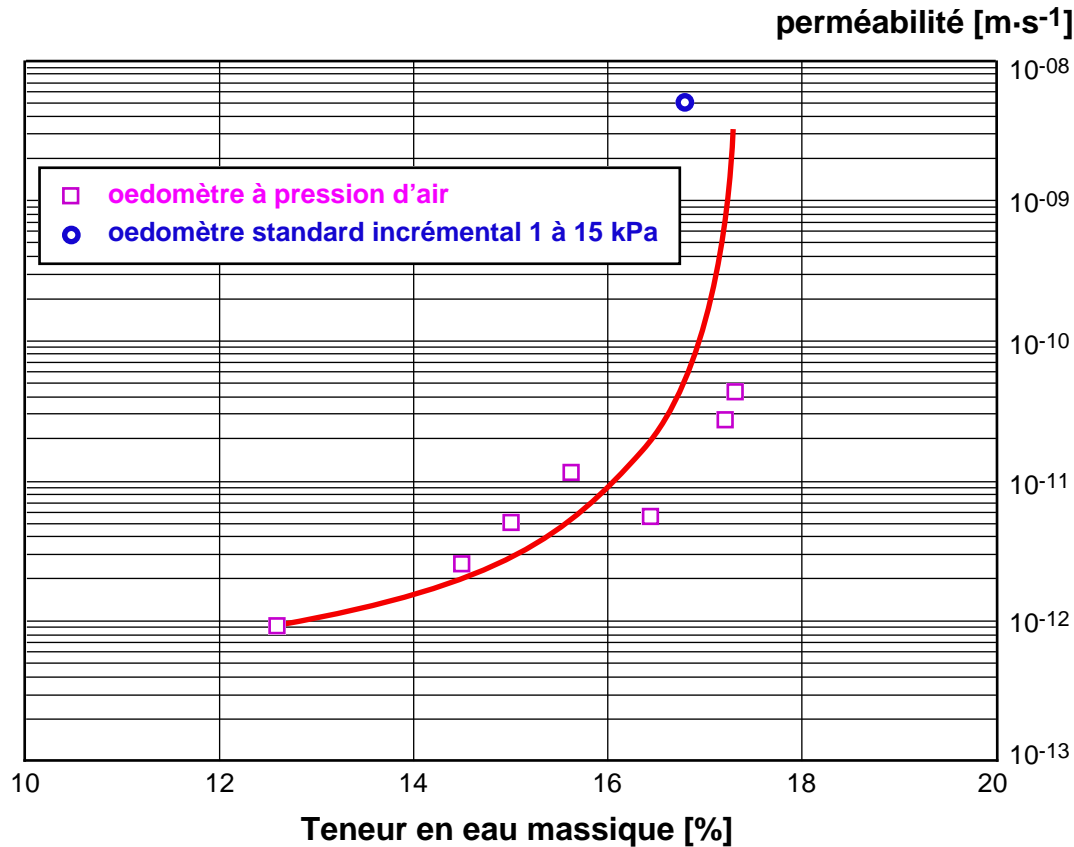
3-4 Modification de la cellule de Rowe et Barden



3-5 Courbe caractéristique sol-eau en drainage du limon utilisé



3-6 Perméabilité en fonction de la suction

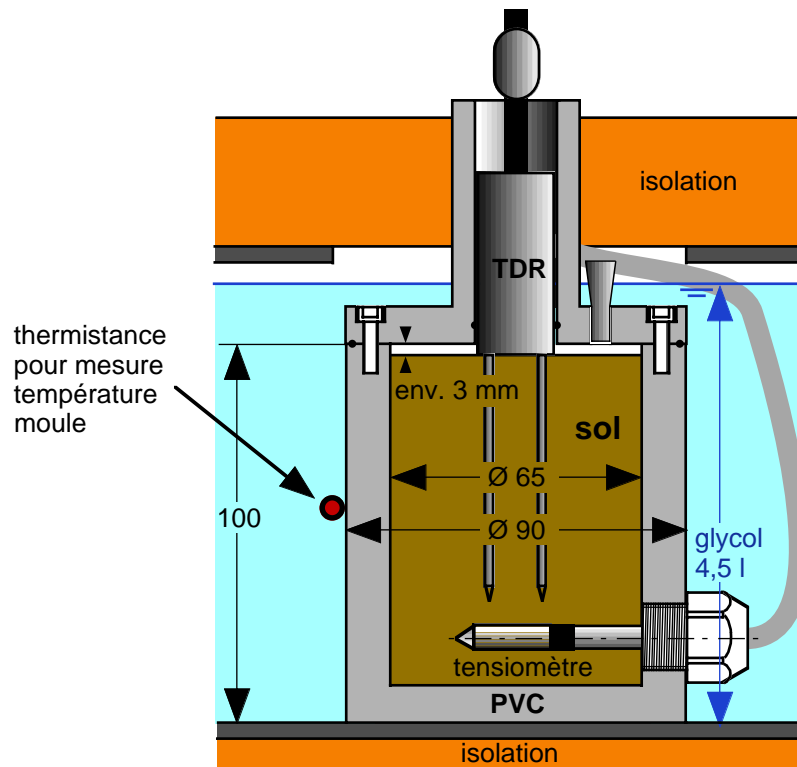


3-7 Perméabilité en fonction de la teneur en eau

3.6 Teneur en eau non gelée

Une caractéristique importante dans l'étude des phénomènes du gel et du dégel est la relation entre la *teneur en eau non gelée* w_u et la *température* T (négative). Elle a été établie, pour le limon utilisé, dans le petit moule décrit par la figure 3-8. Ce moule est plongé dans le réservoir de glycol du cryostat Haake P1-C25P (voir chapitre 4) qui permet de fixer avec une grande précision la température du bain de glycol. La teneur en eau non gelée est mesurée par le capteur TDR (voir chapitre 4) visible sur la figure 3-8. On a fait varier, par palier, les températures du glycol en partant d'une température stabilisée à 0° C. Un diagramme typique de ces paliers fait l'objet du haut de la figure 3-9.

Après plusieurs essais de mise au point, deux essais complets ont été entrepris : un essai avec un compactage de l'éprouvette à $0,6 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-3}$ ($\rho_d = 1,83 \text{ t}\cdot\text{m}^{-3}$, $w_{init} = 16,8\%$) qui correspond au plus fort compactage de la grande éprouvette des essais (voir chapitre 4) et un autre avec un compactage de $0,4 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-3}$ ($\rho_d = 1,77 \text{ t}\cdot\text{m}^{-3}$, $w_{init} = 18,9\%$) qui correspond au compactage le plus faible de la grande éprouvette.

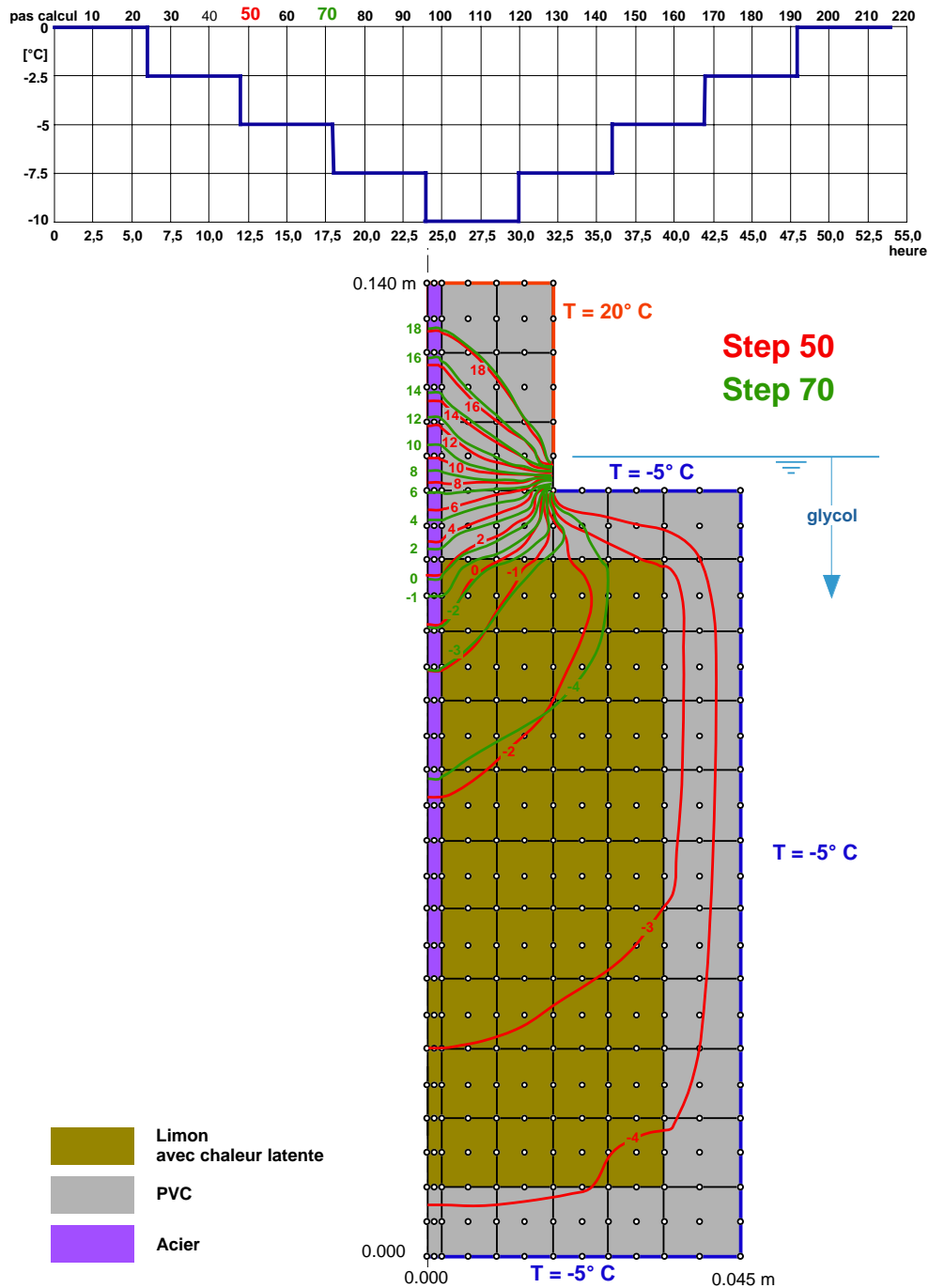


3-8 Moule pour la détermination de la relation $w_u = f(T)$

Les résultats de la détermination de la relation entre la teneur en eau non gelée et la température font l'objet de la figure 3-10.

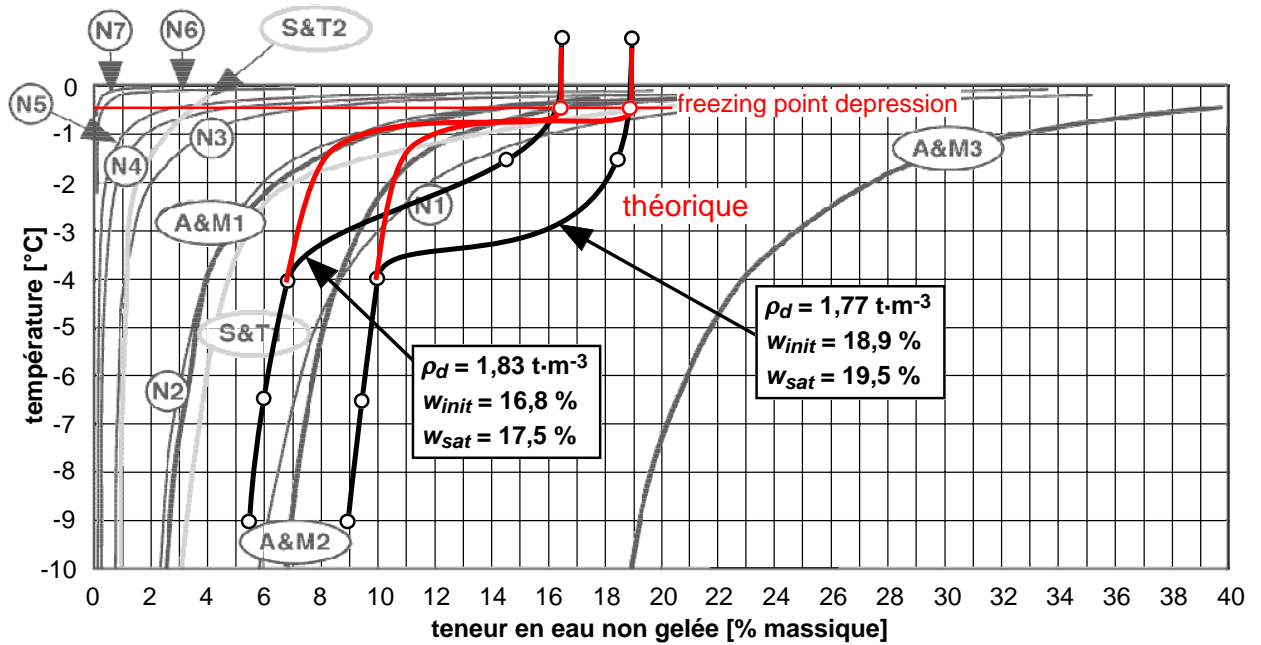
Le dispositif d'essai utilisé n'est de loin pas parfait. Les dimensions et la forme du moule ont été déterminées par la dimension du réservoir à glycol des deux cryostats Haake. Son plus gros défaut est le pont thermique créé par le capteur TDR et son enveloppe. Il aurait fallu pouvoir immerger entièrement le dispositif dans du glycol, mais cela aurait exigé l'achat d'un quatrième cryostat avec un réservoir beaucoup plus grand.

Pour estimer l'importance de ce défaut, une simulation de ce petit moule par la méthode des éléments finis a été réalisée. Un résultat typique de cette analyse fait l'objet de la figure 3-9. Elle a surtout montré que le pont thermique créait une différence de température d'environ 1°C entre le milieu de la zone d'influence du capteur TDR et le glycol, ceci à toutes les températures du glycol. Les deux courbes de la figure 3-10 ($\rho_d = 1,83\text{ t}\cdot\text{m}^{-3}$ et $\rho_d = 1,77\text{ t}\cdot\text{m}^{-3}$) tiennent compte de cet écart.



3-9 Analyse FEM du petit moule

Le fond de la figure 3-10 est le florilège des relations $w_u = f(T)$ déjà présenté au chapitre 2. La partie supérieure des courbes mesurées par le dispositif décrit par la figure 3-8 ne correspond pas bien à celle du florilège. Cela provient probablement de la méthode un peu rudimentaire utilisée. Les autres courbes ne sont aussi pas très correctes dans leur partie supérieure car, au-dessus de 0° C, la teneur en eau devient constante et un arrondi est physiquement obligatoire. Sur la figure 3-10, les courbes rouges dénommées « théorique » donnent la tendance la plus probable pour les résultats des essais. Le « freezing point depression » des deux courbes théoriques est donné à titre indicatif.



3-10 Relation $w_u = f(T)$ du limon utilisé

L'origine des courbes du florilège de relations $w_u = f(T)$ se trouvent sur le tableau 2-41

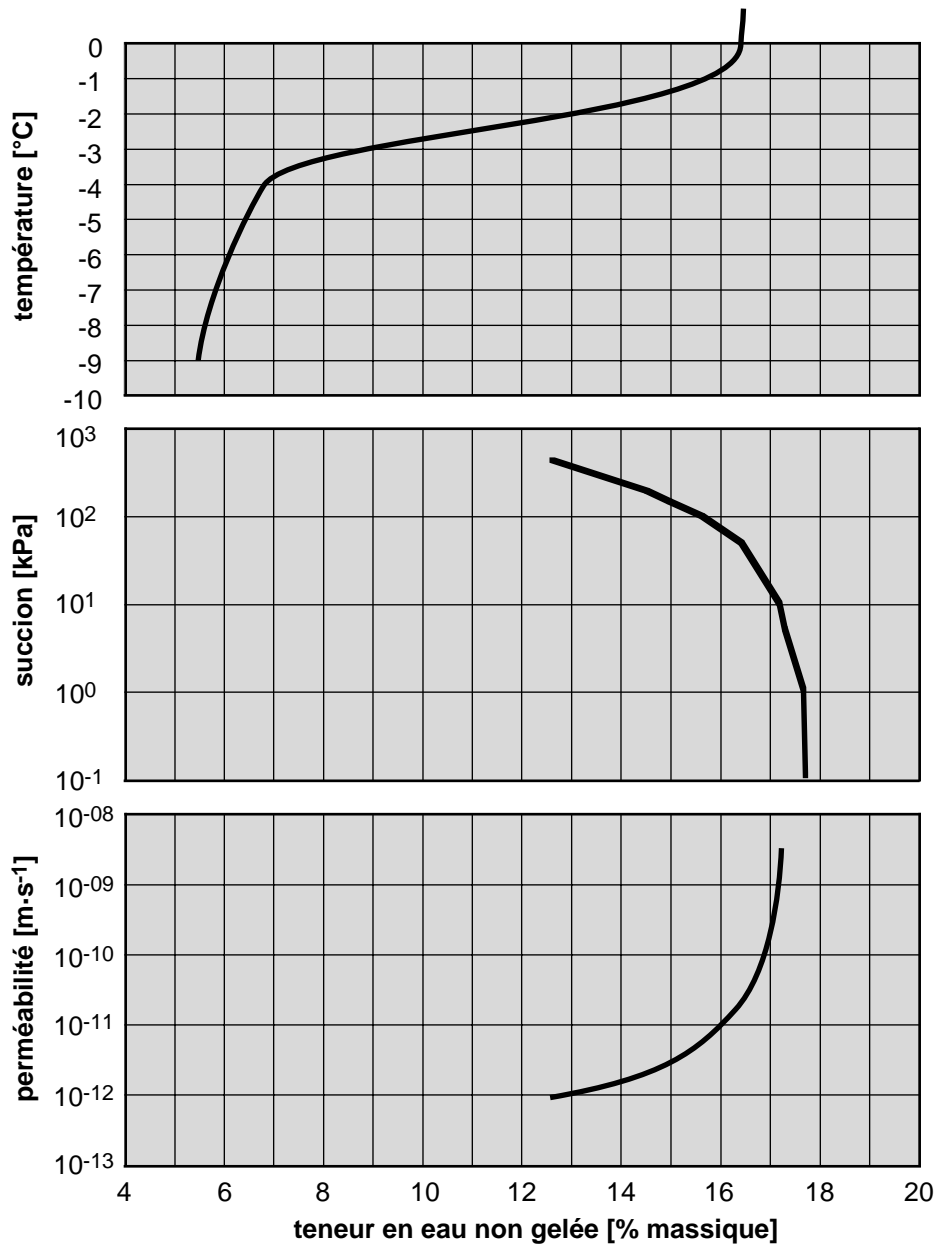
3.7 Modèle graphique

En 1991, Dysli a proposé un modèle graphique pour expliquer toutes les relations existant pendant le gel et le dégel entre la température, la teneur en eau non gelée, la succion et la perméabilité du sol. Son application au limon utilisé pour cette recherche fait l'objet de la figure 3-11. Ce modèle sera utilisé par la suite pour discuter des résultats des essais.

3.8 Essais oedométriques incrémentaux standards

Un des buts principaux de la recherche étant l'évaluation des modules de déformation résilients (au dégel), trois essais oedométriques standards ont été réalisés sur le limon utilisé. Les éprouvettes ont été préparées dans la bague de 60 mm de diamètre et compactées au moyen d'une presse pour obtenir l'indice de vide initial correspondant approximativement aux énergies de compactage de $0,6 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-3}$ et de $0,37 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-3}$ utilisées par la suite pour les essais.

Pour l'énergie de compactage de $0,6 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-3}$, les données et les résultats font l'objet des figures 3-12 et 3-13 et pour l'énergie de $0,37 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-3}$ celle de la figure 3-14.



3-11 Modèle graphique

LABORATOIRE DE MECANIQUE DES SOLS ET DES ROCHES DE L'EPFL
CONSOLIDATION A L'OEDOMETRE INCREMENTAL

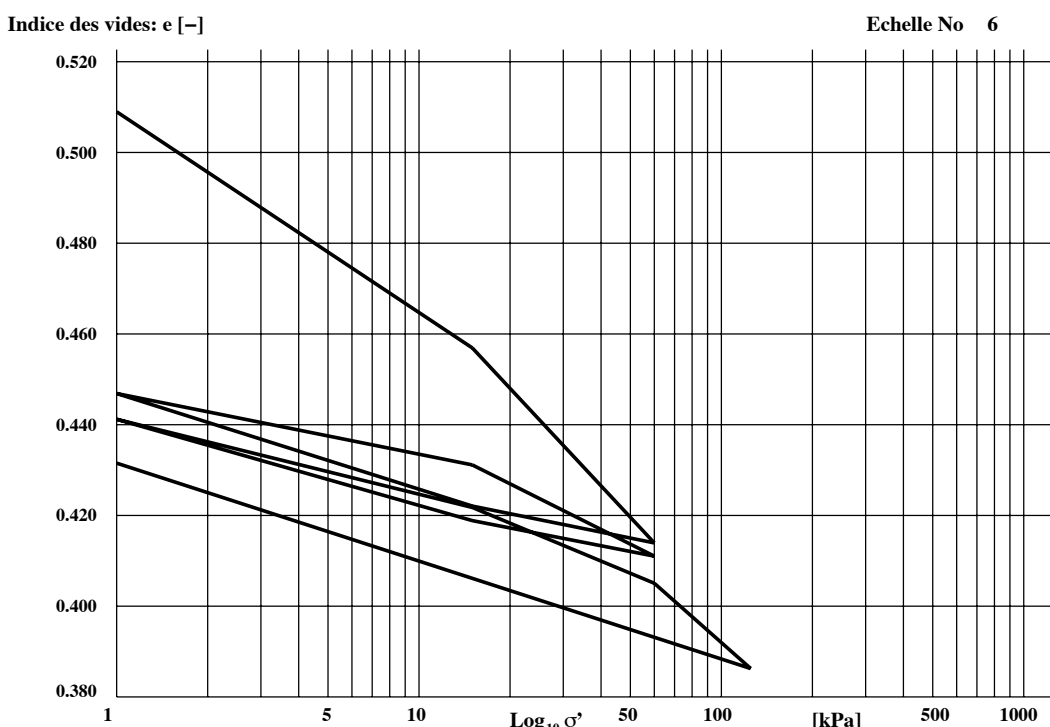


Exécuté selon SIMSTF ETC5-D1.97 et ES.410

STS 224

No éprouvette	Titre de l'étude			Commettant		Date récept. échantillon	Date essai
				nom	adresse		
SY49 -2 -2a	Thèse M. Dysli			M. Dysli			
No sondage / Profil	Profondeur	Type échantillon	Nature échantillon	Ech. prélevé par			
		Vrac	Limon Bioley			30/ 6/ 5	30/ 6/ 5
Mode conservation	Mode préparation éprouvette(s)	Ingénieur responsable		Opérat.			
		nom	signature				
	voir observations			PD			

Hauteur [mm]	Diametre [mm]	e _{init} [-]	ρ _s [t m ⁻³]	ρ _{init} [t m ⁻³]	ρ _{sat init} [t m ⁻³]	w _{init} [%]	w _{sat init} [%]	w _{sat final} [%]
15.29	60.0	0.436	2.70	2.15	2.19	14.0	16.1	16.0



σ'	1.0	15.0	60.0	15.0	1.0	15.0	60.0	15.0	1.0		[kPa]
e	0.509	0.457	0.414	0.422	0.447	0.431	0.411	0.419	0.441		[-]
E _{oed} · 10 ⁻³	0.40	1.52	7.83	0.80	1.28	3.20	8.10	0.89			[kPa]
pente	0.044	0.071	0.013	0.021	0.013	0.033	0.013	0.019			[-]
c _v	.27E-06	.26E-06		.29E-07	.32E-06	.55E-06	.17E-06	.41E-07			[m ² s ⁻¹]
k	.66E-08	.17E-08		.36E-09	.25E-08	.17E-08	.21E-09	.47E-09			[m s ⁻¹]

σ'	1.0	15.0	60.0	125.0	1.0						[kPa]
e	0.441	0.422	0.405	0.386	0.432						[-]
E _{oed} · 10 ⁻³	1.03	3.82	4.86	3.79							[kPa]
pente	0.017	0.028	0.059	0.022							[-]
c _v	.10E-05	.54E-06	.54E-06	.61E-07							[m ² s ⁻¹]
k	.98E-08	.14E-08	.11E-08	.16E-09							[m s ⁻¹]

Observations :
 Limon Bioley écrêté à 0.5mm. Ech préconsolidé dans la bague et sous une presse

Ce protocole ne peut être reproduit partiellement. En outre, son contenu ne concerne que l'échantillon testé.

3-12 Résultat essai oedométrique standard (incrémental) no « a » (0,6 MJ·m⁻³)

LABORATOIRE DE MECANIQUE DES SOLS ET DES ROCHES DE L'EPFL
CONSOLIDATION A L'OEDOMETRE INCREMENTAL



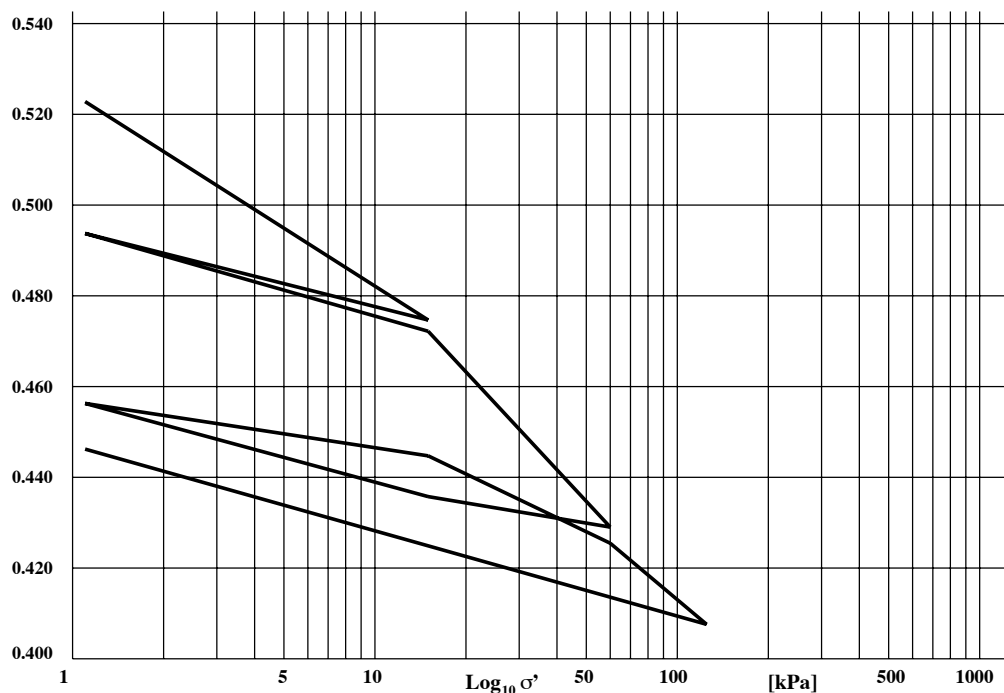
STS 224

Exécuté selon SIMSTF ETC5-D1.97 et ES.410

No éprouvette	Titre de l'étude			Commettant		Date récept. échantillon	Date essai	
				nom	adresse			
sy49 -2b -2b	Thèse M. Dysli			M Dysli				
No sondage / Profil	Profondeur	Type échantillon	Nature échantillon	Ech. prélevé par				
		vrac	limon Bioley			30/ 6/ 5	30/ 6/ 5	
Mode conservation		Mode préparation éprouvette(s)		Ingénieur responsable		Opérat.		
		voir observations		nom	signature			
						PD		
Hauteur [mm]	Diamètre [mm]	e_{init} [-]	ρ_s [t m ⁻³]	ρ_{init} [t m ⁻³]	$\rho_{sat init}$ [t m ⁻³]	w_{init} [%]	$w_{sat init}$ [%]	$w_{sat final}$ [%]
14.98	60.0	0.455	2.70	2.14	2.16	15.5	16.8	16.5

Indice des vides: e [-]

Echelle No 6



σ'	1.1	15.0	1.1	15.0	60.0	15.0	1.1	15.0	60.0		[kPa]
e	0.523	0.475	0.494	0.472	0.429	0.436	0.456	0.445	0.425		[-]
$E_{oed} \cdot 10^{-3}$	0.44	1.07	0.96	1.53	9.56	0.97	1.75	3.37			[kPa]
pen	0.042	0.017	0.019	0.072	0.011	0.018	0.010	0.032			[-]
c_v	.15E-06	.41E-07	.20E-06	.28E-06	.17E-06	.32E-07	.52E-05	.53E-06			[m ² s ⁻¹]
k	.35E-08	.38E-09	.21E-08	.18E-08	.18E-09	.33E-09	.29E-07	.16E-08			[m s ⁻¹]

σ'	60.0	125.0	1.1								[kPa]
e	0.425	0.408	0.446								[-]
$E_{oed} \cdot 10^{-3}$	5.18	4.51									[kPa]
pen	0.056	0.019									[-]
c_v	.48E-06										[m ² s ⁻¹]
k	.92E-09										[m s ⁻¹]

Observations :

limon Bioley écrêté à 0.5mm. Ech préconsolidé dans la bague et sous une presse

Ce protocole ne peut être reproduit partiellement. En outre, son contenu ne concerne que l'échantillon testé.

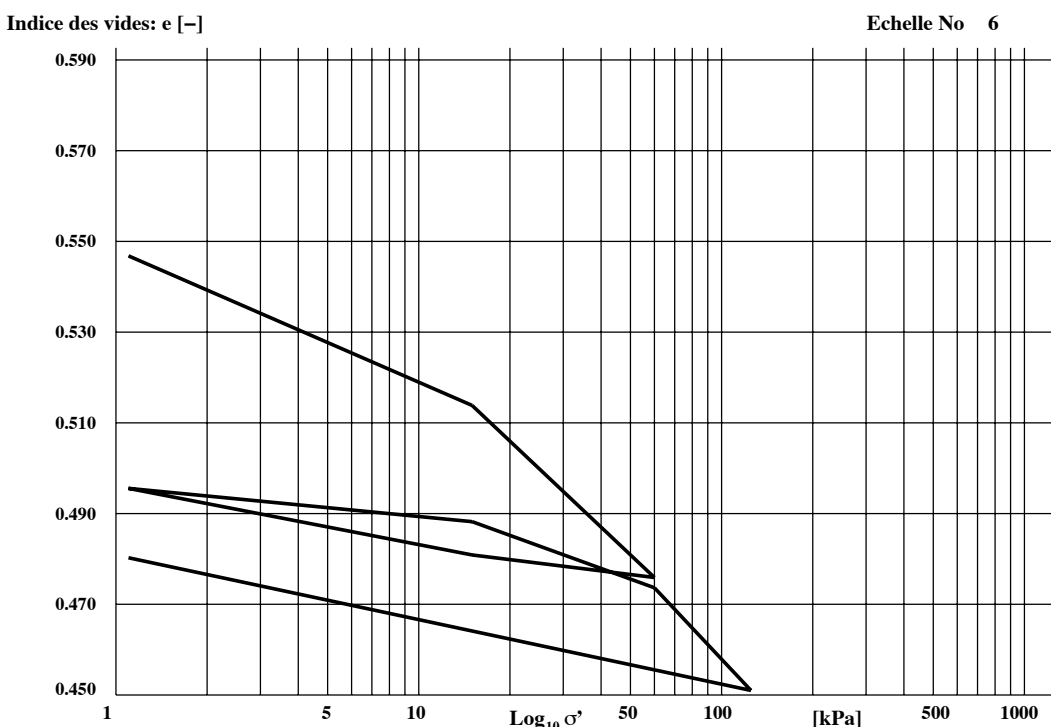
3-13 Résultat essai oedométrique standard (incrémental) no « b » (0,6 MJ·m⁻³)

LABORATOIRE DE MECANIQUE DES SOLS ET DES ROCHES DE L'EPFL
CONSOLIDATION A L'OEDOMETRE INCREMENTAL



Exécuté selon SIMSTF ETC5-D1.97 et ES.410

No éprouvette	Titre de l'étude				Commettant			
					nom	adresse		
sy49 -4 -4	Thèse M. Dysli				M. Dysli			
No sondage / Profil	Profondeur	Type échantillon	Nature échantillon	Ech. prélevé par	Date récept. échantillon	Date essai		
		vrac	limon Bioley		3/ 8/ 5	3/ 8/ 5		
Mode conservation		Mode préparation éprouvette(s)		Ingénieur responsable		Opérat.		
standard		voir observations		nom	signature			
						PD		
Hauteur [mm]	Diametre [mm]	e _{init} [-]	ρ _s [t m ⁻³]	ρ _{init} [t m ⁻³]	ρ _{sat init} [t m ⁻³]	w _{init} [%]	w _{sat init} [%]	w _{sat final} [%]
15.22	60.0	0.547	2.70	2.08	2.09	19.6	20.2	17.8



σ'	1.1	15.0	60.0	15.0	1.1	15.0	60.0	125.0	1.1		[kPa]
e	0.547	0.514	0.476	0.481	0.496	0.488	0.474	0.451	0.480		[-]
E _{oed} · 10 ⁻³	0.65	1.79	13.36	1.40	2.83	4.59	4.23	6.14			[kPa]
pente	0.029	0.063	0.008	0.013	0.006	0.024	0.071	0.014			[-]
C _v		.17E-06	.27E-06		.23E-06	.44E-06	.19E-06	.58E-07			[m ² s ⁻¹]
k		.94E-09	.20E-09		.82E-09	.95E-09	.46E-09	.94E-10			[m s ⁻¹]

σ'											[kPa]
e											[-]
E _{oed} · 10 ⁻³											[kPa]
pente											[-]
C _v											[m ² s ⁻¹]
k											[m s ⁻¹]

Observations :
 Limon écrêté à 2mm puis compacté dans bague avec une énergie de 0.37MJ·m⁻³

Ce protocole ne peut être reproduit partiellement. En outre, son contenu ne concerne que l'échantillon testé.

3-14 Résultat essai oedométrique standard (incrémental) no « c » (0,37 MJ·m-3)

Les modules oedométriques obtenus pour les différents paliers des essais a et b ($0,6 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-3}$) sont résumés sur le tableau 3-15 et ceux obtenus lors de l'essai c ($0,37 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-3}$) font l'objet du tableau 3-16.

3-15 Récapitulation des modules oedométriques pour une énergie de compactage de $0,6 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-3}$

Essai	charge / palier [kPa]			décharge / palier [kPa]		
	1 - 15	15 - 60	60 - 125	15 - 1	60 - 15	125 - 1
a	400	1520			7830	
	1280	3200		800	8100	
	1030	3820	4860	890		3790
b	440			1070		
	960	1530		970	9560	
	1750	3370	5180			4510
moyennes	977	2688	5020	933	8497	4150

3-16 Récapitulation des modules oedométriques pour une énergie de compactage de $0,37 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-3}$

Essai	charge / palier [kPa]			décharge / palier [kPa]		
	1 - 15	15 - 60	60 - 125	15 - 1	60 - 15	125 - 1
	650	1790		1400	13360	
	2830	4590	4230			6140
moyennes	1740	3190	4230	1400	13360	6140

4

Approche expérimentale

4.1 Introduction

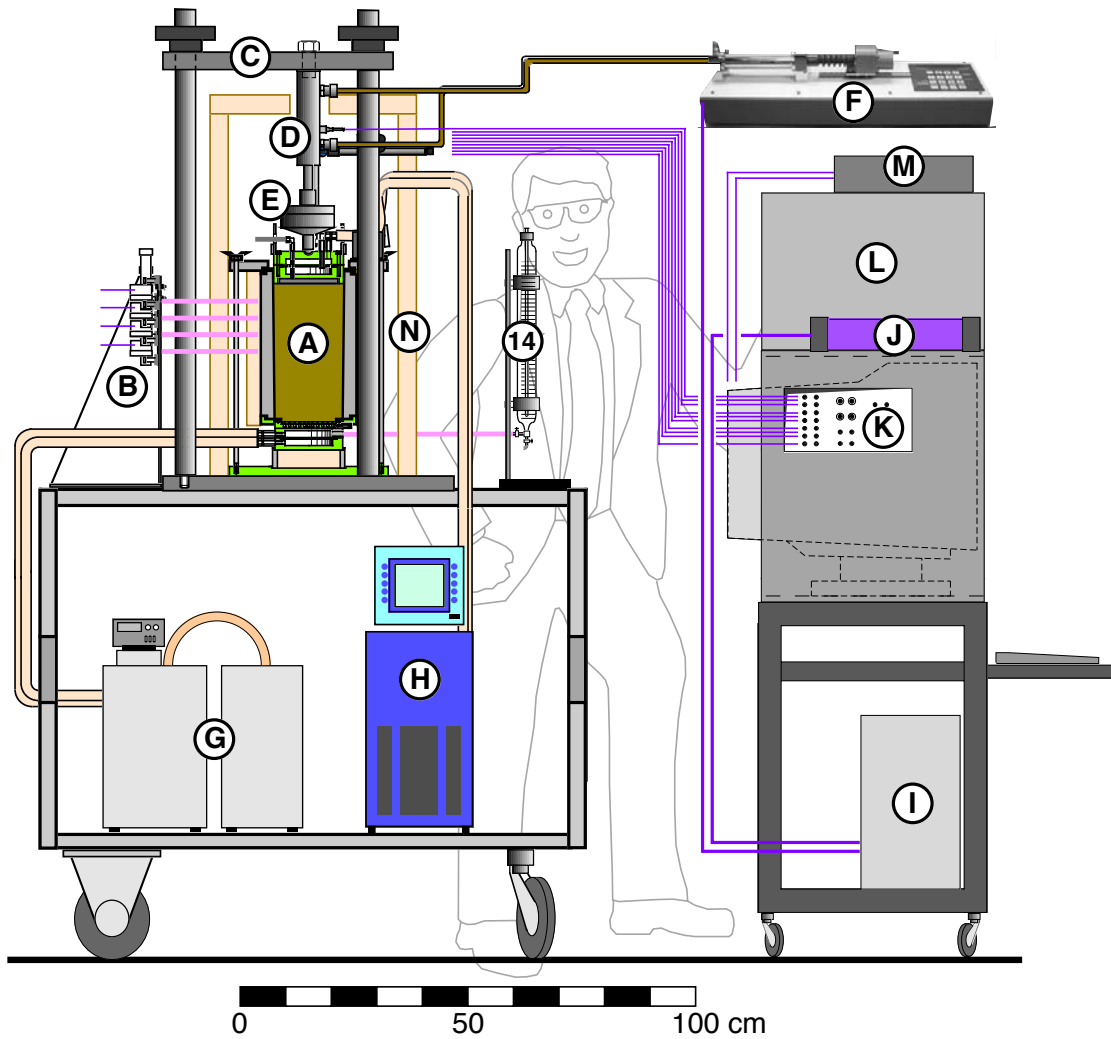
L'approche expérimentale est la partie la plus importante de la recherche. Plusieurs dispositifs expérimentaux ont tout d'abord été étudiés en détail. Tout d'abord, des essais en vraie grandeur auraient pu être réalisés dans la fosse d'essais du LMS (Dysli & Pfister 1982, Dysli 2000). Cela aurait été de loin la meilleure solution. De tels essais auraient cependant exigé des moyens financiers et en personnel que le LMS ne peut plus obtenir aujourd'hui, comme entre 1977 et 1987, pour la réalisation des essais au gel et dégel de superstructures routières dans la halle fosses d'Écublens. Les résultats de ces essais seront cependant réexploités dans le cadre de cette thèse (chap. 9). Des essais en laboratoire sur des éprouvettes étaient la seule solution.

Un premier dispositif, utilisant une cellule triaxiale, a été étudié sur la base de la cellule de Bishop et Wesley, 1975. Il demandait une construction très compliquée et rendait difficile l'interprétation des résultats. L'éprouvette doit en effet être soumise à un gradient thermique vertical de façon à provoquer la formation de lentilles de glace et ce gradient vertical induit lui-même un gradient très important des pressions interstitielles qui passent de valeurs fortement négatives (suction) à des valeurs positives. Qui plus est, ces gradients varient tout au long de l'essai. Le matériau qui la constitue n'est ainsi pas du tout homogène et son hétérogénéité varie dans le temps ; entre autres, ses propriétés de résistance et de déformabilité varient fortement selon un axe vertical et selon le temps. La variation de la contrainte et de la déformation horizontale n'est ainsi pas souhaitable car elle conduit à une complexité qui n'est pas gérable.

La solution adoptée est un moule cylindrique de type CBR (voir SN 670 320) qui provoque un état K_0 dans le sol en imposant des déformations radiales nulles. Il est légèrement conique pour limiter le frottement dû au gonflement des lentilles de glace (angle au sommet du cône d'environ 2°). Son diamètre moyen est de 155 mm et sa hauteur de 300 mm. Même si le paramètre déformation horizontale est éliminé, l'éprouvette reste cependant éminemment hétérogène et l'instrumentation, qui est décrite plus loin, doit tenir compte de ce fait. La figure 4-1 décrit l'ensemble du dispositif d'essai et la figure 4-2 le moule cylindrique proprement dit.

La méthode d'essai choisie s'apparente à celle utilisée lors de l'essai standard de gonflement au gel et de détermination du CBR après dégel (SN 670 321) que l'auteur de ces lignes a mis au point il y a plusieurs années (Thorel et Dysli, 1990). L'instrumentation est cependant beaucoup plus complète et les dimensions du moule différentes.

Malgré l'abandon de la solution avec une cellule triaxiale, la construction du dispositif d'essai a été une opération difficile et de longue haleine. Elle a nécessité le dessin de quelque 40 plans de construction dont la liste fait l'objet de la section 4.12.



- | | | |
|-----|---|--|
| (A) | Moule et éprouvette | voir fig. 4.2. |
| (B) | Vacuomètres des tensiomètres | mesurent la pression d'eau des tensiomètres. |
| (C) | Cadre de charge | utilisé pour le chargement avec le vérin. |
| (D) | Vérin | |
| (E) | Capteur de force | |
| (F) | Contrôleur GDS | contrôle la pression et le déplacement du vérin ; lié au PC par un bus GPIB. |
| (G) | Thermostat Huber | contrôle la température positive du pied de l'éprouvette. |
| (H) | Cryostat Haake P1-C25P | contrôle la température, le plus souvent négative, du sommet de l'éprouvette. |
| (I) | PC | avec une carte NI-GPIB et une carte vidéo NI-PCI-1411. |
| (J) | Datalogger | Agilent 34970A avec deux multiplexeurs 20 voies 34901A et un module multifonction 34907A (output tension). |
| (K) | Panneau de connection des câbles des capteurs | système LEMO |
| (L) | Rangements | câbles, endoscope, etc. |
| (M) | Alimentation stabilisée | pour les vacuomètres et les capteurs de teneur en eau TDR |
| (N) | Isolation thermique extérieure | |

4-1 Le dispositif complet

4.2 Le moule et ses accessoires

4.2.1 Moule avec charge verticale par anneaux de plomb

Pendant les essais, le moule a deux configurations. Dans la première, la charge verticale est constituée par des anneaux de plomb de 2,5 kg chacun. Trois anneaux donnent une contrainte verticale dans l'éprouvette de 4 kPa. C'est une contrainte assez faible qui règne à une profondeur de quelque 20 cm sous la surface d'un sol au-dessus de la nappe phréatique. C'est la même contrainte que celle de l'essai de l'essai CBR et de l'essai suisse de gonflement au gel et CBR après dégel exécuté selon la norme SN 670 321a. En outre, pour des raisons mécaniques, il était difficile de charger plus la tête de refroidissement de l'éprouvette. La figure 4-2 décrit cette configuration ainsi que tous les détails du moule dont, en particulier, la position des capteurs. Les figures 4-3, 4-4 et 4-5 sont des photographies du dispositif d'essai.

4.2.2 Compactage de l'éprouvette dans le moule

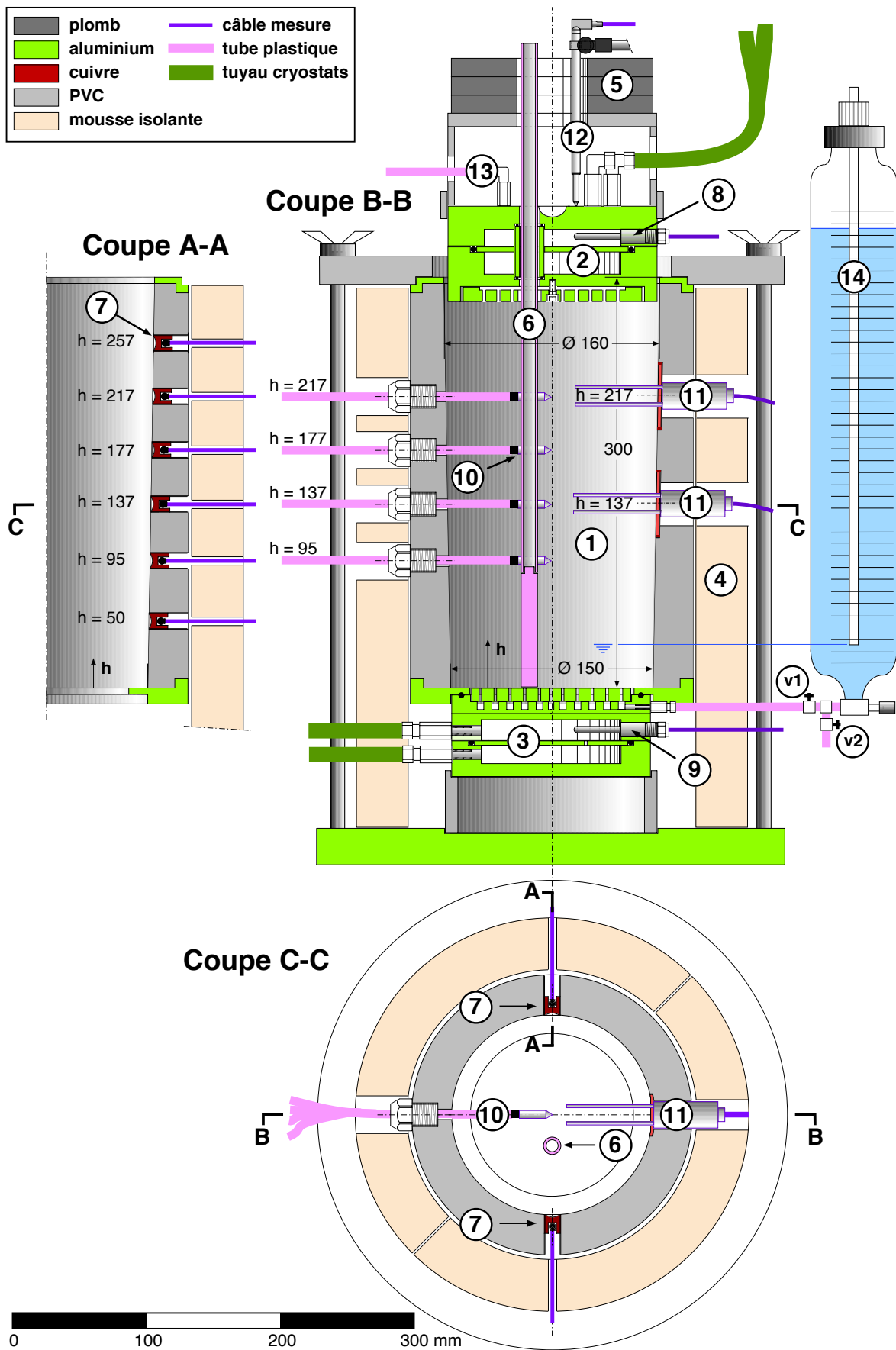
L'éprouvette est compactée dans le moule manuellement ou avec le compacteur Proctor. Le moule est posé sur l'embase de compactage (fig. 4-6). Une hausse permet le compactage au-dessus de la surface supérieure du moule et un arasage avec un outil adéquat. Les énergies de compactage sont d'environ $0,4 \text{ MJm}^{-3}$ ou d'environ $0,6 \text{ MJm}^{-3}$.

4.2.3 Vase de Mariotte

Un vase de Mariotte permet de fixer la hauteur de la nappe dans l'éprouvette et de mesurer le volume d'eau aspiré par le phénomène du gel. Son volume est de quelque 1000 cm^3 (No 14 sur la fig. 4-2).

4.2.4 Cryostats

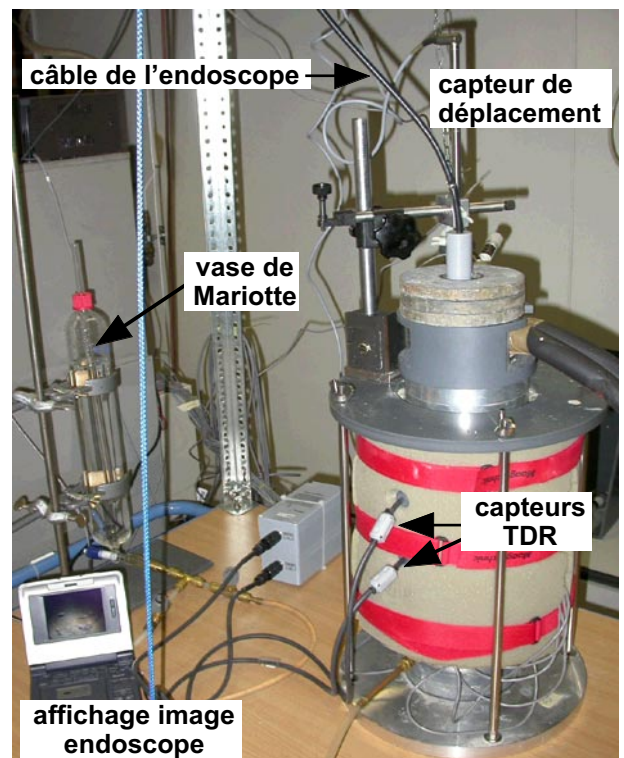
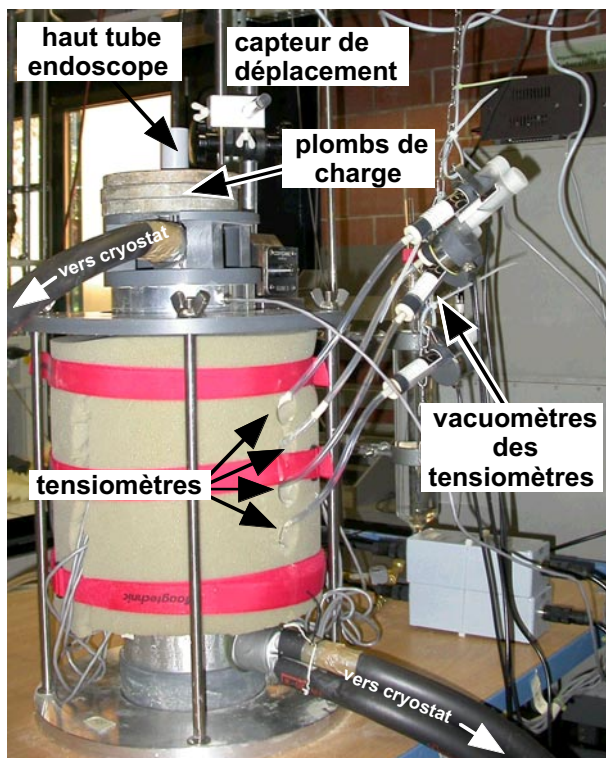
Trois cryostats sont nécessaires, l'un pour le contrôle de la température dans l'embase, un autre pour le contrôle de la température dans la tête et un dernier pour le contrôle de la température entre les deux isolations (voir § 4.2.5) La température de l'embase est toujours positive et son contrôle est assuré par un vieux thermostat Huber. La température de consigne est introduite sur son tableau de commande et il n'a aucune liaison avec la chaîne d'acquisition de données. La température de la tête est contrôlée par un cryostat Haake Phoenix P1-C25P. Sa consigne peut être introduite directement sur le tableau de commande du cryostat ou au moyen d'un boîtier analogique externe alimenté par une tension produite par le datalogger Agilent et un « virtual instrument » (VI) Labview.

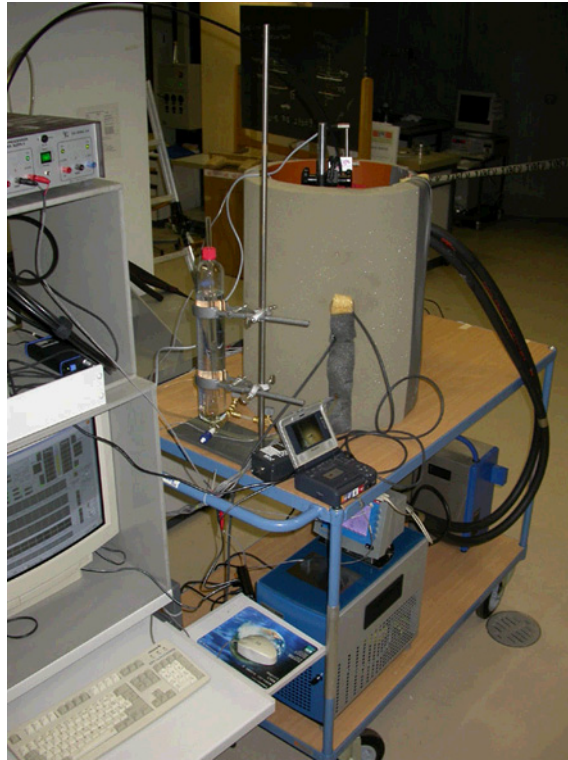


4-2 Le moule avec charge par anneaux de plomb

Légende de la figure 4-2

(1)	Moule légèrement conique en PVC	diamètre intérieur supérieur	160 mm
		diamètre intérieur inférieur	150 mm
		hauteur	300 mm
(2)	Tête de refroidissement	en aluminium, pour le refroidissement du sommet de l'éprouvette.	
(3)	Embase	en aluminium, pour le refroidissement du pied de l'éprouvette et pour le contrôle du niveau d'eau dans l'éprouvette par le vase de Mariotte (14).	
(4)	Isolation moule	en mousse plastique.	
(5)	Anneaux de charge	en plomb, trois anneaux de plomb de chacun 2,5 kg.	
(6)	Tube de l'endoscope	introduit dans l'éprouvette après réalisation d'un trou avec le carottier prévu à cet effet ; une échelle est collée à l'intérieur et l'endoscope (\varnothing 8,7 mm, longueur 52 mm, câble \varnothing 8 mm) est glissé à l'intérieur.	
(7)	Thermistances du moule	YSI 010 ; pour la mesure des températures sur deux axes à l'intérieur du moule.	
(8)	Thermistance de la tête	YSI 101 ; pour la mesure de la température au sommet de l'éprouvette.	
(9)	Thermistance de l'embase	YSI 101 ; pour la mesure de la température au pied de l'éprouvette.	
(10)	Tensiomètres	SMS 2030S1	
(11)	Capteurs TDR de teneur en eau non gelée	Trime P2D 65	
(12)	Capteur de déplacement	HBM K-WA 50 mm pour la mesure du gonflement au sommet de l'éprouvette	
(13)	Tube d'eau de la tête	pour, notamment, la mesure du volume d'eau	
(14)	Vase de Mariotte	assure un niveau constant de l'eau baignant le pied de l'éprouvette, la mesure de la variation du volume d'eau dans l'éprouvette. Son volume total est de quelque 1000 cm ³ .	

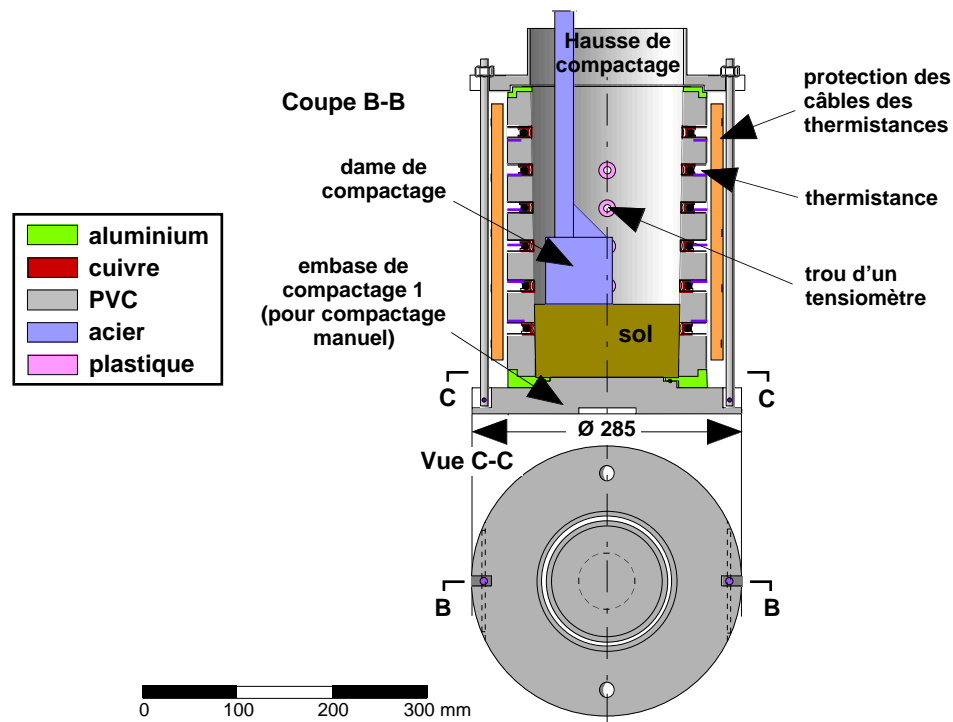
**4-3 Cellule sans son isolation extérieure**



4-4 Cellule avec son isolation extérieure et une partie de la chaîne de mesure



4-5 Tout le dispositif, avec et sans isolation extérieure



4-6 Le moule pendant le compactage manuel de l'éprouvette

4.2.5 Isolations thermiques

Malgré la double isolation (voir figures 4-2, 4-3, 4-4), les isothermes à l'intérieur de l'éprouvette ne sont pas horizontales. Lors des premiers essais consacrés surtout à l'observation de la formation et de la fonte des lentilles de glace, ainsi qu'à la mesure de la variation de la succion capillaire et de la teneur en eau non gelée sur l'axe de l'éprouvette, ce défaut ne prêtait pas trop à conséquence. Cependant, lors des essais sous la presse où le principal paramètre à mesurer était le module résilient, ce défaut ne pouvait plus être toléré.

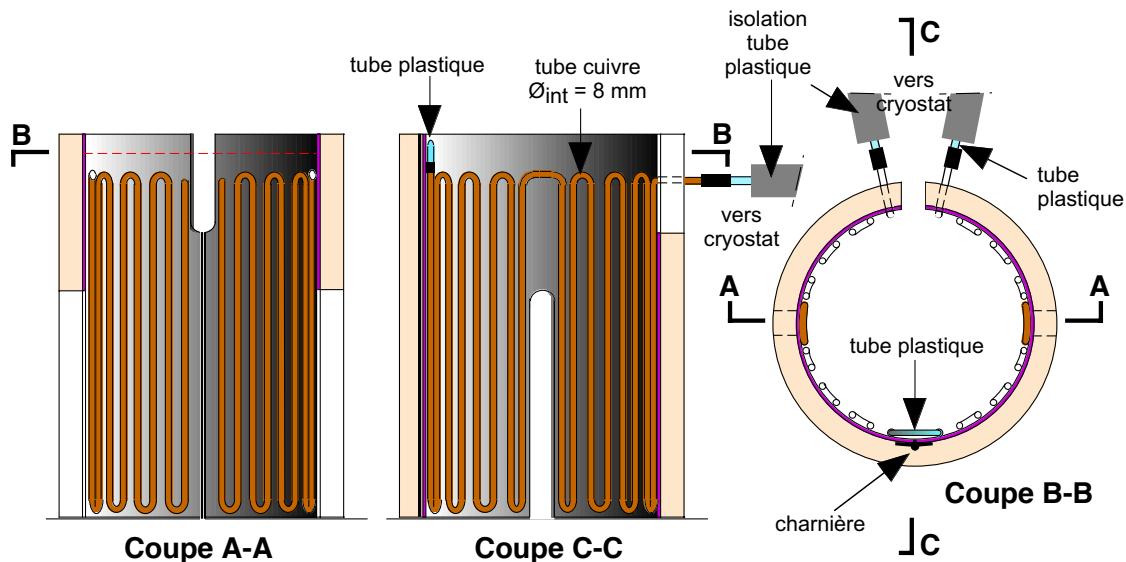
Un dispositif de refroidissement de l'espace entre l'isolation intérieure et celle extérieure a dû être ajouté. Il est décrit sur la figure 4-7. Le troisième cryostat nécessaire à ce refroidissement est réglé à -1°C de façon à ce que la température de l'air entre les deux isolations soit d'environ $+1^{\circ}\text{C}$. Cela équivaut, approximativement, au placement de tout le dispositif d'essai dans un local dont la température de l'air est de $+1^{\circ}\text{C}$.

4.2.6 Gradient thermique

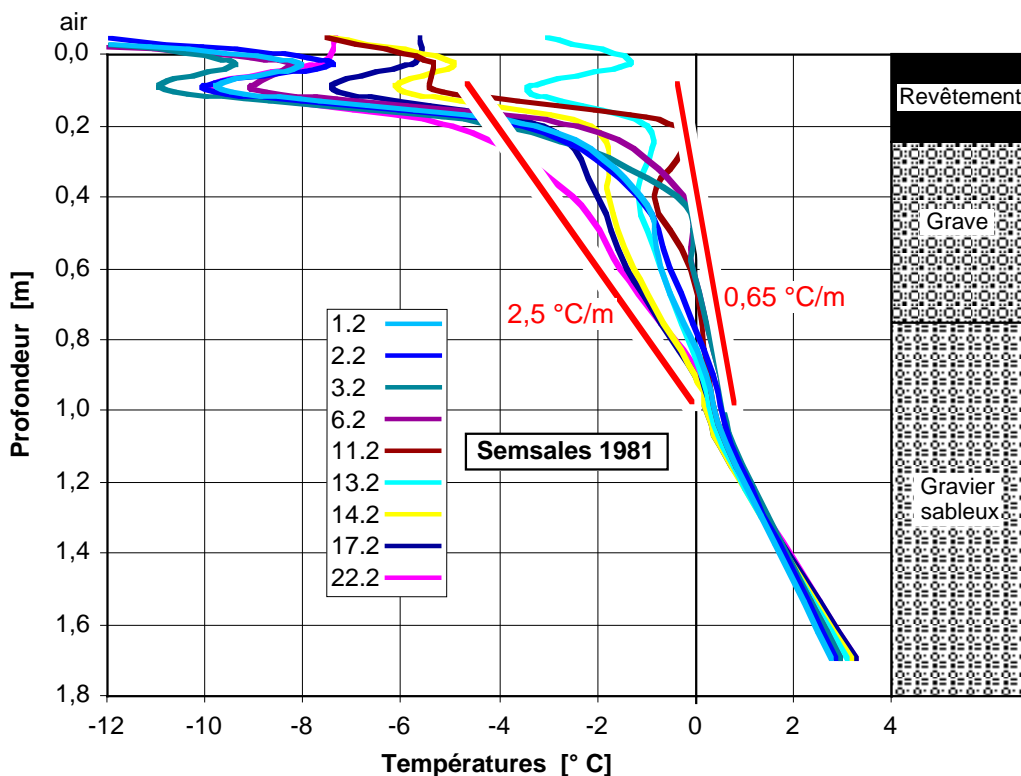
Pour qu'un essai au gel et au dégel d'un sol ait une signification pratique, il faut que le gradient thermique vertical à l'intérieur de l'éprouvette soit proche de ceux que l'on peut mesurer dans les fondations et infrastructures de voies de communication. En effet, même si l'éprouvette est relativement petite relativement aux dimensions des ouvrages ou formations soumis au gel et au dégel, les essais se font à l'échelle 1 : 1 et seule la zone où se développent les premières lentilles de glace est examinée. Quels sont ces gradients ?

Comme exemple, nous allons utiliser les mesures faites pendant 4 ans près de Semsales (FR-CH), au moyen d'une station météorologique automatique, à l'occasion d'une étude de l'influence du microclimat sur les superstructures routières (Dysli & Engel, 1982). Semsales se

trouve à une altitude de quelque 860 msM dans une région assez froide au climat varié. Le mois de février 1981 est choisi car, sans être extrême sur le plan des températures, on peut le considérer comme assez froid. Les mesures de températures sous la surface de la chaussée décrites par la figure 4-8 permettent de se faire une bonne idée sur ces gradients thermiques.



4-7 Refroidissement de l'espace entre les deux isolations



4-8 Températures mesurées sous une chaussée près de Semsales (FR-CH) avec une enveloppe des gradients thermiques

On constate sur la figure 4-8 que les gradients thermiques dans la fondation et l'infrastructure de la route sont compris entre 0,65 et 2,5 ° C·m⁻¹. Le moule utilisé pour les essais a une hauteur de 300 mm. Pour que le phénomène du gel puisse se développer, sa base doit contenir une nappe phréatique non gelée d'au moins 3 cm de profondeur à une température est de quelque 2 ° C. Le gradient peut ainsi se développer sur une hauteur de quelque 25 cm (voir fig. 4-2). Comme les températures négatives de la tête de refroidissement doivent être au moins de -5° C si l'on veut obtenir des lentilles de glace de plusieurs millimètres d'épaisseur, le gradient thermique minimum est d'environ 28 ° C·m⁻¹, soit beaucoup plus important que celui que l'on peut mesurer sous une route.

Il est malheureusement impossible de faire beaucoup mieux dans un moule d'essai. Celui utilisé pour cette recherche est déjà deux fois plus haut que celui utilisé pour l'essai suisse de la détermination de la sensibilité au gel (SN 670 321). Il a en outre une hauteur plus importante que celle des éprouvettes utilisées dans la presque totalité des recherches comparables exécutées au travers du monde.

4.2.7 Chargement par vérin

Pour l'estimation des modules résilients de déformation, les anneaux de plomb sont remplacés par la partie inférieure d'une cellule de Bishop et Wesley faisant office de vérin. Ce vérin est contrôlé par un actuateur GDS, à savoir un cylindre rempli d'eau dont le piston est actionné par un moteur pas à pas. Ce cylindre est raccordé au vérin par un conduit adéquat. Le moteur pas à pas est commandé par un micro-processeur qui reçoit les paramètres de déplacement du piston par un panneau de commande ou par un ordinateur connecté au micro-processeur par un bus GPIB ou par un autre moyen. La figure 4-9 décrit ce deuxième dispositif de chargement.

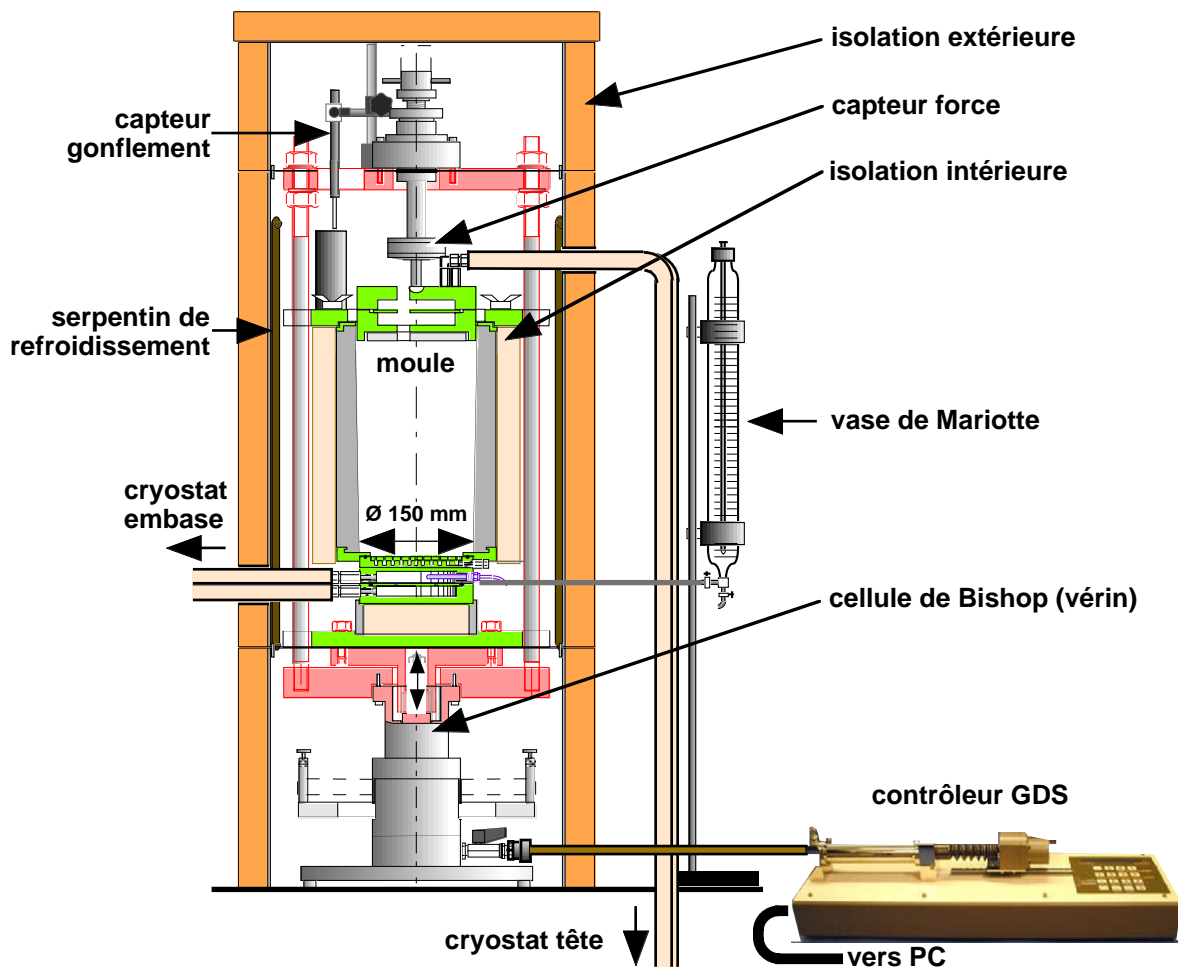
L'actuateur GDS utilisé a un volume de 1000 cm³ et une pression maximale de 2'000 kPa. Le piston avec joint Belofram du vérin a une section de 29,4 cm².

L'étalonnage du capteur de force en fonction de la pression donnée à l'actuateur GDS a été réalisé au moyen d'un capteur de force de grande précision et étalonné par un organisme extérieur au LMS. Avant cet étalonnage, la pression de l'actuateur a été mise à zéro pour compenser le poids du moule (simulé lors de l'étalonnage), du capteur de référence et de la partie inférieure du dispositif s'appuyant sur le vérin Belofram. Cet étalonnage fait l'objet de la figure 4-10.

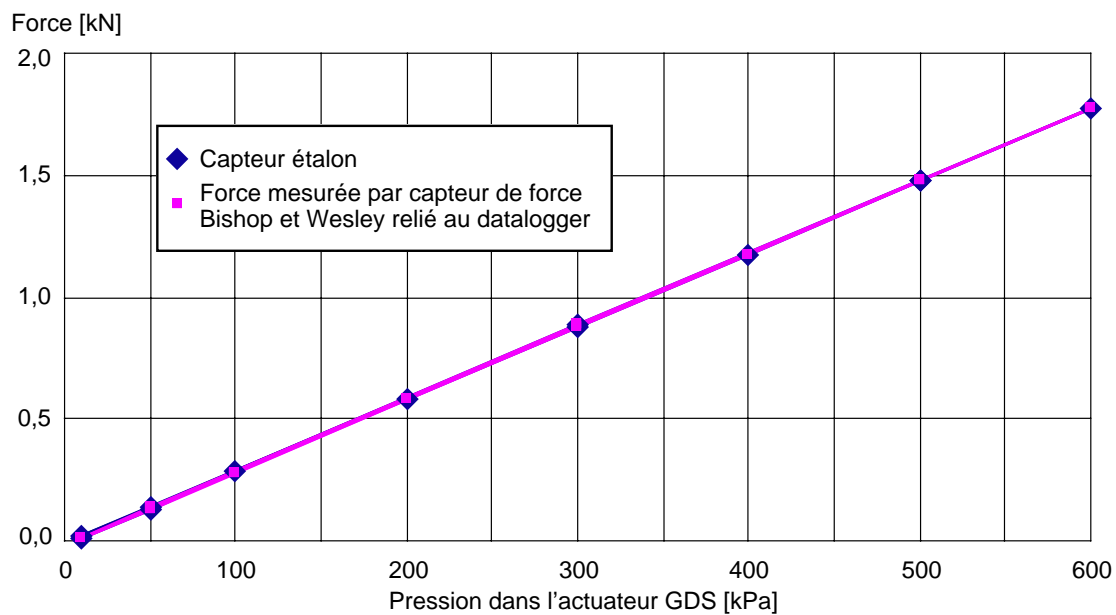
La relation entre la contrainte normale dans le moule σ_v et la pression donnée à l'actuateur GDS p est la suivante :

$$\sigma_v \text{ [kPa]} = (0,1589 \cdot p) - 1,2127 \quad (4.1)$$

Sous la fondation d'une route la contrainte hors trafic ne dépasse pas 20 kPa et celle produite par un essieu de camion chargé au maximum légal ne dépasse pas 70 kPa. À 70 kPa correspond une pression dans l'actuateur GDS de 448 kPa.



4-9 Le moule avec le vérin de charge (cellule de Bishop et Wesley)



4-10 Contrainte dans le moule en fonction de la pression donnée à l'actuateur GDS

4.3 Endoscope

4.3.1 Historique

Les premières photographies de lentilles de glace ont été réalisées sur des carottes prélevées par forage dans des sols gelés. C'est probablement Taber (1929), qui les a effectuées pour la première fois. Le Laboratoire de mécanique des sols de l'EPFL a photographié de telles carottes un peu après la dernière guerre mondiale. Lors des essais en vraie grandeur réalisés dans la halle fosses d'Écublens (Dysli, 1992), de nombreuses photos de ce type ont été effectuées.

De telles photographies permettent un examen précis de la répartition et de la forme des lentilles, mais ne montre pas comment elles se forment et comment elles fondent. Pour cela il faut prendre des photos à un intervalle régulier durant ces deux phénomènes, ce qui nécessite une micro-caméra placée dans le sol ou sur un de ses cotés confiné par une surface transparente (vitre). Ce n'est que très récemment que la miniaturisation des appareils photographiques numériques (CCD) a permis de prendre des telles photographies. Il semble que ce soit des japonais qui aient réalisé, il y a quelques années, ces premières séquences de prises de vue.

Sur une éprouvette de 53 mm de diamètre et de quelque 50 mm de hauteur entourée d'une feuille de vinyle soumise à un gradient thermique avec des températures négatives sur le fond, Sugita, Ishizaki et Fukuda (1997) ont réalisé des photographies au moyen d'un microscope électronique. Ces essais avaient pour but d'examiner la structure d'un sol gelé par congélation artificielle à des températures n'ayant aucune analogie avec celles produites par un gel naturel.

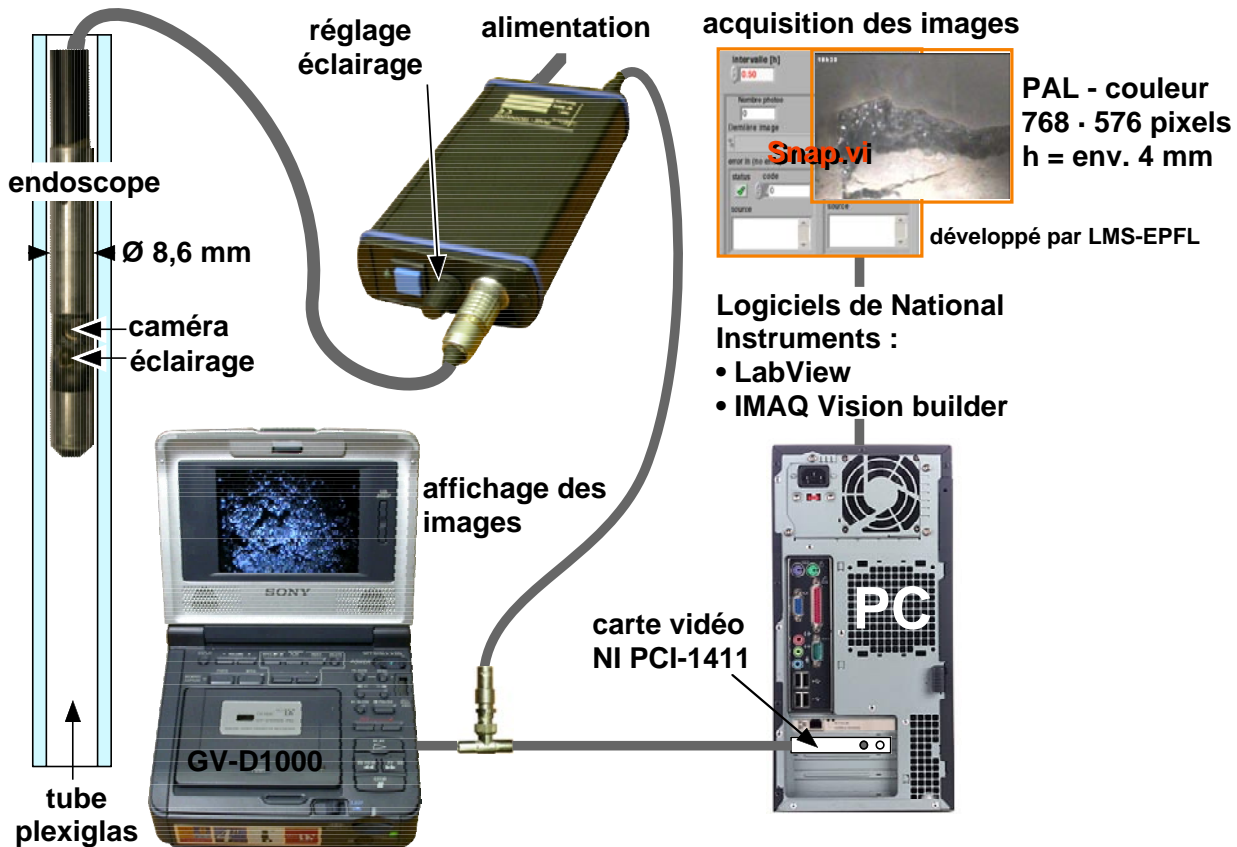
Les séquences de photographies prises par Takeda et Okamura (1997) sont beaucoup plus intéressantes car elles ont été prises sur le côté d'une éprouvette soumise à des gradients thermiques proches de ceux d'un gel naturel. L'éprouvette avait un diamètre de 28 mm de diamètre et une hauteur de 40 mm. Elle était confinée dans un cylindre transparent avec une vitre d'observation de 20 · 12 mm. La caméra CCD, d'un diamètre d'environ 30 mm, permettait des agrandissements de 25 à 175 et les photos avaient entre 1 et 3 mm de côté.

On peut citer encore les photographies prises par Watanabe et al. (1997). Dans ce cas, une mince tranche de 3 mm d'épaisseur était découpée dans un cylindre de sol de 100 mm de diamètre soumis au gel. Dans une chambre froide, la tranche avec les lentilles de glace figées était photographiée par une caméra CCD. Les photos résultantes avaient une dimension de quelque 4·4 mm. Pour observer le développement d'une lentille, il fallait découper des tranches, dans l'éprouvette cylindrique soumise au gel, à des intervalles de temps déterminés.

Toutes les expérimentations décrites ci-dessus avaient pour but l'étude de la structure de sols pendant le gel. Aucune photographie pendant le dégel ne semble avoir été prise.

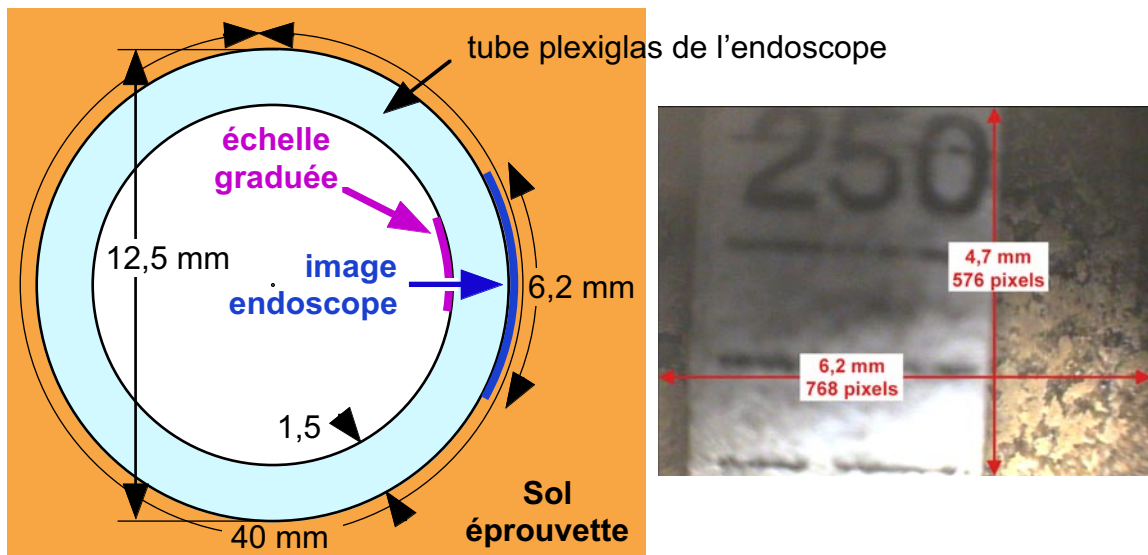
4.3.2 Endoscope utilisé

Pour la recherche qui fait l'objet de ces lignes, on va utiliser ce que la technique actuelle nous fournit de mieux, à savoir un endoscope (fig. 4-11) de très petit diamètre se déplaçant dans un tube de plexiglas foré dans l'éprouvette (No 6 sur la fig. 4-2). Ce dispositif permet de prendre des photographies à l'intérieur même de l'éprouvette, et non plus au travers d'une vitre qui constitue une limite de l'éprouvette et qui produit dans cette dernière un champ de températures qui n'est pas celui que l'on rencontre dans la réalité.



4-11 L'endoscope utilisé

Les images en couleurs enregistrées à un intervalle de temps choisi ont environ 3,5 mm de hauteur et 4,7 mm de largeur. Leur résolution est de 768x576 pixels. La figure 4-12 montre les dimensions de l'image relativement à celles du tube en plexiglas de l'endoscope. L'enregistrement se fait grâce à la carte vidéo NI PCI-1411 et au logiciel IMAQ de LabView et par le VI « Snap » utilisant ce système.



4-12 Dimensions de l'image de l'endoscope

L'éclairage de l'endoscope est prévu pour un tube avec une fente au droit de l'image. Dans notre cas, les essais préliminaires ont montré qu'une telle fente conduisait au remplissage du tube par l'eau du dégel et rendait ainsi les images illisibles. Avec le tube sans fente, la réfraction du plexiglas ($n = 1,5$, comme le verre) abaisse l'axe de l'éclairage et la partie supérieure de l'image est un peu plus sombre que la partie inférieure. La construction d'un endoscope adapté au tube sans fente a été envisagée, mais son coût était trop élevé.

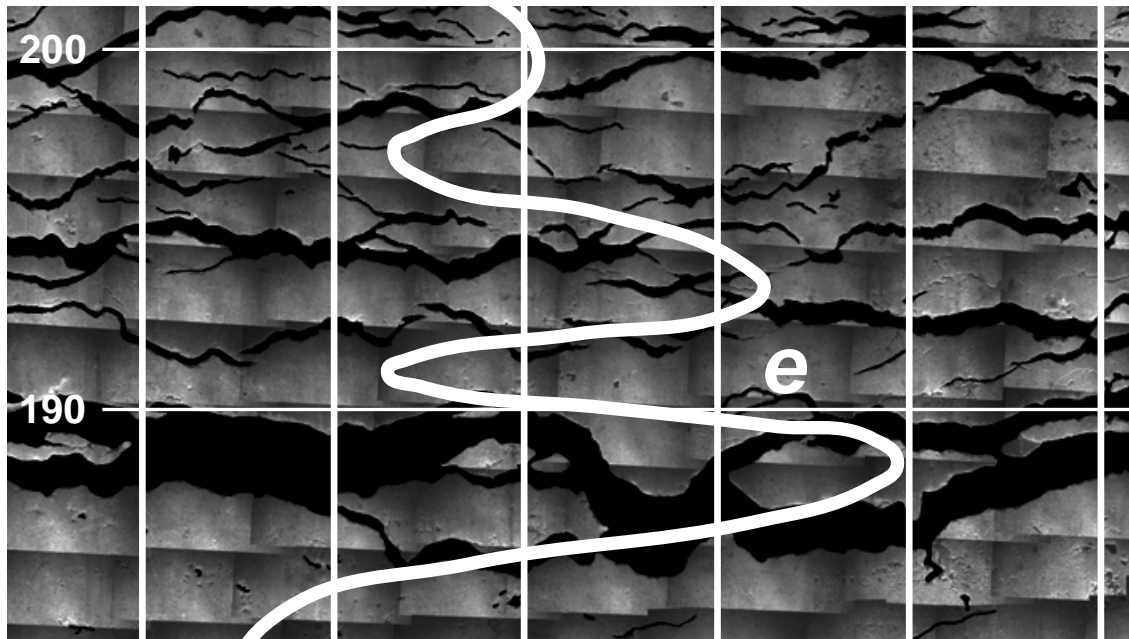
Le mode opératoire des opérations nécessaires aux prises de vue à l'endoscope et à leur éventuel traitement numérique se trouve aux paragraphes 4.11.15 et 4.11.17.

4.3.3 Traitement et utilisation des images de l'endoscope

L'endoscope est utilisé dans deux buts :

- Pour étudier le phénomène du gel ou du dégel d'une lentille de glace, en réalisant des animations (vidéos) pendant toute la durée du phénomène. Pour cela, l'endoscope est placé à un endroit fixe. Les photos sont prises automatiquement à des intervalles donnés (1/4 ou 1/2 heure) au moyen d'un VI du logiciel Labview décrit au paragraphe 4.6.4. Le détail de la technique nécessaire à l'établissement des vidéos est décrit au paragraphe 4.11.15.
- Établir des panoramas à 360°, à un instant donné, pour étudier la répartition et le volume des lentilles de glace. Ils sont réalisés à des niveaux donnés ou, encore mieux, à des niveaux permettant d'avoir une image continue sur une hauteur importante de l'éprouvette. Dans ce dernier cas, un traitement numérique de cette image (un peu laborieux !) permet d'évaluer les gonflements relatifs (indices de vide) sur toute la hauteur de l'image. La figure 4-13 est un extrait d'un tel traitement ; sur cet extrait, l'échelle des indices de vide n'est pas reproduite. Pour l'établissement de ces panoramas, l'endoscope est introduit sans son tube au moment voulu.

Les techniques nécessaires aux traitements des panoramas sont décrites en détail aux paragraphes 4.11.16 et 4.11.17.



4-13 Extrait du traitement numérique d'un panorama avec variation de l'indice de vide
Des figures complètes, avec l'échelle des indices de vide, se trouvent au chapitre 5.

4.4 Capteurs

4.4.1 Thermistances

Les températures sur la tête et l'embase du moule sont mesurées par des thermistances YSI 101 44006 (no 9 sur la figure 4-2 et fig.4-14). Leurs caractéristiques principales sont les suivantes :

- domaine de température : $-55 - +90^{\circ}\text{C}$
- constante de temps : 3,4 secondes
- tolérance : $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$

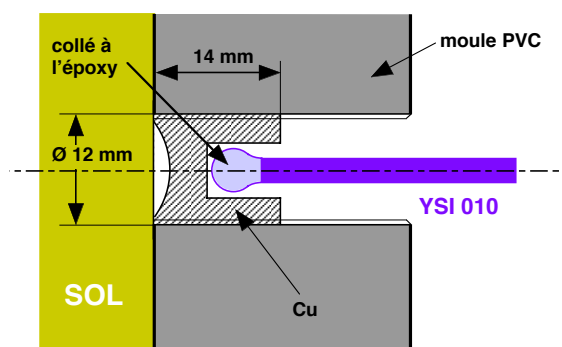


4-14 Thermistance embase et tête de refroidissement

Les variations de températures sur la hauteur du moule sont mesurées au moyen de thermistances YSI 010 (no 7 sur la fig. 4-2 et fig.4-15) placées à la surface intérieure du moule selon deux axes verticaux opposés. Leurs caractéristiques principales sont les suivantes :

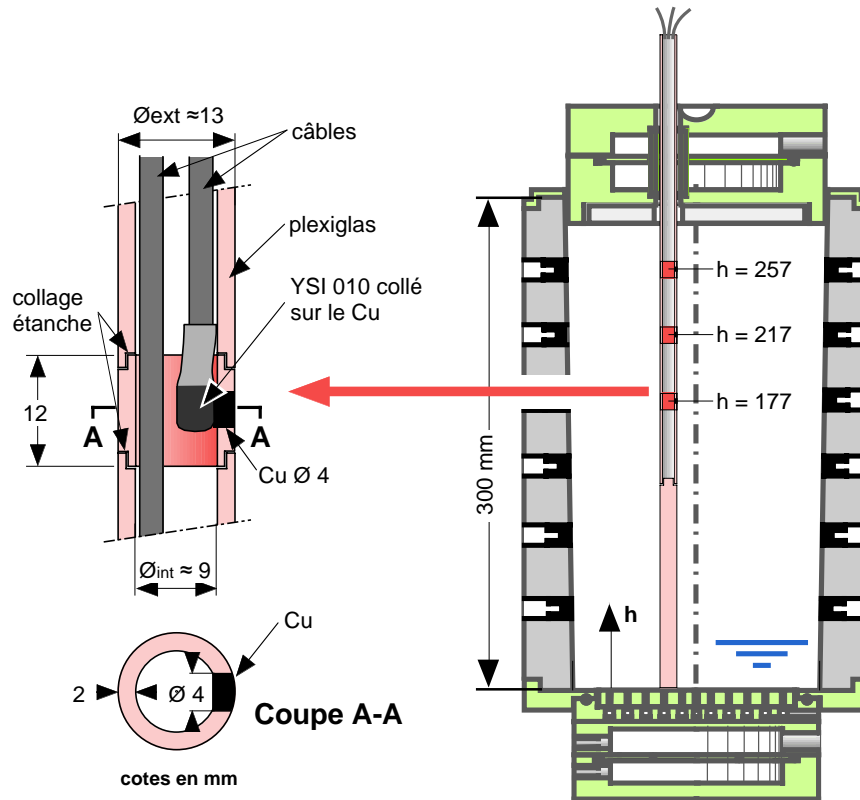
- domaine de température : $-55 - +90^{\circ}\text{C}$
- constante de temps : 5 secondes
- tolérance : $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$

Toutes ces thermistances sont raccordées par un câble à deux fils sur le datalogger.



4-15 Thermistance du moule

Enfin, les températures sur l'axe centrale de l'éprouvette peuvent être mesurées par un tube qui remplace celui de l'endoscope (enfoncé dans le même trou) et qui comprend des thermistances YSI 010. La figure 4-16 décrit ce dispositif.



4-16 Tube pour la mesure des températures sur l'axe de l'éprouvette.

Ce dispositif n'a cependant pas fonctionné très correctement, et cette mesure des températures sur l'axe de l'éprouvette a été aussi réalisée avec des thermistances mises à la place des tensiomètres.

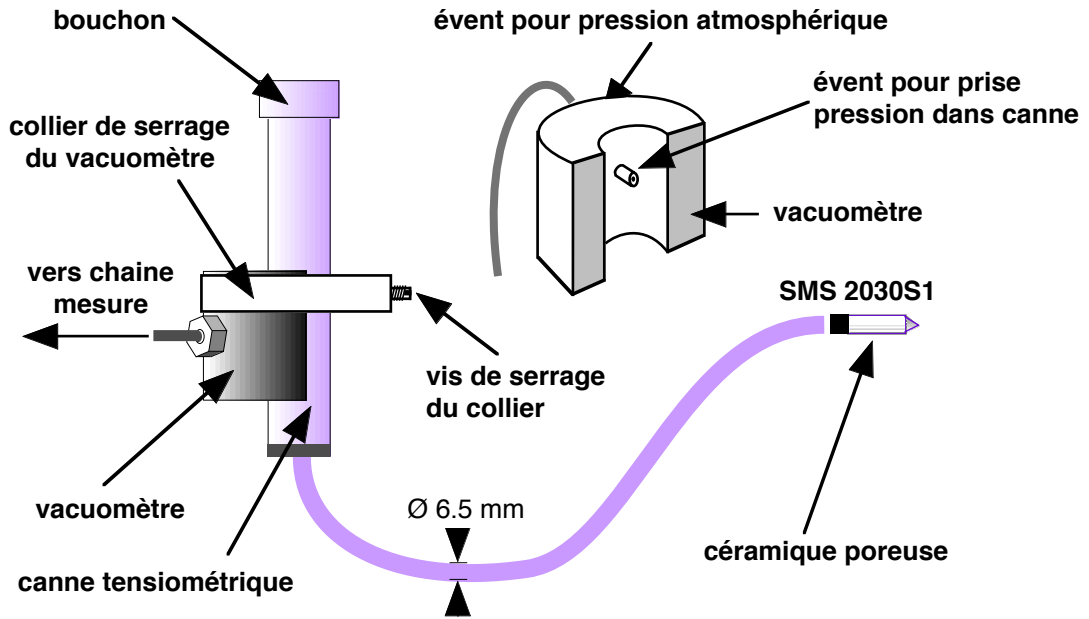
4.4.2 Tensiomètres

Les tensiomètres utilisés sont du type SDEC SMS 2030S1 (fig. 4-17). Ils portent le no 10 sur la figure 4-2 qui montre comment ils sont placés dans le moule. Leurs caractéristiques sont les suivantes :

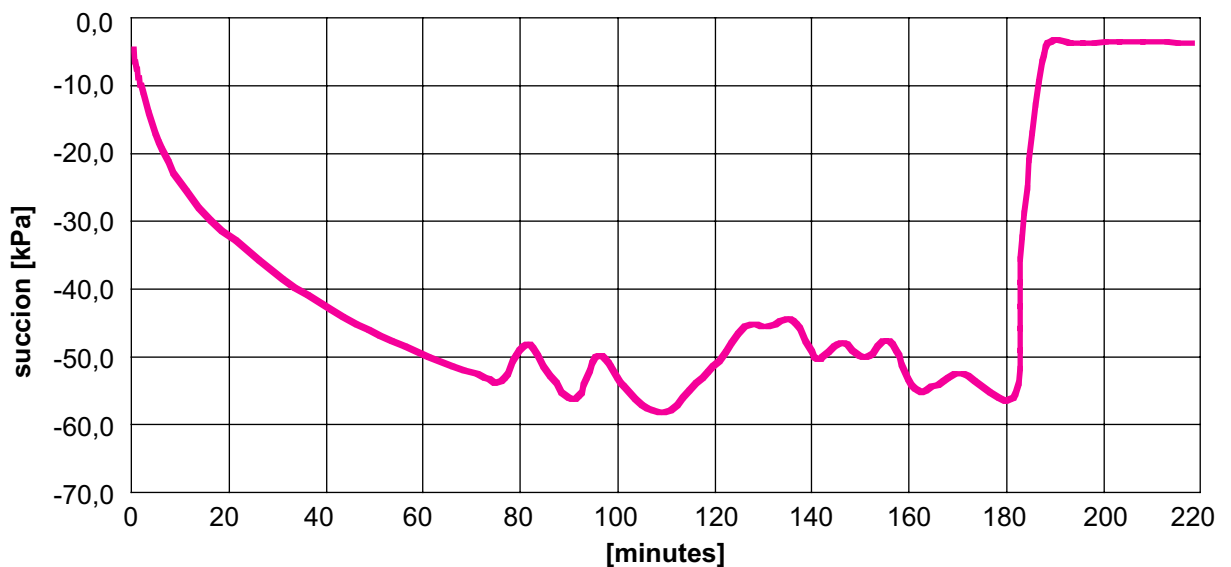
- diamètre de la céramique : 6 mm
- longueur de la céramique : 25 mm
- pression d'entrée d'air : 1,5 bar
- taille des pores : env. 1,5 μm
- perméabilité : $5 \cdot 10^{-9} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

La succion capillaire est mesurée avec un vacuomètre SDEC 850T dont la précision est de $\pm 0,004\%$. Il est compensé en température de -10 à $+50^\circ \text{C}$. La succion maximale que peuvent mesurer ces vacuomètres est de 95 kPa.

Un exemple des temps de réponse des tensiomètres utilisés est donné sur la figure 4-18 . Un séchage complet ou presque de la pierre poreuse prend environ 3 heures alors que sa re-saturation ne demande que quelque 10 minutes. Lors du séchage, à partir d'une succion de 50 kPa, la valeur mesurée devient instable. Bien qu'une valeur maximale de 95 kPa soit donnée par le constructeur, il est probable que dès 60 kPa la capacité des tensiomètres soit dépassée.



4-17 Tensiomètre



4-18 Temps de réponse d'un tensiomètre (exemple)

4.4.3 Teneur en eau par Time Domain Reflectometry (TDR)

La teneur en eau déterminante pour des essais au gel et au dégel des sols est la teneur en eau non gelée. Les capteurs utilisés sont du type TDR (Time Domain Reflectometry) (fig. 4-19). La figure 4-2 montre où ils sont placés dans le moule. Ils mesurent la constante diélectrique du sol. La teneur en eau est déterminée par la loi de Topp (Toop & Davis, 1985) :

$$\theta_{ng} = - 0.053 + 0.029e - 0.00055e^2 + 0.0000043e^3. \quad (4.2)$$

avec :

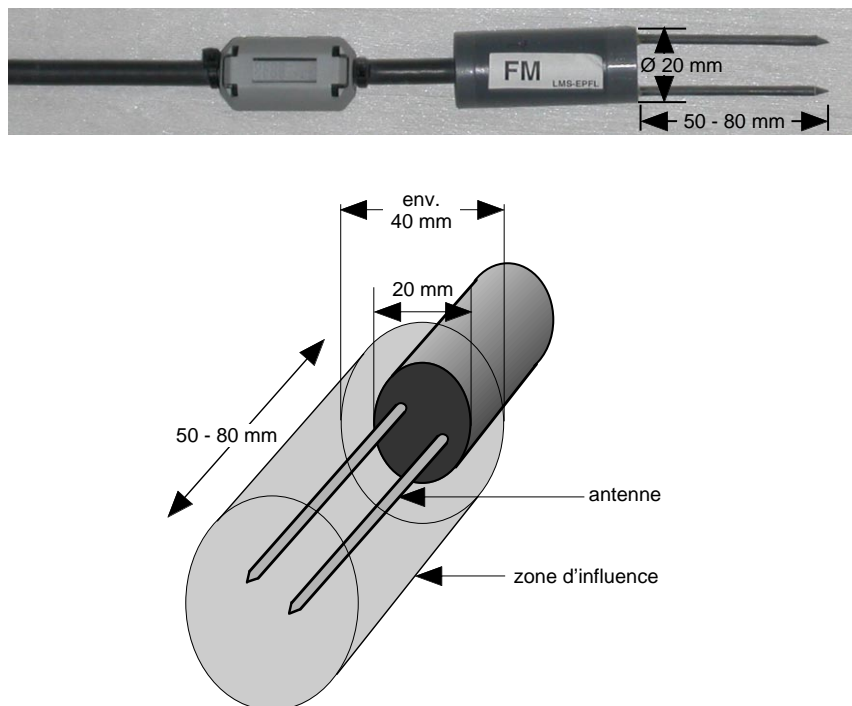
θ_{ng} = teneur en eau volumique non gelée

e = constante diélectrique mesurée par les capteurs.

La constance du sol sec est comprise entre 3 et 5, celle de l'eau est de 80 et celle de la glace d'environ 0. Ainsi, les variations de la teneur en eau du sol affectent de façon prépondérante la constante diélectrique de celui-ci. Qui plus est, comme la constante diélectrique de la glace est presque nulle, cette teneur en eau est la teneur en eau volumique du sol *non gelé* (teneur en eau non gelée). C'est le grand intérêt de ces capteurs pour des recherches concernant le gel et le dégel. La constante diélectrique est déduite du temps de transfert d'une impulsion électromagnétique dans le guide onde (50 – 80 mm sur la fig. 4-19)

Les capteurs utilisés sont des TRIME P2D de 20 mm de diamètre. L'électronique associée utilisée pour la recherche est de deux types :

- TRIME-FM, à savoir un module qui affiche la teneur en eau sur un petit écran après pression manuelle sur un bouton. Ce module est livré pré-étalonné.
- TRIME –ES, à savoir un module « fermé » qui est lié à une chaîne de mesure et qui doit être programmé via un PC en ce qui concerne l'intervalle des mesures. Ce module doit être étalonné (voir § 4.9.3). Deux de ces modules sont utilisés pour la recherche.

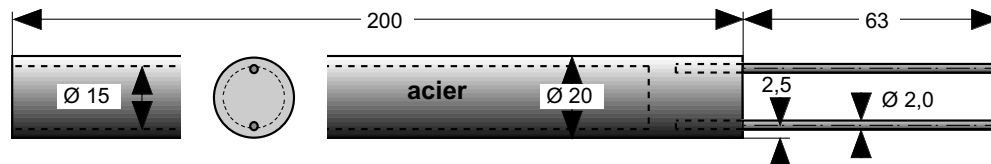


4-19 Capteur TDR et sa zone d'influence

La zone d'influence de la mesure est donnée sur la figure 4-19. Si l'on considère les dimensions du moule, elle est importante. Les valeurs mesurées sont donc, pour des antennes de 80 mm, des moyennes sur un volume de 100 cm³, volume à comparer à celui du moule qui est de quelque 5600 cm³. En outre, la teneur en eau non gelée est fonction de la température et cette dernière varie horizontalement car, malgré l'importante isolation thermique du moule, les isothermes ne

sont pas horizontales. Après quelques essais, ce défaut a été fortement atténué par le refroidissement de la température entre les deux isolations (§ 4.2.5).

Lors de l'enfoncement des capteurs TDR dans l'éprouvette par les trous prévus à cet effet, leurs antennes subissent des efforts importants et peuvent se tordre, voire se casser. Pour cette raison et dès l'essai no 6, un dispositif particulier a été construit pour permettre la réalisation de deux pré-trous rectilignes d'un diamètre légèrement inférieur à celui des antennes. Cette sorte de poinçon est enfoncée dans l'éprouvette, puis retiré, avant l'enfoncement du capteur. Ce dispositif fait l'objet de la figure 4-20.



4-20 Poinçon pour la pose des capteurs TDR

4.4.4 Déplacement vertical

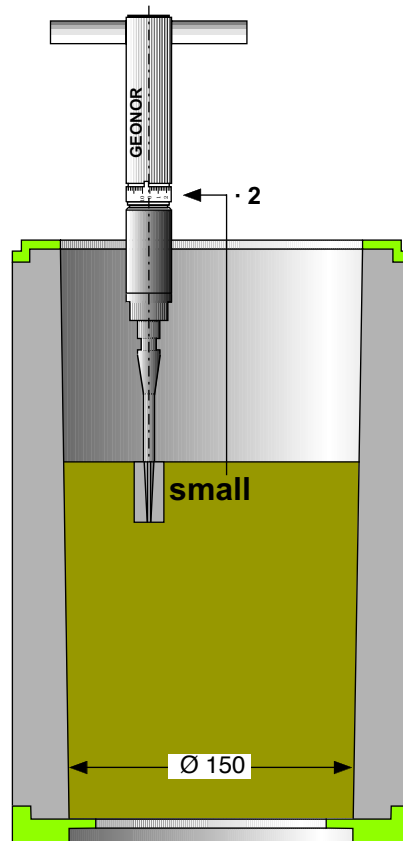
Un capteur de déplacement HBM WA mesure les mouvements verticaux (gonflements) de la tête de refroidissement (no 12 sur la fig. 4-2). Sa course est de 50 mm et sa déviation linéaire maximale de 0,14%.

4.4.5 Contrainte verticale

Dans la configuration du moule avec vérin (fig 4-9), la contrainte verticale est mesurée par le capteur de force fourni avec la cellule de Bishop et Wesley. Il permet de mesurer une force maximale de 3 kN avec une précision de environ 0,002 kN.

4.4.6 Résistance au cisaillement

En fin de certains essais, pendant l'extraction du matériau de l'éprouvette, des mesures de résistance au cisaillement sont réalisées à différentes profondeurs au moyen du scissomètre de poche GEONOR selon la configuration de la figure 4-21. La petite ailette est utilisée et les valeurs lues sur l'appareil doivent ainsi être multipliées par deux. Ces mesures sont un des moyens permettant d'estimer la profondeur du gel.



4-21 Mesure de la résistance au cisaillement

4.5 Volumes et effets parasites des capteurs dans l'éprouvette

Tout expérimentateur sait qu'un capteur placé dans une éprouvette d'essai modifie, dans une certaine mesure, le paramètre qu'il doit mesurer. Dans les essais qui font l'objet de ce chapitre, c'est, en particulier, le champ des températures et celui des déformations qui pourraient être altérés par les capteurs placés dans l'éprouvette.

La figure 4-2 semble montrer que la densité des capteurs à l'intérieur de l'éprouvette est importante. En fait, si l'on considère le volume de l'éprouvette, ces capteurs n'occupent qu'un volume très faible. En outre, ils sont disposés et conçus de façon à modifier le moins possible le champ des températures.

Mesures des températures : A l'exception des thermistances placées dans le limon de l'éprouvette, elles sont toutes placées dans la paroi du moule et ne modifient ainsi que de façon négligeable le champ des températures à l'intérieur de l'éprouvette. Les thermistances pouvant être introduites sur l'axe de l'éprouvette (fig. 4-16) ont elles un certain effet parasite qui est un peu semblable à celui provoqué par l'endoscope (voir plus bas).

Tensiomètres : Les quatre tensiomètres occupent, à l'intérieur de l'éprouvette, un volume de $9,9 \text{ cm}^3$. Ils sont constitués d'un tube en plastique et d'une pierre poreuse, matière dont la conductibilité est proche de celle du sol. En outre, ils sont approximativement parallèles aux isothermes. Leur effet parasite est ainsi fortement réduit.

Capteurs TDR : Les antennes des deux capteurs TDR occupent, à l'intérieur de l'éprouvette, un volume de $0,9 \text{ cm}^3$. Elles sont en métal, à savoir un matériau dont la conductibilité thermique est environ 35 fois supérieure à celle du sol. Ils sont cependant approximativement parallèles aux isothermes. Les essais comparatifs décrits au chapitre 5 ont montré que leur effet parasite était négligeable.

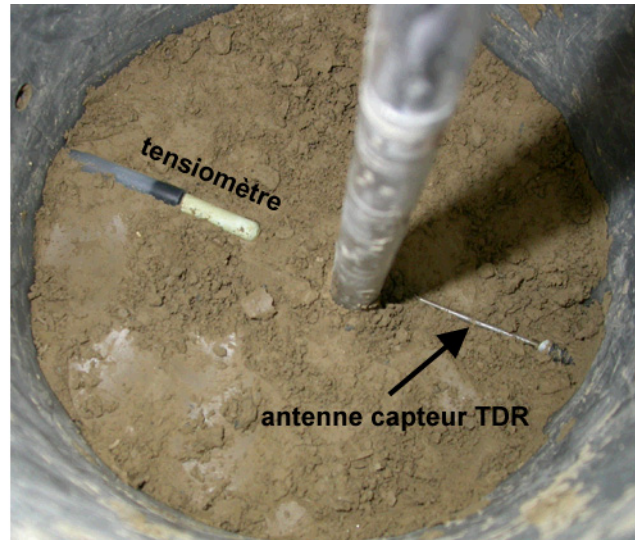
Endoscope et son tube : Le volume du tube de l'endoscope est de $36,5 \text{ cm}^3$. Il est en plexiglas, à savoir un matériau dont la conductibilité thermique est proche de celle du sol. Le tube est cependant placé perpendiculairement aux isothermes. L'endoscope et son câble est par contre essentiellement métallique. L'endoscope et son tube (ou le tube avec les trois thermistances qui peut remplacer celui de l'endoscope) est, de loin, le dispositif qui peut produire le plus d'effets parasites sur le déroulement des essais. Pour ces raisons, deux essais comparatifs (sans et avec le tube) et des simulations numériques ont été entrepris et sont décrits au début du chapitre 5. Ils ont montré que, si ces effets n'étaient pas nuls, ils étaient cependant tout à fait acceptables.

Le volume total des capteurs placés à l'intérieur de l'éprouvette est de $47,3 \text{ cm}^3$. Si on le compare à celui de cette dernière (5100 cm^3), il ne représente que le 1 % de son volume, ce qui est très faible.

Les deux photos de la figure 4-22 montrent, à deux niveaux du moule, la place que prennent les capteurs, à savoir : les capteurs TDR, les tensiomètres et le tube central (endoscope ou thermistances).



Niveau du capteur TDR supérieur



Niveau du capteur TDR inférieur

4-22 Capteurs TDR, tensiomètres et tube central à l'intérieur du moule

4.6 Chaîne d'acquisition de données et de contrôle de processus

4.6.1 Hardware et logiciels utilisés

L'acquisition des données de tous les capteurs se fait grâce à :

- un datalogger Agilent 34970A comprenant :
 - deux cartes multiplexeur à 20 voies chacune 34901A,
 - une carte multifonction 34907A, permettant notamment l'output d'une tension ;
- dans le PC, une carte NI-GPIB permettant la liaison entre le datalogger et le PC par un bus GPIB ;
- un VI (Virtual Instrument), développé par l'auteur de ces lignes avec le logiciel LabView, tournant sur le PC (Windows 2000) qui affiche numériquement et graphiquement tous les résultats des mesures sur l'écran et les enregistre dans un fichier.

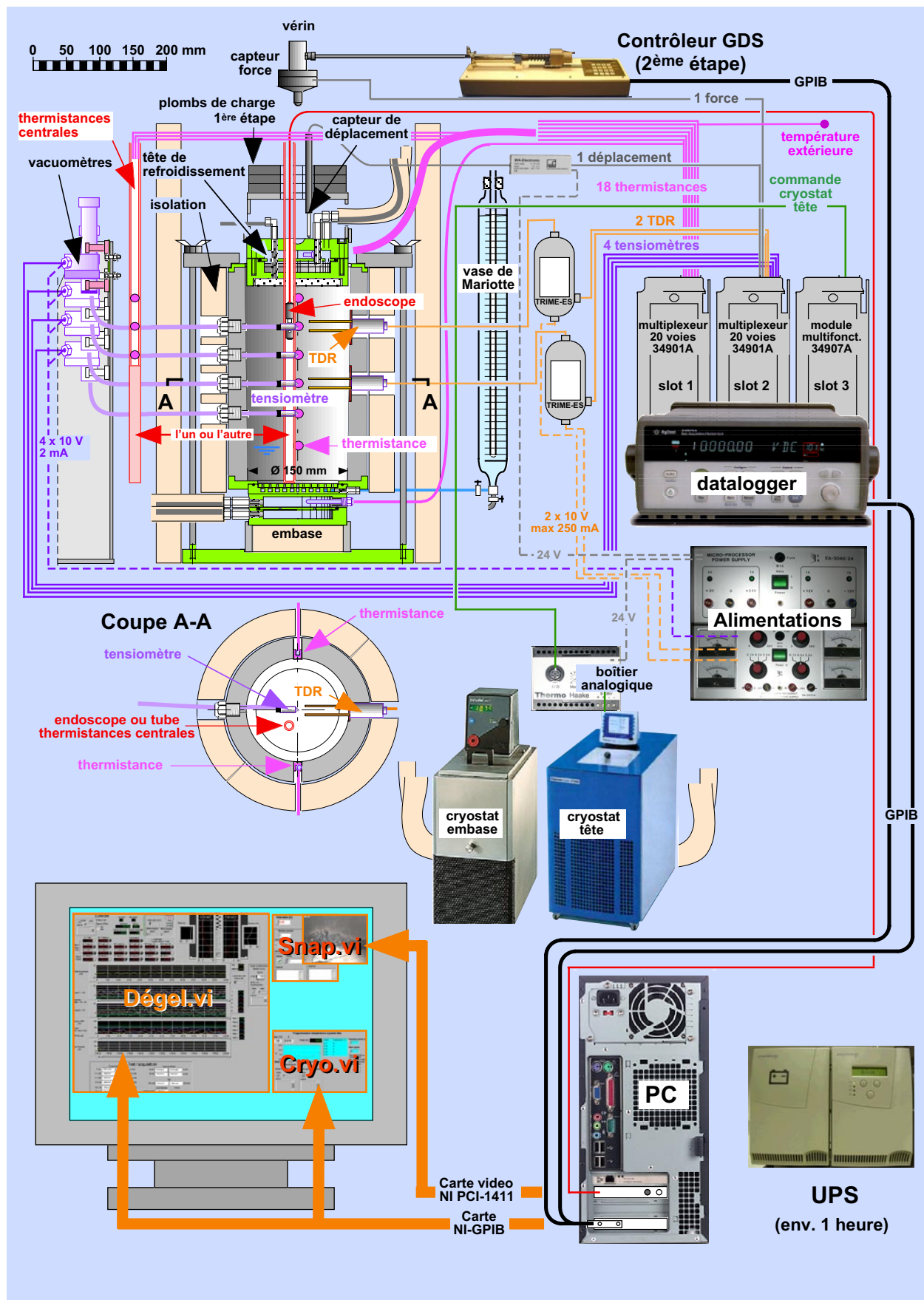
Les images de l'endoscope sont transmises au PC grâce :

- une carte vidéo NI PCI-1411 ;
- un VI permettant d'enregistrer les images au format tiff selon un intervalle de temps choisi.

La figure 4-24 est un schéma du dispositif complet incluant le hardware, le logiciel ainsi que le moule, et la figure 4-23 une photographie de la chaîne d'acquisition des données.



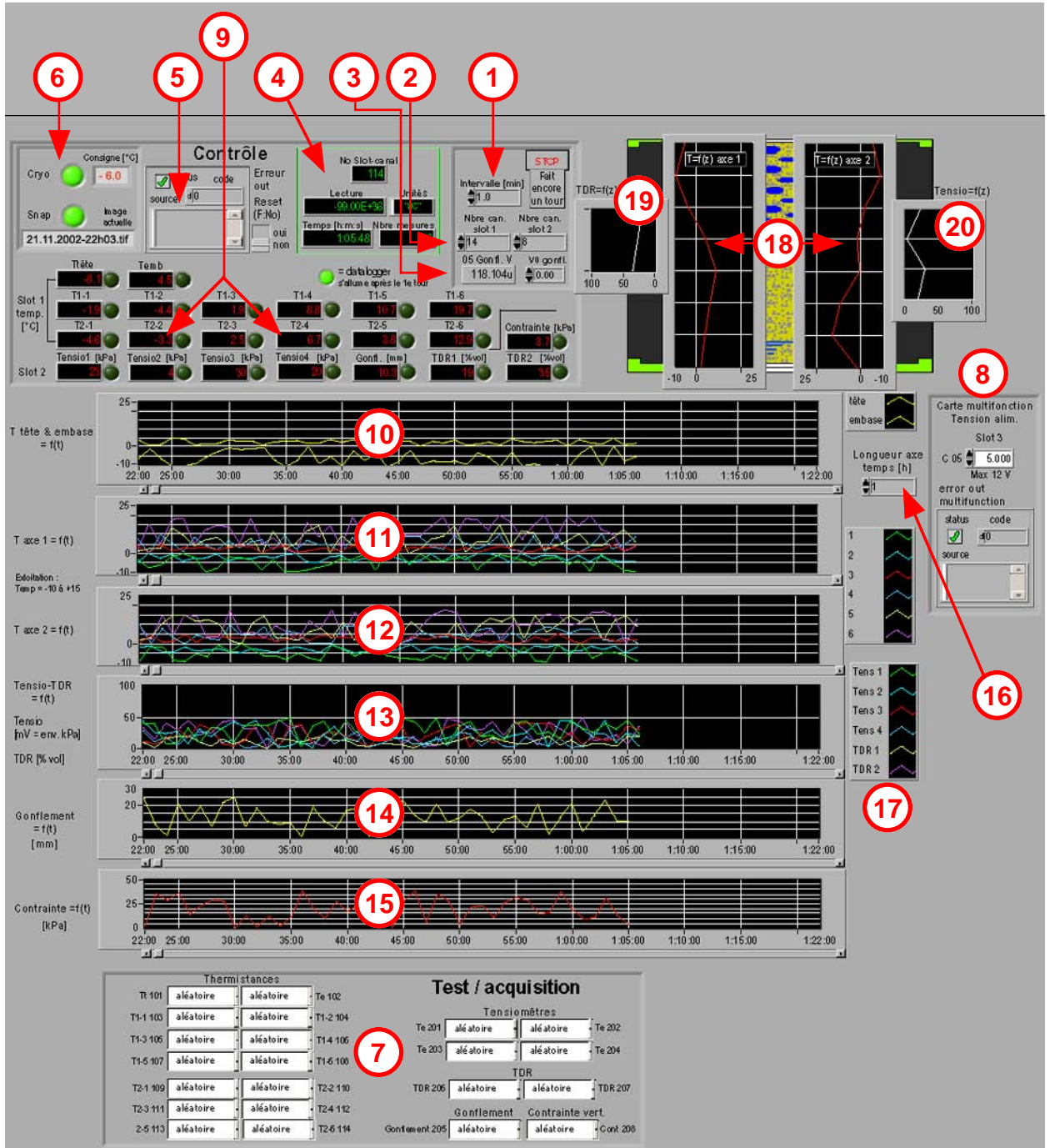
4-23 Chaîne d'acquisition de données



4-24 Schéma du dispositif complet

4.6.2 Acquisition des valeurs mesurées par les capteurs

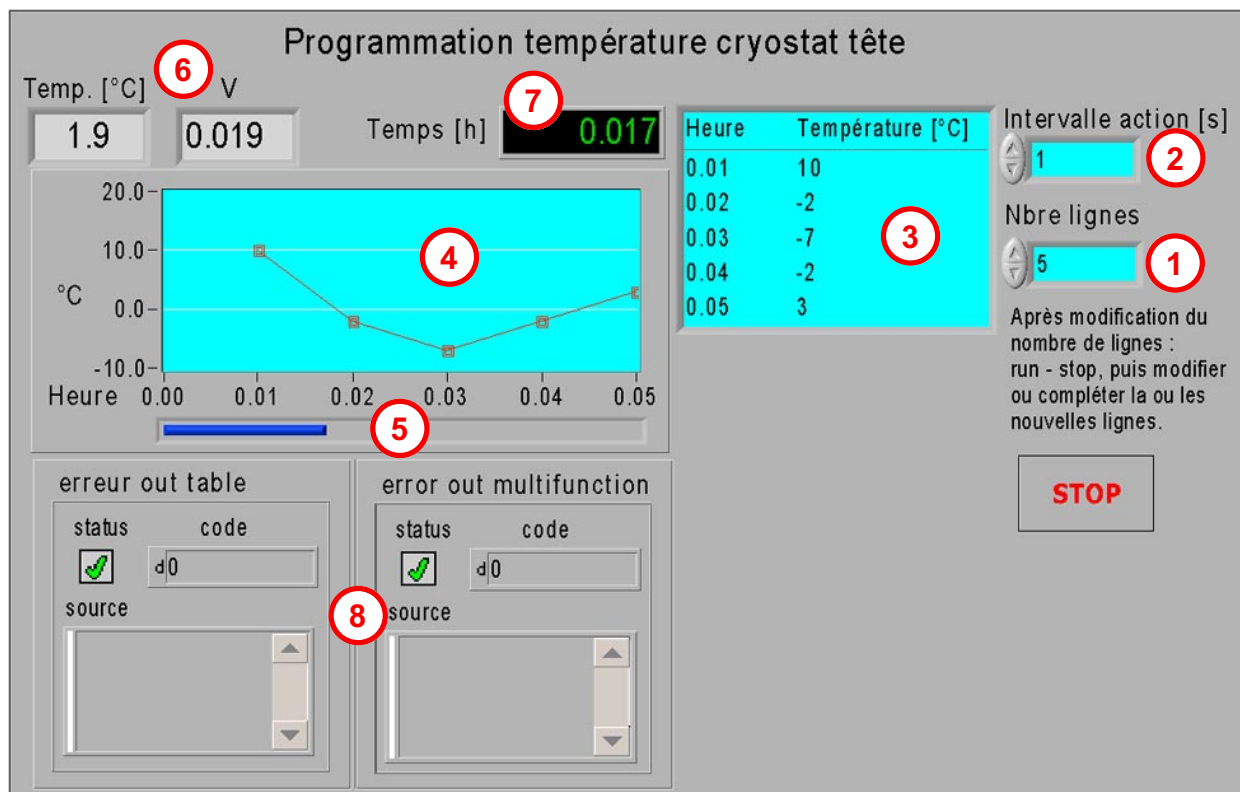
C'est un VI Labview et un datalogger Agilent 34970A qui se chargent de cette acquisition de toutes les valeurs mesurées pendant les essais. Le VI les stocke en grandeurs physiques dans un fichier au format Excel et les dessine à l'écran en fonction du temps. La figure 4-25 décrit le panneau de ce VI.



4-25 Panneau du VI "Dégel"

4.6.3 Contrôle de la température de la tête

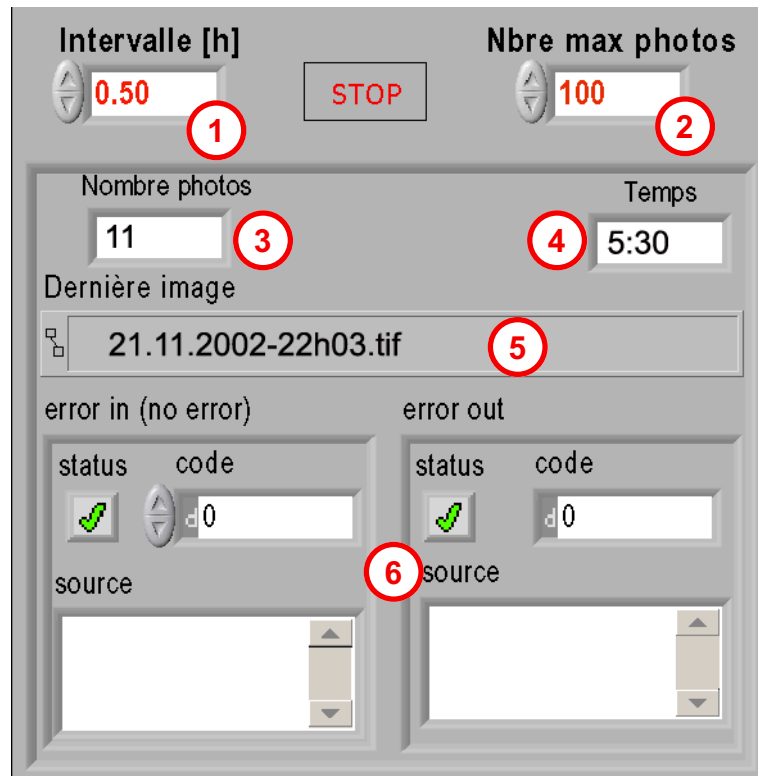
Un VI Labview particulier permet de fixer la température de la tête de l'éprouvette. Il commande le boîtier analogique du cryostat Haake qui permet d'imposer les températures de la tête de l'éprouvette en fonction du temps (polygone). La figure 4-26 décrit son panneau de commande. Une liaison entre le VI général d'acquisition des données (4.6.2) permet de contrôler ces températures sans faire apparaître sur l'écran le panneau du VI de contrôle de la température.



4-26 Panneau du VI "Cryo"

4.6.4 Acquisition des images prises par l'endoscope

Un autre VI Labview permet l'acquisition des images de l'endoscope et fixe notamment l'intervalle de temps entre les captures de ces images. Elles sont stockées sous la forme de fichiers au format tiff. Leurs dimensions sont de 768 · 576 pixels. La figure 4-27 décrit le panneau de ce VI. Une liaison entre le VI général d'acquisition des données (4.6.2) permet de savoir quelle est la dernière photo enregistrée sans devoir faire apparaître sur l'écran le panneau du VI d'acquisition d'images à l'endoscope.



4-27 Panneau du VI "Snap"

4.7 Mesure des déformations par rayons X

4.7.1 Historique

L'usage de rayons X pour étudier le phénomène du gel dans les sols n'est pas récent, il a, par exemple, déjà été utilisé par Penner (1986), Akagawa (1988), Konrad (1989) et Eigenbrod (1996). Cependant, c'est, sauf erreur, la première fois qu'ils sont utilisés, dans le domaine du gel, en conjonction avec des billes de plombs qui permettent une détermination très précise des déplacements dans l'éprouvette. Dans d'autres domaines, cette technique est cependant très ancienne. La première radiographie avec des billes de plomb que l'on connaisse date de 1896, à savoir, une année après l'invention de Roentgen (1896) ! Elle a été prise par Michael Idvorsky Pupin au travers d'une main qui avait reçu des plombs de chasse. Cette très célèbre radiographie, qui se trouve dans la bibliothèque de l'université de Columbia (USA), a certainement donné des idées à des chercheurs pour une utilisation moins brutale des billes de plomb. Il semble que, dans le domaine de la mécanique des sols, cette technique ait déjà été utilisée vers 1920.

4.7.2 Méthode

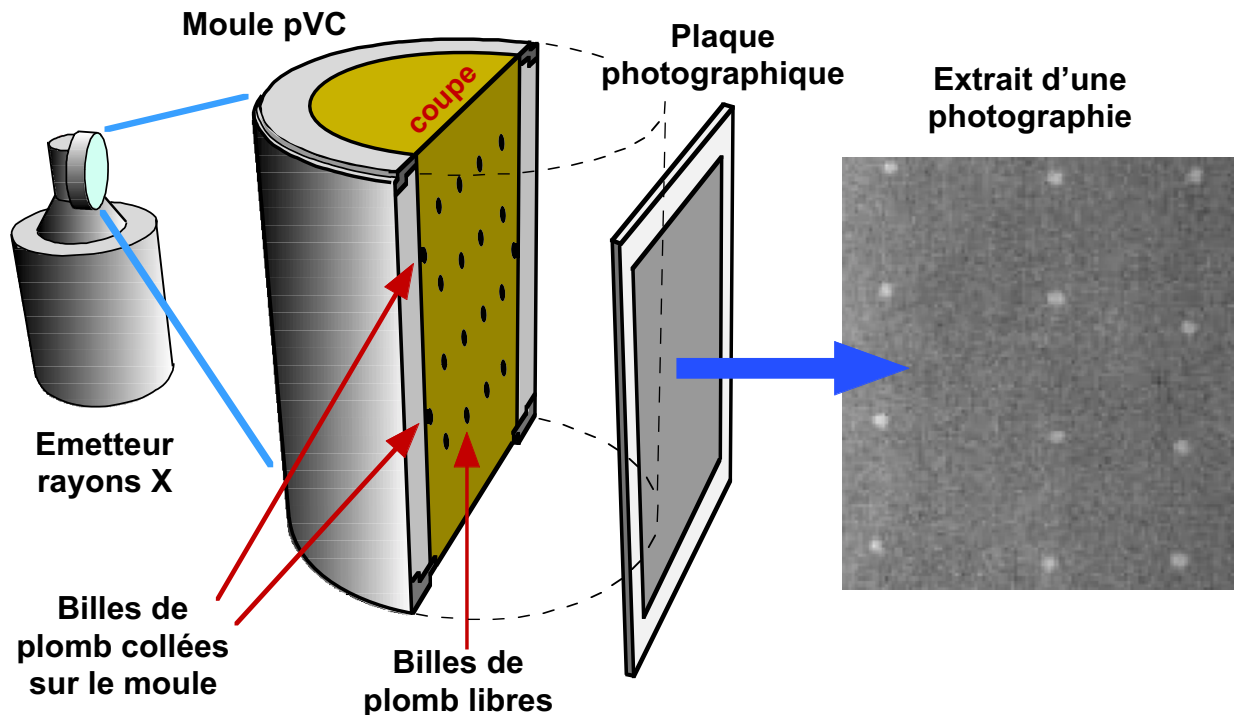
Pour permettre l'estimation des modules de déformation à différents niveaux de l'éprouvette, il est nécessaire de connaître un champ des déplacements le plus précis possible à l'intérieur de l'éprouvette. La méthode choisie consiste, tout d'abord, à coller au moins quatre billes de plomb sur, approximativement, les quatre coins du conteneur de l'éprouvette. Les coordonnées des centres de ces billes dans le système du conteneur doivent être connues exactement. D'autres billes sont ensuite placées à l'intérieur de l'éprouvette, si possible selon une grille régulière. Pendant le processus de déformation de l'éprouvette, des photos aux rayons X sont prises à des intervalles de temps ou de déformation déterminés. Le contraste des masses volumiques du plomb et du matériau de l'éprouvette est assez grand pour que les billes soient visibles sur les photos. Les coordonnées des billes de l'éprouvette sont ensuite mesurées, dans le système des photos aux rayons X, par une technique de traitement d'images. Enfin, leurs coordonnées dans le système du conteneur de l'éprouvette sont déterminées par une transformation Helmert.

Cette méthode est bien connue de l'auteur de ces lignes car il l'a introduite au LMS, il y a très longtemps, et le matériel acquis à l'époque est aujourd'hui encore opérationnel. Il s'était inspiré des travaux de Rose (1970) et de Coumarous (1967).

4.7.3 Application aux essais de gel-dégel

La figure 4-28 décrit le principe de mesure des déplacements à l'intérieur de l'éprouvette au moyen de photos aux rayons X et la figure 4-29 montre le dispositif d'essai placé dans le local protégé.

L'émetteur de rayons X est un Philips MG 150 S avec un tube MÖD 151/Be 50-150 kV. Le diamètre des billes de plomb est de 3 mm et la pellicule photographique de la FUJI 100NIF. Après de nombreux tâtonnements, les meilleurs résultats ont été obtenus avec la petite source, un voltage de 145 kV, un ampérage 6 mA (le maximum avec la petite source) et un temps d'exposition de 8 minutes.

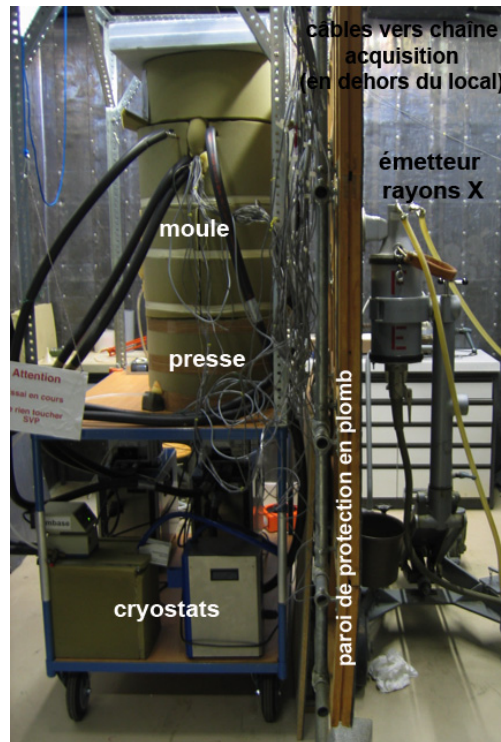


4-28 Mesure des déformations de l'éprouvette par rayons X

4.7.4 Traitement des photos aux rayons X

Les photos aux rayons X sont tout d'abord numérisées par un scanner. Les coordonnées de chaque centre des billes de plomb sont alors déterminées par le logiciel de traitement d'image « IMAQ Vision builder » dans le système de la photo (en pixels). Elles sont ensuite transformées dans le système du moule (mm) par une transformation Helmert au moyen d'un code rédigé dans une feuille Excel et des coordonnées connues des billes de plomb collées sur le moule.

L'erreur moyenne à craindre pour ces coordonnées peut être estimée à 0,2 mm. Les indices de vide en fonction de la hauteur du moule ainsi que les modules oedométriques sont calculés en fonction des déplacements verticaux de chaque bille provenant de la transformation Helmert. Le détail de ces opérations se trouve, dans le mode opératoire, au paragraphe 4.11.19.



4-29 Dispositif, dans sa configuration avec presse, avec l'émetteur à rayons X

4.7.5 Remarques sur les radiographies

L'examen par radiographies classiques (film dans cassette) de billes de plomb placées dans l'éprouvette est un moyen exceptionnel pour étudier l'évolution des lentilles de glace à l'intérieur de l'éprouvette. Il a cependant deux inconvénients :

- Pour placer le film contre l'éprouvette, il faut enlever l'isolation extérieure. La périphérie de l'éprouvette se réchauffe ainsi pendant le temps nécessaire à la radiographie. Cependant, l'inertie thermique de l'éprouvette fait, que le volume concerné par ce réchauffement est faible. On peut considérer ainsi cet inconvénient comme mineur.
- Les opérations d'enlèvement de l'isolation extérieure, de la radiographie, du développement du film et de sa numérisation sont compliquées et prennent beaucoup de temps. Seul un nombre restreint de radiographies a pu être donc pris.

Il existe cependant aujourd'hui une solution qui supprime cet inconvénient. Il s'agit de l'usage d'un dos numérique. Le film dans sa cassette est remplacé par un détecteur de photons lié à un ordinateur. L'image est ainsi directement visible sur l'écran de l'ordinateur et est enregistrée sur son disque. En outre, la fréquence d'acquisition des images n'est déterminée que par le temps d'exposition de l'éprouvette aux rayons X (8 minutes dans notre cas). Enfin, les dimensions de ce dos numérique (par exemple 50 x 40 cm) auraient permis de le placer à l'intérieur de l'isolation extérieure. Malheureusement, le coût de ce dispositif est très élevé !

4.8 Validation de l'appareillage

4.8.1 Moule, tête et embase de refroidissement

Le moule utilisé est un peu semblable à celui utilisé pour l'essai de détermination de la gélivité des sols selon la norme SN 670 321 (essai CBR_F). En ce qui concerne le moule proprement dit, les plus grandes différences sont sa hauteur qui est le double de celle de l'essai normalisé, qui utilise un moule semblable au moule CBR, et son matériau de construction qui est du PVC à la place de l'époxy. Comme cet essai a été mis au point par l'auteur de ces lignes et ses collaborateurs (Dysli & Allenbach, 1982, Thorel & Dysli, 1990), tous les paramètres de ce moule, légèrement conique, sont parfaitement maîtrisés.

Le PVC a été préféré à l'époxy car cette première matière est plus facile à travailler et les matériaux utilisés pour cette recherche sont des sols fins qui n'abrasent pas trop le moule lors de leur gonflement. La tête et l'embase de refroidissement sont presque semblables à celle de l'essai normalisé et il en est de même des deux enceintes d'isolation thermique. Enfin, le maintien dans l'éprouvette d'un niveau d'eau constant par un vase de Mariotte a montré sa grande efficacité dans l'essai normalisé.

4.8.2 Endoscope

L'utilisation d'un endoscope pour la visualisation de la formation et de la fonte des lentilles de glace est une grande nouveauté. Elle a ainsi fait l'objet d'études importantes et d'essais préliminaires réalisés dans le moule CBR_F .

Le premier problème qui s'est posé est celui de la façon de déplacer l'endoscope dans l'éprouvette tout au long d'un essai de gel et de dégel et de l'effet de pont thermique constitué par l'endoscope proprement dit et par son câble. Une première tentative a consisté en un tube de plexiglas fermé dans lequel l'endoscope coulissait au moyen d'un piston et de l'air comprimé amené par un tube en plastique (conductivité thermique proche de celle du sol). Le câble de l'endoscope était de faible diamètre et était sorti de l'éprouvette au travers de la tête de refroidissement. Un modèle de ce dispositif a été construit et testé hors du moule. Les dimensions de ce dispositif étant très faible, sa construction n'a pu être réalisée correctement. Le modèle n'a ainsi pas donné satisfaction et ce système a été abandonné.

La seule solution raisonnable était un tube de plexiglas traversant l'éprouvette sur toute sa hauteur et sortant au travers de la tête de refroidissement de l'éprouvette. Comme l'endoscope utilisé était prévu à l'origine pour réaliser des photos de sols au travers d'un tube de pénétromètre fendu, un tel tube fendu a été réalisé en plexiglas et testé dans un moule CBR_F . Lors du gel, les images étaient de très bonne qualité. Cependant, lors du dégel, l'eau de fonte des lentilles de glace se mélangeait au limon et la qualité des images devenait trop faible. Les essais ont alors été poursuivis avec un tube plein (sans fente). Ils ont montré que cette disposition était acceptable malgré la diffraction de l'éclairage provoquée par la paroi du tube de plexiglas. Ce dernier tube est pourvu d'une échelle qui permet de situer l'endoscope à l'intérieur de l'éprouvette.

4.8.3 Cryostats

Les deux cryostats utilisés : un pour la tête et l'autre pour l'embase, ne posent aucun problème de validation. En effet, les températures de la tête et de l'embase de refroidissement n'ont pas besoin d'être très précises. En outre, elles sont mesurées avec précision par des thermistances. Le cryostat de la tête de refroidissement est un appareil très perfectionné acquis pour cette recherche, alors que celui utilisé pour l'embase est un vieux dispositif utilisé depuis longtemps et avec pleine satisfaction pour les essais CBR_F.

4.8.4 Photos par rayons X

Les essais de validation de la méthode ont débuté en utilisant d'anciennes photographies aux rayons X de sols où des billes de plomb avaient été placées. Ces photos provenaient d'anciennes recherches réalisées au LMS (par ex. Bourdeau & Recordon, 1988, Kharchafi & Dysli, 1991). Ces essais ont notamment permis de mettre au point la technique de numérisation des photos sur un scanner pour transparents, leur traitement avec le logiciel IMAQ Vision builder pour obtenir les coordonnées des centres des billes et le calage de ces coordonnées sur le moule par un logiciel de transformation Helmert.

Ensuite de nombreux essais sur une réplique simplifiée du moule ont été réalisés pour déterminer le positionnement de l'émetteur relativement au moule, donnant les meilleures photographies pour des temps d'exposition donnés. Ces essais ont notamment montré que l'isolation extérieure du moule devrait être enlevée pour réaliser les photos.

4.8.5 Acquisition des données

La chaîne d'acquisition de données et de contrôle de processus, ainsi que les logiciels associés sont décrits dans la section 4.6. Le logiciel de pilotage de cette chaîne a été presque entièrement développé par l'auteur de ces lignes, ce qui a permis de l'organiser de façon à maîtriser au mieux tous les paramètres d'étalonnage des capteurs et d'introduire des procédures élaborées de tests et de contrôle.

À ce propos, on peut notamment noter que :

- Dans le programme, développé sous LabView, chaque capteur fait l'objet d'un sous-vi dans lequel sont introduits et contrôlés les paramètres d'étalonnage du capteur ;
- les données de chaque capteur peuvent être simulées de deux manières différentes, à savoir par des valeurs aléatoires dans le temps et par une valeur constante.

Les tests ont débuté sans liaison du logiciel avec le datalogger en simulant les entrées des capteurs. Dans une deuxième phase, le datalogger a été raccordé au bus GPIB et tous les types de capteurs ont été testés un à un, en dehors de l'éprouvette. Quand le dispositif d'essai a été construit, tous les capteurs ont été raccordés sur le datalogger et, toujours sans éprouvette, ils ont pu être testés dans leur globalité. Enfin, les deux premiers essais avec éprouvette, essais réalisés pour évaluer l'effet des capteurs sur la répartition des températures dans l'éprouvette, ont encore permis de tester le logiciel.

4.9 Validation des capteurs

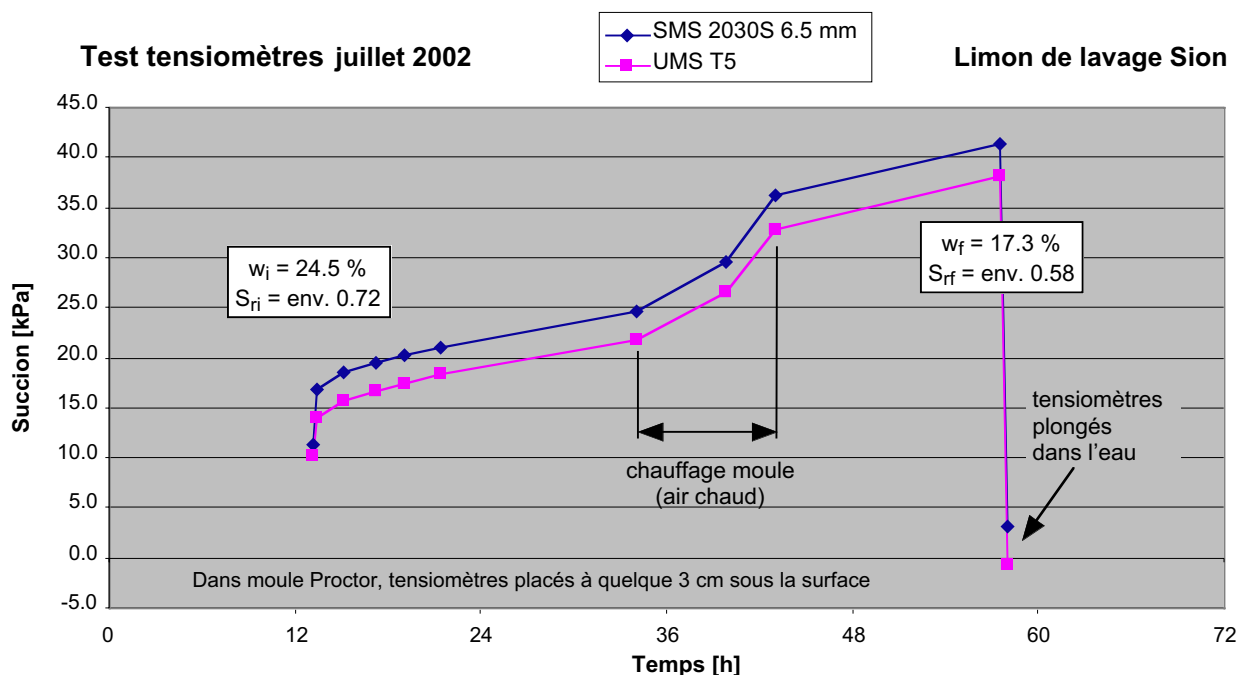
4.9.1 Thermistances

Toutes les thermistances ont été fournies par YSI Inc. Elles sont toutes testées en accord avec différentes normes et vendues avec un certificat. A leur réception, elles ont été encore contrôlées avec succès dans un bain à $0 \pm 0,01^\circ \text{C}$.

4.9.2 Tensiomètres

En principe, la pierre poreuse du tensiomètre n'a pour but qu'établir la continuité des pressions négatives entre le sol non saturé et le tube du tensiomètre. Elle ne peut donc être étalonnée. Il faut cependant s'assurer que sa pression d'entrée d'air (1,5 bar dans notre cas), à savoir la pression d'air nécessaire requise pour que l'air puisse traverser la totalité des pores de la céramique poreuse saturée, et sa conductivité hydraulique ($5 \cdot 10^{-9} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ dans notre cas) soit compatible avec la granulométrie du sol ; ce qui est le cas.

Les capteurs utilisés (vacuomètre) ont été fournis par la maison SDEC et sont tous étalonnés en usine avec un certificat. L'expérience de l'auteur de ces lignes en matière de tensiomètres a cependant montré que des problèmes pouvaient se poser avec ce type de capteur. Pour cette raison, une validation des tensiomètres par comparaison a été réalisée avec un tensiomètre UMS T5, pour deux types de sols : le limon utilisé pour les essais (Biolley) et un limon de lavage provenant d'une gravière près de Sion. La figure 4-30 montre les résultats de cette comparaison pour le limon de Sion. Au vu de l'imprécision de la mesure de la succion capillaire, ces résultats sont tout à fait acceptables.



4-30 Contrôle des tensiomètres

4.9.3 Teneur en eau par TDR

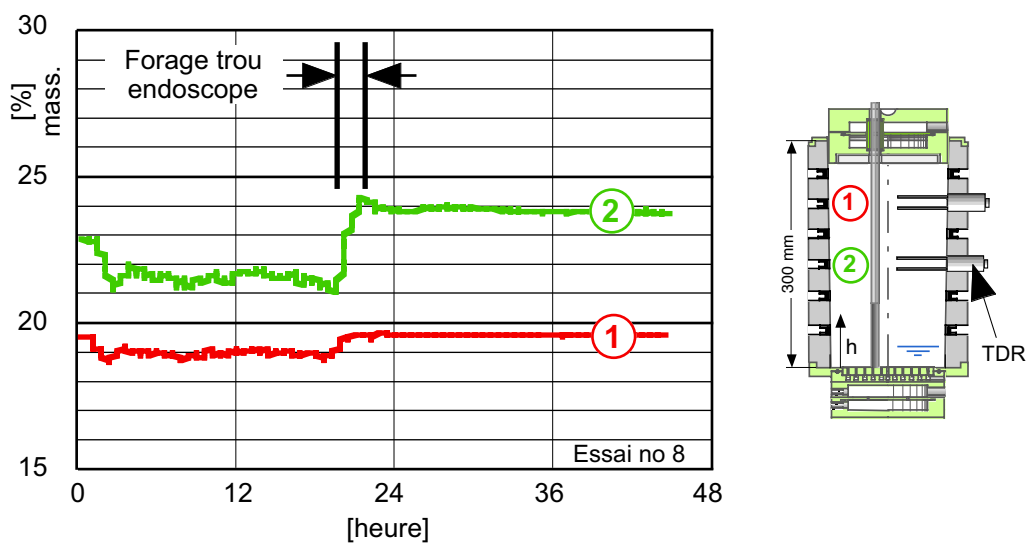
L'appareil Trime-FM avec son électrode P2D a été reçu pré-étalonné (sans certificat). Il a été contrôlé avec succès dans un moule Proctor contenant une éprouvette à teneur en eau connue.

Les 2 appareils Trime-ES avec leur électrode P2D ont été reçus non étalonnés. Deux méthodes d'étalonnage sont proposées par le fabricant :

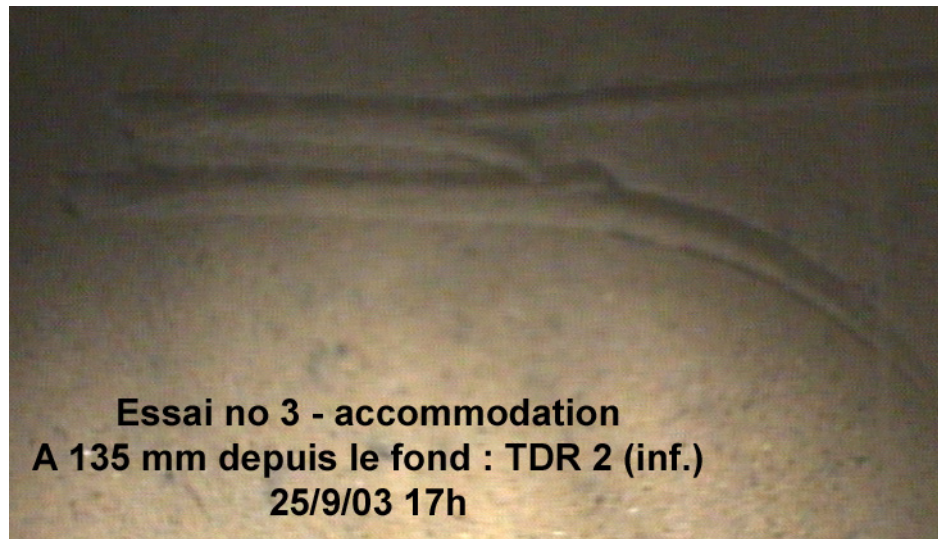
- Un étalonnage élémentaire pour des sols « normaux » qui ne font pas partie des sols « spéciaux » définis ci-dessous. Il ne réalise qu'une compensation de la longueur du câble et des tolérances mécaniques de l'électrode (épaisseur de l'enrobage et longueur des tiges). Il ne permet pas de modifier l'étalonnage standard de l'appareil valable pour les sols normaux. Il consiste à réaliser deux mesures dans deux récipients remplis de microbilles en verre : une dans un récipient sans eau (billes sèches), l'autre dans un récipient avec des billes saturées en eau. Les données d'étalonnage sont calculées et stockées dans le connecteur de la sonde au moyen du programme « Trime WinCal ».
- Un étalonnage précis pour des sols « spéciaux » à haute teneur en argile (>50%), à haute teneur en matières organiques (>10%) ou à très faible masse volumique ($\rho < 1 \text{ t}\cdot\text{m}^{-3}$), avec la détermination préalable de la teneur en eau d'éprouvettes soumises ensuite aux mesures d'étalonnage de l'appareil.

C'est la méthode simplifiée qui a été utilisée car le limon utilisé pour les essais est un sol tout à fait normal au sens des limites données ci-dessus pour les sols spéciaux.

Les antennes des capteurs TDR sont enfilées à la main dans l'éprouvette, après préforage des trous au moyen d'un poinçon spécial. Leur position n'est pas ainsi définie avec précision et les pointes des antennes peuvent ainsi s'approcher plus ou moins du tube de l'endoscope (fig. 4-22). Cela perturbe de façon plus ou moins importante les mesures. Lors d'un essai, le tube de l'endoscope a été enfoncé après le début de l'essai et cela a permis de quantifier cet effet. La figure 4-31 représente ces mesures et montre l'effet du forage de l'endoscope dans un cas particulier. La figure 4-32 montre les antennes d'un capteur TDR qui touchent le tube de l'endoscope.



4-31 Effet du forage du trou de l'endoscope sur les valeurs mesurées par les capteurs TDR



4-32 Antennes d'un capteur TDR contre le tube de l'endoscope

Cet effet peut être important et, pour cette raison, toutes les mesures de la teneur en eau non gelée réalisées avec les capteurs TDR *sont calées sur les mesures de la teneur en eau en fin d'essai et à différentes profondeurs.*

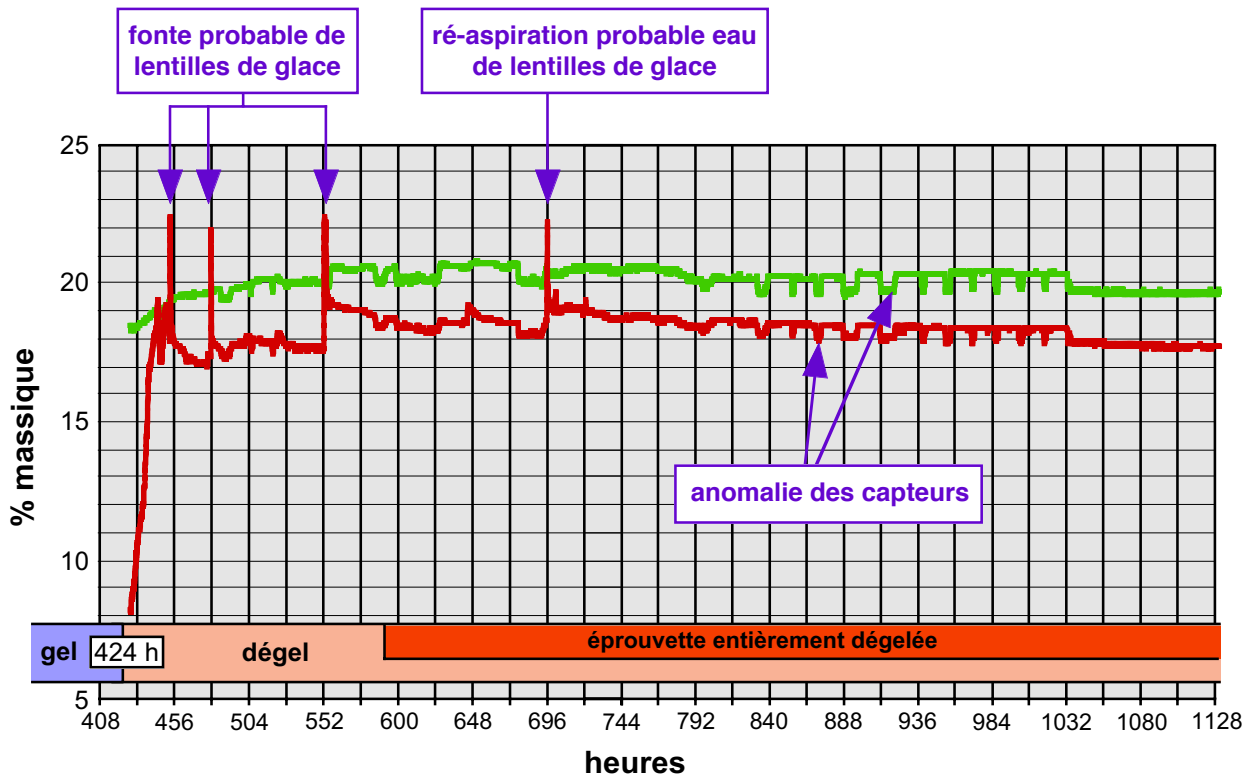
Les mesures avec les capteurs TDR ont montré certaines anomalies qui sont décrites par un exemple sur la figure 4-33; ces anomalies se retrouvent dans tous les essais. Il y a, tout d'abord certaines petites instabilités qui doivent probablement provenir de l'électronique associée aux capteurs. Ensuite, seulement lors du dégel, on constate des pics qui correspondent très probablement à la fonte de lentilles proches de l'antenne du capteur. Cependant ces pics ont été quelquefois constatés après le dégel. Dans ce dernier cas, ils pourraient correspondre au passage à la zone d'une ancienne lentille dont l'eau excédentaire est réaspirée vers le bas de l'éprouvette.

4.9.4 Déplacement vertical

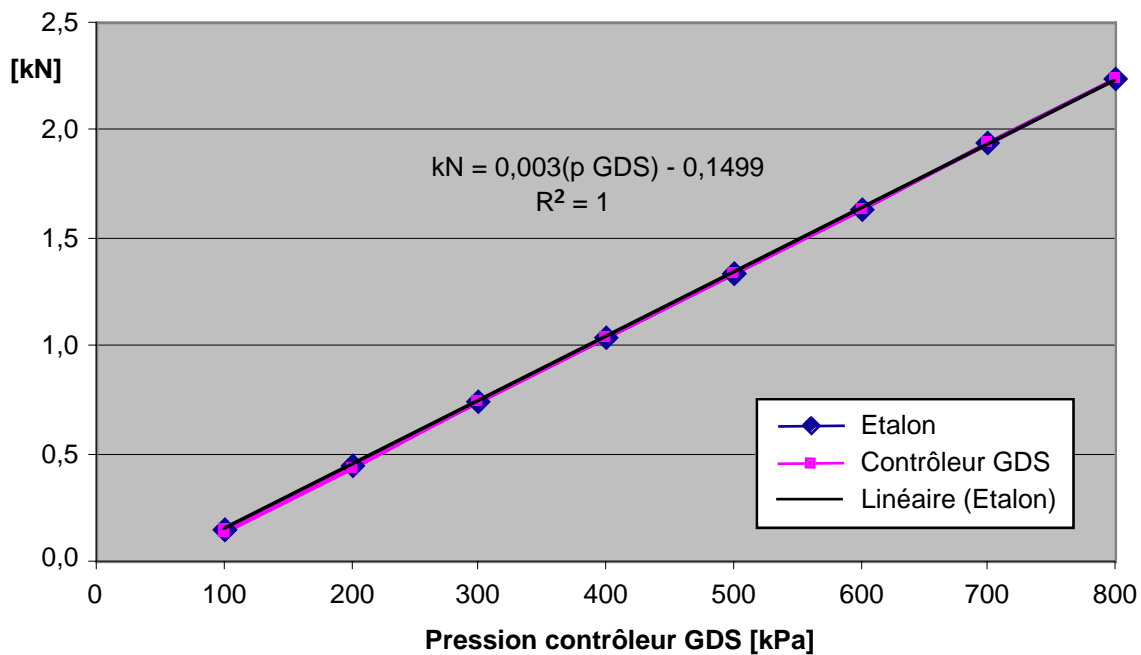
Le capteur utilisé pour la mesure des déplacements verticaux de la tête de refroidissement est un capteur HBM K-WA fourni avec un certificat de contrôle no 063610047 daté du 09.01.2003. Ce capteur a encore été contrôlé avec une colonne d'étalonnage.

4.9.5 Contrainte verticale

Le capteur de force utilisé est celui fourni avec la cellule de Bishop et Wesley dont la base sert de vérin. Ce capteur a été ré-étalonné au moyen du capteur de force étalon HBM Z3H2 et cet étalonnage fait l'objet de la figure 4-34.



4-33 Anomalies lors des mesures avec un capteurs TDR



4-34 Etalonnage du capteur de force Bishop Wesley

4.10 Défauts de l'instrumentation

4.10.1 Forme du moule

Si, lors de la formation des lentilles de glace, la forme conique du moule en PVC permet d'éliminer, en grande partie, les frottements sur la paroi du moule, ce n'est pas le cas lors de la mise en charge de l'éprouvette par le vérin inférieur. Cependant, les accroissements de la contrainte verticale sont effectués lors du dégel des lentilles pour tenter d'estimer les modules résilients, à savoir lorsque les teneurs en eau sont très élevées par rapport à la teneur en eau initiale. Cela devrait limiter l'effet parasite du frottement de l'éprouvette sur la paroi du moule.

4.10.2 Températures du moule et de l'éprouvette

Les températures les plus importantes à connaître sont celles sur l'axe de l'éprouvette. Elles ont pu être mesurées lors de certains essais, mais seules les températures des parois du moule sont mesurées systématiquement. Comme les deux isolations thermiques du moule ne suffisent de loin pas à assurer l'horizontalité des isothermes dans l'éprouvette et si les températures ne sont pas mesurées sur l'axe, il est souvent difficile d'estimer, avec une certaine exactitude, ces températures axiales.

L'introduction d'un serpentin de refroidissement à l'intérieur de l'isolation extérieure (voir fig. 4-7) a beaucoup amélioré l'horizontalité des isothermes. Cependant la température du serpentin est constante pendant un essai et celles de l'éprouvette varient en fonction de celle de la tête, ce qui conduit à une variation de cette horizontalité.

Pour pallier ce défaut, nous avons compté sur la simulation numérique par éléments finis avec un réseau précis du moule, de sa tête et de l'éprouvette (voir chapitre 8). La grande complexité de la tête avec sa circulation de glycol et son positionnement dans la partie supérieure du moule a réduit notablement l'aide que l'on espérait obtenir de cette simulation. Ce problème ne s'est pas posé pour l'embase du moule, car, à cet endroit, les températures varient peu pendant les essais et sont moins importantes pour l'interprétation des résultats.

Il aurait fallu intercaler un fluxmètre sous la tête composé, par exemple, d'un cylindre en pyrex avec deux thermistance insérées sur son centre et sur chacune de ses faces. Cela n'a malheureusement pas été fait car on a toujours pensé s'en tirer avec la simulation numérique !

4.10.3 Capteurs

4.10.3.1 Thermistances des parois du moule

À part un problème de collage des thermistances sur leur support en cuivre qui a été vite résolu, elles se sont toutes parfaitement comportées pendant les essais et ont donné des résultats tout à fait satisfaisants.

4.10.3.2 Thermistances placées dans le tube de plexiglas central

Lors de l'essai no 5, le tube de l'endoscope a été remplacé par un tube en plexiglas dans lequel ont été insérées 3 thermistances. La construction de ce tube avec le placement des thermistances à l'intérieur a été difficile. En outre les 3 câbles des thermistances produisait un effet de tige non négligeable. Pour ces raisons, les résultats des mesures de températures au centre de l'éprouvette,

faites avec ce dispositif, sont discutables. Pour ces raisons, lors de l'essai no 6, les thermistances ont été placées dans l'éprouvette pendant le compactage et leurs câbles sortis par les orifices des tensiomètres.

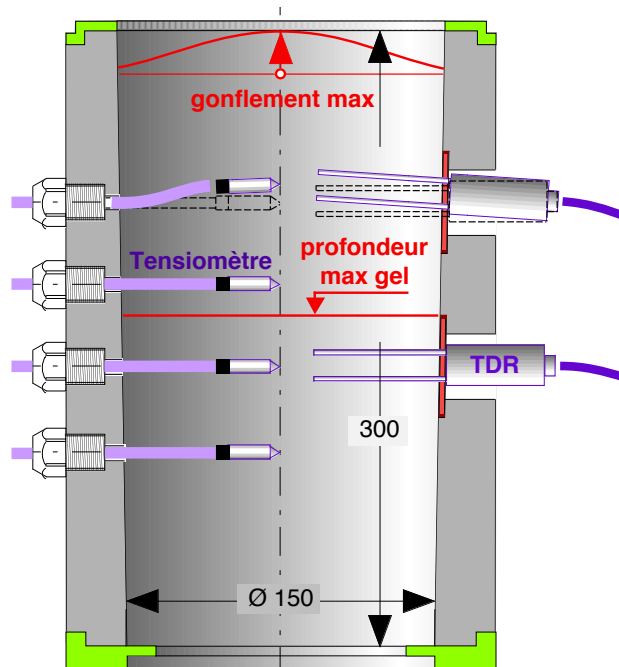
4.10.3.3 Thermistances remplaçant les tensiomètres

Pour pallier au fonctionnement douteux des thermistances placées dans le tube central en plexiglas, lors de l'essai no 6, les tensiomètres ont été remplacés par des thermistances placées au centre de l'éprouvette. Leur câble étant horizontal, il n'y a pour ainsi dire pas d'effet de tige. Ces thermistances étant compactées dans le moule en même temps que l'éprouvette, leur niveau a dû être contrôlé, à la fin de l'essai, lors de l'extraction du limon. À part ce petit inconvénient, ces thermistances ont parfaitement fonctionné et ont permis de résoudre le problème de la forme des isothermes à l'intérieur du moule.

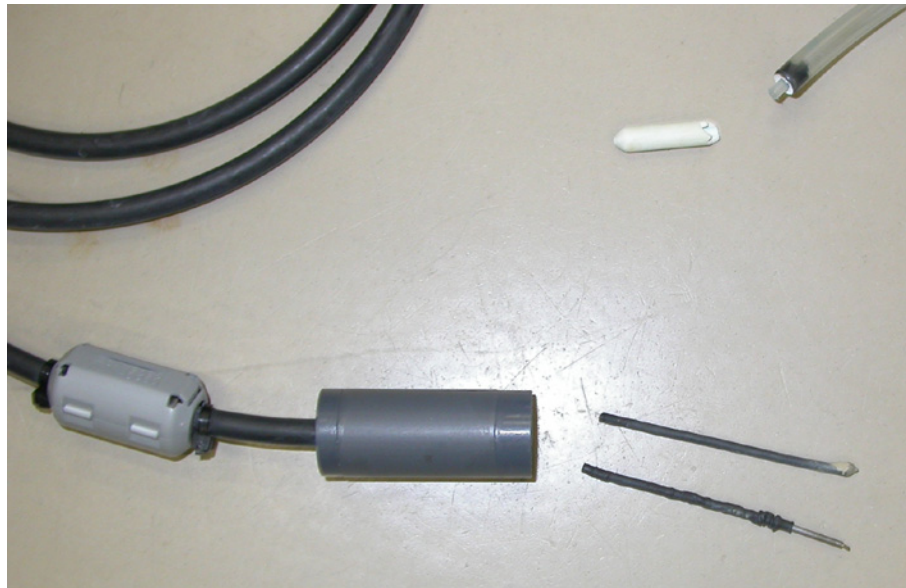
4.10.3.4 Tensiomètres

De par les gonflements produits par la formation des lentilles de glace, gonflements qui ont atteint en tête de l'éprouvette 20 mm, les tensiomètres supérieurs, comme le capteur TDR supérieur, sont soumis à d'importantes déformations (fig. 4-35). En outre, les tensiomètres sont enfoncés dans un trou foré avec un carottier spécial ce qui les soumet à des sollicitations mécaniques importantes. Enfin, les tensiomètres supérieurs gèlent.

Toutes ces sollicitations ont fait que les mesures réalisées avec les tensiomètres n'ont pas toujours été satisfaisantes, ceci surtout pendant le dégel, ce qui est un peu malheureux. La figure 4-36 montre les dégâts qu'ont subis les tensiomètres et les capteurs TDR pendant les essais.



4-35 Déformations des tensiomètres et des capteurs TDR pendant le gel



4-36 Dégâts sur un tensiomètre et un capteur TDR

4.10.3.5 Capteurs TDR

Les capteurs utilisés étaient enfoncés dans l'éprouvette par les orifices prévus pour cela. Pendant les gonflements dus au gel, leur antenne était poussée vers le haut et souvent tordue malgré l'articulation en caoutchouc de leur orifice dans le moule. Ils ont été ainsi soumis à des efforts importants qui ont conduit parfois à leur rupture (fig. 4-36). Ce défaut n'a cependant pas trop diminué la valeur des mesures faites avec ces capteurs.

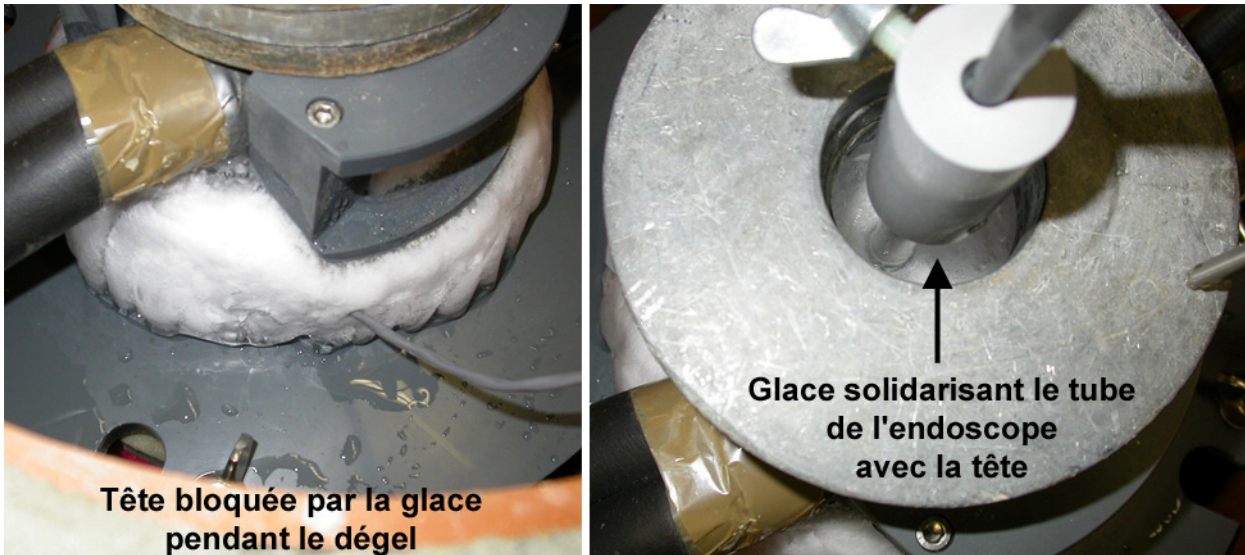
Il y a eu aussi quelques problèmes d'étalonnage de ces capteurs qui ont pu être résolus par les nombreuses teneurs en eau par pesage faites au début et, surtout, à la fin de chaque essai.

4.10.3.6 Capteur de gonflement et endoscope (englacement de la tête)

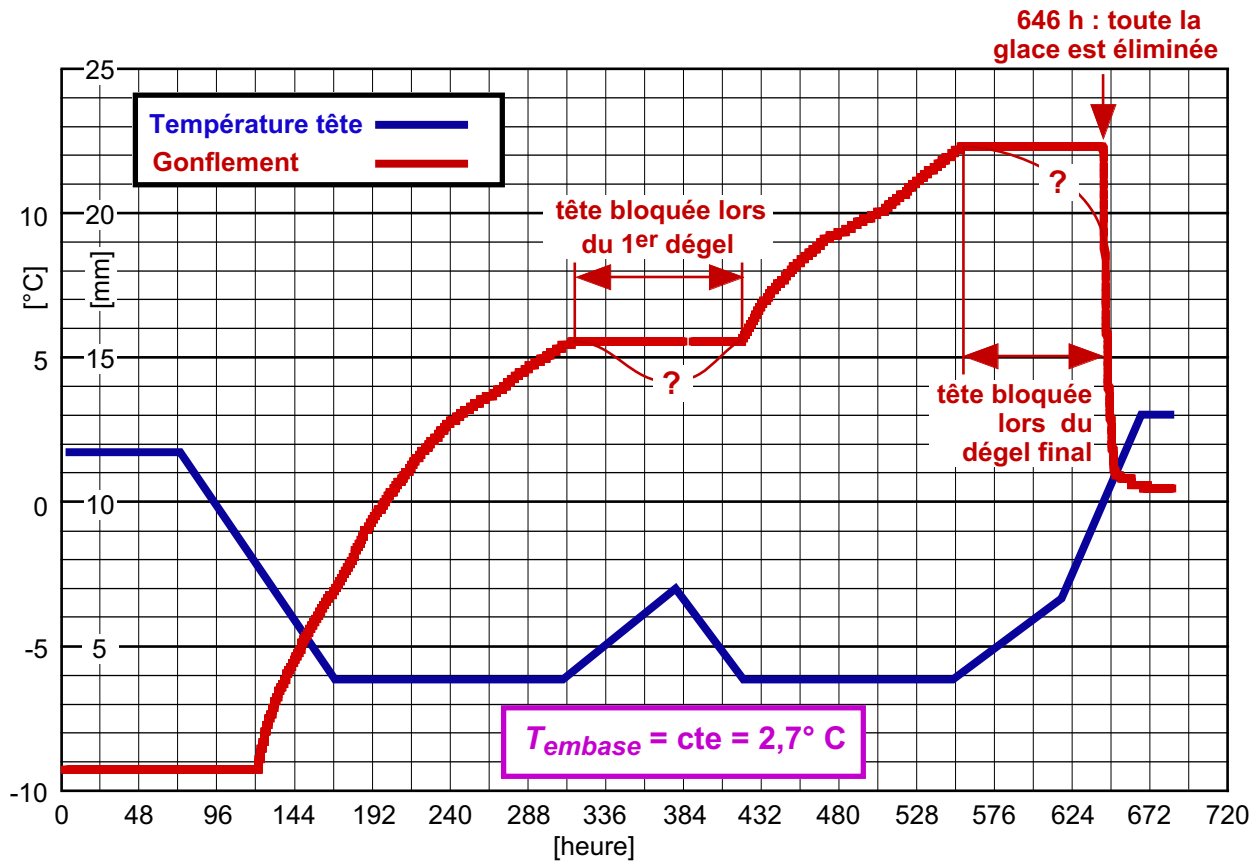
Au contact de l'air contenu dans l'espace entre les deux isolations, la tête de refroidissement s'englace et lors du dégel, elle est bloquée par la glace (fig. 4-37) jusqu'à ce que la température de la tête redevienne positive. Ce problème est très bien décrit par les gonflements mesurés lors de l'essai no 8 montrés sur la figure 4-38. Il n'est pas toujours soluble et une petite partie de la courbe des gonflements n'est pas exploitable. Le graissage du pourtour de la tête avec de la graisse silicone a permis de remédier en partie à ce blocage.

Pendant le gel, cette glace solidarise aussi le tube de l'endoscope avec la tête (fig. 4-37) et entraîne ce dernier vers le haut ce qui décale le niveau des photographies prises avec l'endoscope. Dans ce dernier cas, la valeur du déplacement peut être mesurée sur les courbes de gonflement et le niveau des photographies corrigé en conséquence.

Cet englacement dépend du degré hygrométrique de l'air du local où est placé le dispositif d'essai. Le local est climatisé, mais seulement en température. Les mois d'été sont les plus critiques.



4-37 Englacement de la tête de refroidissement



4-38 Gonflement avec blocage de la tête lors du dégel (essai no 8)

4.11 Mode opératoire

4.11.1 Généralités

Au vu de la complexité et du nombre des opérations à réaliser pour un essai, la rédaction d'un mode opératoire précis est indispensable. Toutes les opérations, incidents, observations particulières, etc. sont consignées dans le formulaire « Suivi de l'essai » dont un exemple fait l'objet de la figure 4-44.

Dans les paragraphes qui suivent, les opérations marquées d'un ☞ signifient une inscription dans le formulaire correspondant à la phase de l'essai.

4.11.2 Préparation du matériau

- Malaxer l'échantillon : mélange du sol (environ 15 kg) et de l'eau, à la teneur en eau requise pour l'essai (optimum Proctor). Voir formulaire "préparation éprouvette et compactage" (fig. 4-42).
 - Peser la masse totale de sol.
 - Peser l'eau.
 - Mélanger peu à peu l'eau et le sol en évitant la formation de grumeaux et de poussière (perte de fines).
 - Placer le sol préparé dans un sac en plastique clos afin d'éviter l'évaporation.
- Laisser reposer l'échantillon dans son sac en plastique au moins pendant un jour.

4.11.3 Compactage du matériau

- Préparer la machine de compactage.
- Poser la protection des câbles des thermistances autour du moule PVC ; la maintenir avec du scotch de tapissier.
- Pesée préalable (voir le formulaire "préparation éprouvette et compactage", figure 4-42) ☞. Tare = moule PVC + protection des câbles + embase de compactage + filtre en papier.
- Positionnement du moule sur la machine de compactage, *sans le retourner*:
 - Placer un filtre en papier sur le fond du moule.
 - Fixer tout le dispositif sur la machine de compactage, à l'aide de 2 serre-joints.
 - Compactage selon indication de la fiche "préparation éprouvette et compactage".
- Détermination de la teneur en eau initiale sur un prélèvement dans une des couches centrales (voir formulaire "préparation éprouvette et compactage", figure 4-42) ☞.
- Desserrer les serre-joints, et poser le tout sur une table de travail.
- Araser l'éprouvette au niveau demandé (env. 3,5 cm sous le bord du moule) sur le formulaire "préparation éprouvette et compactage". Pour cela la partie supérieure de l'éprouvette est excavée et son nouveau sommet est réglé par un léger compactage manuel.
- Peser: moule avec l'embase de compactage + protection des câbles + filtre en papier + éprouvette compactée ☞. En déduire la masse de l'éprouvette humide compactée. (voir formulaire "préparation éprouvette et compactage", figure 4-42).

4.11.4 Alimentation en eau de l'éprouvette

- Simulation de la nappe phréatique (charge d'eau = 25 mm).
 - Remplir d'eau le vase de Mariotte, sans son tube intérieur.
 - Fermer le robinet de vidange (V2) et ouvrir le robinet de communication avec l'éprouvette (VI).
 - Laisser s'écouler un peu d'eau jusqu'à la plaque perforée de l'embase de l'éprouvette. Veiller à ce qu'il n'y ait pas de bulles dans les canalisations. Pour ce faire, on s'assurera que la plaque perforée est presque immergée.
 - Fermer le robinet de communication avec l'éprouvette (VI).
 - Compléter le remplissage du vase jusqu'un peu en dessous de la marque supérieure.

- Mettre en place le tube intérieur du vase de Mariotte avec son bouchon étanche. La partie inférieure du tube doit se situer à environ 25 mm au-dessus de la surface inférieure de l'éprouvette.
- Placer un bécber sous le robinet de vidange, et ouvrir le robinet de vidange (V2) de façon à faire baisser le niveau d'eau du tube intérieur du vase de Mariotte jusqu'à l'extrémité inférieure du tube.
- Fermer le robinet de vidange.

C'est la seule mesure manuelle à effectuer régulièrement tout au long de l'essai, et à enregistrer dans le formulaire « Mariotte et TDR manuel » (4-45) (4). Tous les autres paramètres étant enregistrés par le VI. Ces mesures manuelles peuvent aussi être enregistrées directement dans le fichier Excel de tous les résultats.

4.11.5 Mise en place du moule, placement et connection des premiers capteurs

Début mise en place du moule :

- Poser le moule sur l'embase après l'avoir sorti de l'embase de compactage.
- Ôter la protection des câbles.
- Placer l'isolation intérieure.
- Placer la plaque de tête (4 boulons à ailette).
- Ouvrir le robinet de communication du vase de Mariotte avec l'éprouvette (V1). S'il y a une fuite dans le circuit d'eau, des bulles d'air s'échappent du tube intérieur du vase de Mariotte. Au cas où des bulles d'air seraient restées dans les tuyaux, on observe une remontée du niveau d'eau dans le tube intérieur du vase de Mariotte. Placer un bécber sous le robinet de vidange, réajuster le niveau d'eau à l'intérieur du tube en ouvrant le robinet de vidange (V2).
- Noter le niveau d'eau initial sur le vase de Mariotte dans le formulaire « Mariotte et TDR manuel » (fig 4-45) (4).
- Connecter les thermistances sur la chaîne de mesure, ceci y.c. la thermistance de mesure de la température extérieure.
- Ôter toute l'eau sur l'embase, ceci de façon à pouvoir contrôler toute fuite.
- Enfoncer lentement, sans forcer, les capteurs TDR et enfiler leurs câbles dans les trous correspondant de l'isolation intérieure. Les connecter sur la chaîne de mesure. Enfin, mettre sous tension leur alimentation (10 –12 V).

Ne pas installer la tête de refroidissement, les plombs et le capteur de gonflement avec son support. Ces opérations doivent être effectuées après le placement de l'isolation extérieure.

4.11.6 Démarrage des cryostats


- Embase : Enclencher le thermostat du refroidissement de l'embase. Environ 3 heures sont nécessaires pour obtenir la température de consigne dans l'embase. Consigne = 1,2° C pour tous les essais.
- Tête : Introduire la courbe de consigne prévue dans le VI « Cryo » et lancer ce VI. Pour l'accomodation on peut fixer une consigne directement sur le cryostat Haake (température constante).
- Enceinte : Consigne = 0° C.

4.11.7 Isolation extérieure, tête et capteur de déplacement

- Enfiler, avec le dispositif prévu à cet effet, l'isolation extérieure entourant le moule.
- Colmater tous les orifices des câbles et conduits avec de la mousse isolante (peut se faire après).
- Mettre en place la tête de refroidissement.


4.11.8 Mise en place du tube de l'endoscope

Elle doit se faire juste après le placement de l'isolation extérieure et de la tête de refroidissement. De préférence avant le placement des plombs et du capteur de gonflement.

- Par le trou prévu dans la tête de refroidissement, forer le trou de l'endoscope avec le carottier prévu à cet effet, ceci jusqu'au fond du moule. Travailler par passes de quelque 5 cm en utilisant un marteau mou.
- Éventuellement utiliser le matériau extrait du forage pour faire une teneur en eau, teneur à introduire dans le formulaire « Essai » (fig. 4-43) .
- Enfiler dans le trou le tube en plexiglas gradué (graduation en mm collée à l'intérieur du tube) avec un bouchon (important).
- Placer les trois anneaux de surcharge de 2,5 kg chacun.
- Connecter le capteur de déplacement sur la chaîne de mesure.
- Placer la tête du tube de l'endoscope.

4.11.9 Tensiomètres

Les tensiomètres sont à introduire dans l'éprouvette après la pose de l'isolation extérieure, car son placement peut arracher les céramiques poreuses des tensiomètres.

- Forer les trous des tensiomètres avec le carottier prévu à cet effet. Eventuellement mélanger le matériau extrait des forages et faire une teneur en eau sur ce dernier, teneur à introduire dans le formulaire « Essai » (fig. 4-43) .
- Injecter un peu d'eau au fond des trous de forage.
- Enfoncer les tensiomètres avec grande précaution et fixer les vacuomètres correspondant sur leur support (chaîne ou autre système). Attention, la bride de fixation sur le support ne doit pas être attachée au collier de serrage de la canne sur le vacuomètre, car cela risque de le déconnecter de la canne et permettre l'introduction d'air dans la canne ; le tensiomètre devient alors inutilisable.
- Connecter les tensiomètres sur la chaîne de mesure.

4.11.10 Capteur de déplacement vertical

- Placer le support magnétique de ce capteur sur la plaque supérieure du moule.
- Fixer dessus le capteur de déplacement avec un enfoncement initial de quelque 2 mm.
- Connecter son câble sur la chaîne de mesure.

4.11.11 Démarrage du VI d'acquisition des données

- Introduire les paramètres variables de l'essai, à savoir et surtout :
 - intervalle de mesure, en général 10 minutes ;
 - longueur des graphiques fonctions du temps, en général 24 heures ;
 - branchement des capteurs utilisés sur « Datalogger ».

Cela peut se faire avant, par exemple en même temps que le démarrage du VI Cryo.

4.11.12 Accommodation

La période d'accommodation doit permettre une stabilisation des températures, des teneurs en eau et des succions capillaires. Sa durée est déterminée par cette condition. La température de consigne des cryostats de l'embase et de la tête doit être constante ; elle est fixée en général à 1,5° C pour la tête et à 1,2° C pour l'embase.

À la fin de l'accommodation, avec l'endoscope, faire des panoramas à 360° sur les hauteurs suivantes [mm] : 250 (juste sous la tête de refroidissement), 230, 210, 190, 170, 150, 130, 120 (position la plus basse de l'endoscope : 116 mm).

4.11.13 Gel

Le refroidissement s'effectue en réglant le cryostat lié à la tête de refroidissement, soit directement sur le panneau de commande du cryostat Haake, soit au moyen du VI Cryo. La durée du gel dépend du type de l'essai, notamment de l'épaisseur à obtenir pour les lentilles de glace. Pour que la plupart des lentilles soient entièrement visibles avec l'endoscope, le gonflement maximum ne devrait pas dépasser 25 mm.

À la fin du gel, faire un groupe de panoramas à 360° sur les hauteurs définies au paragraphe 4.11.15. En outre, faire au moins deux animations sur des lentilles en formation.

4.11.14 Dégel

La durée et les rampes des températures de la tête de refroidissement sont fixées en fonction du type de l'essai.

- Consigne de la température de tête à mettre à 0° C.
- Environ une heure après, commencer à enlever, avec précaution, la glace de la tête de refroidissement. Utiliser un marteau mou, un tournevis comme ciseau et des papiers absorbants pour récolter l'eau de fonte de la glace. Mettre un papier absorbant autour de la tête et le mâter dans la fente entre le moule et la tête, ceci de façon à limiter au mieux l'infiltration de l'eau de fonte de la glace dans l'éprouvette. Il faut plus de 6 heures pour que toute la glace puisse être enlevée.
- Programmer les températures de dégel à la tête de l'éprouvette au moyen du VI Cryo ou directement sur le panneau de commande du Cryostat Haake. En principe, la température de l'embase ne devrait pas être modifiée pendant le dégel.

Pendant le dégel, avec l'endoscope, faire au moins deux groupes de panoramas à 360° sur les hauteurs définies au paragraphe 4.11.15. En outre, faire au moins deux animations sur des lentilles en dégel.

4.11.15 Animations (vidéos) filmées avec l'endoscope

Pour bien appréhender le phénomène du gel et, surtout, du dégel des sols gélifs, l'endoscope doit être placé au niveau de certaines lentilles en formation ou en dégel et des prises de vues à un intervalle de 1/2 ou 1/4 heure sont à réaliser. Elles permettent de créer des animations.

Ces animations sont annexées à ce rapport sur un CD-Rom. Le format vidéo utilisé est le vieux format «avi» (Audio Video Interlaced), sans compression, qui peut être exploité sans problème sur n'importe quel type d'ordinateur.

Dès que des lentilles commencent à se former, il faut rechercher une lentille en formation caractéristique et lancer le VI « Snap » pour enregistrer les images à un intervalle déterminé (en principe 1/2 heure pour la formation). Attention : le gonflement du sol fait que la zone de l'éprouvette photographiée par l'endoscope se déplace (le tube de l'endoscope n'est pas déplacé avec le gonflement). Il faut ainsi, de temps en temps et si nécessaire, légèrement déplacer l'endoscope dans son tube.

Lors du dégel des lentilles, il faut appliquer les mêmes principes que pour le gel. Dans ce cas, l'intervalle des prises de vues est, en principe, de 1/4 heures car la fonte des lentilles est plus rapide que leur formation.

4.11.16 Panoramas des lentilles établis avec l'endoscope

Des panoramas à 360° doivent être réalisés avec l'endoscope à différents niveaux et à différents moments. Le tube de l'endoscope avec son échelle et la fixation de son câble n'ayant pas été réalisés avec des moyens de micro-mécanique de précision, il y a parfois certains décalages entre les vues prises au même niveau de l'éprouvette. Ces panoramas sont à réaliser :

- À des hauteurs de l'éprouvette données, par exemple [mm] : 280, 270, 260, 250, 240, 230 ; les photos doivent se recouper latéralement pour pouvoir effectuer un montage correct avec le logiciel Photoshop.
- De façon continue, sur toute une zone verticale de l'éprouvette. Dans ce cas, les photos d'un niveau doivent être légèrement superposées sur celles du niveau inférieur, ceci de façon de pouvoir faire un montage correct avec Photoshop.

4.11.17 Exploitation numérique des panoramas

Les panoramas peuvent être exploités numériquement pour, par exemple, déterminer la répartition des gonflements (indices de vide) en fonction de la hauteur de l'éprouvette. On procédera de la manière suivante :

- Avec le logiciel « Photoshop » :
 - marquage du panorama par bandes de 2 mm de hauteur ;
 - détournage de toutes les lentilles et remplissage avec de la couleur noire ;
 - sélection d'une bande et copie de cette dernière dans un nouveau fichier ;
 - dans ce nouveau fichier, passage en mode « niveau de gris » et taille l'image de 72 pixels / inch avec rééchantillonnage « au plus proche » ;
 - enregistrement du fichier de la bande en format jpeg avec les limites dans son titre, par ex. : « Lent 520h 168-170.jpg » (168 mm à 170 mm) ;
 - et ainsi de suite pour toutes les bandes de 2 mm de hauteur.
- Les fichiers des bandes sont ensuite traités avec le logiciel « Labview IMAQ Vision Builder » :
 - Open image (le fichier doit se trouver sur le disque du PC et non pas sur un serveur !).
 - Image – Measure – Area.
 - Sélectionner chaque lentille avec la baguette magique et une tolérance de 200. Chaque surface s'inscrit automatiquement dans le tableau au-dessous de l'image. Faire attention à ne pas oublier des lentilles.
 - Quand toutes les lentilles sont sélectionnées et enregistrées dans le tableau, copier le tableau dans un fichier Excel : bouton à droite. Attention, le fichier Excel ne s'ouvre pas automatiquement.
 - Ouvrir le fichier Excel qui est affiché dans la barre des applications et fichiers ouverts de Window.
 - Copier et coller toutes les colonnes dans le fichier Excel contenant les données de toutes les bandes et les calculs correspondants.
 - Quand tout est terminé, copier le dossier contenant tous les fichiers du panorama dans le dossier adéquat du serveur (sauvegarde).
 - Ensuite, sur Macintosh : depuis le PC, transférer le fichier Excel contenant les données de toutes les bandes et le compléter pour le calcul des indices de vide de chaque bande de 2 mm. Le calcul des indices de vide se fait par rapport à l'indice de vide initial déterminé au début de l'essai (fiche « Préparation éprouvette et compactage »).

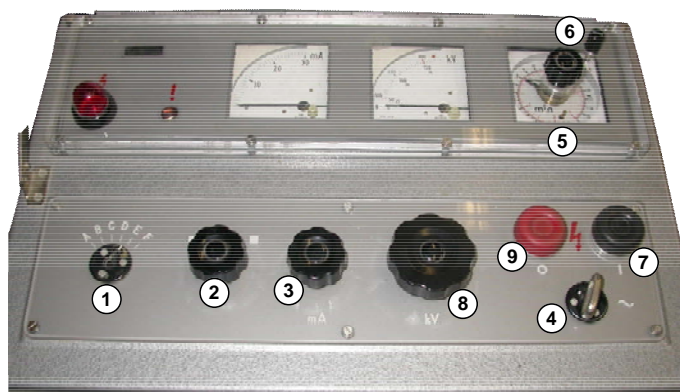
4.11.18 Radiographies

4.11.18.1 Travaux préparatoires

- Si nécessaire, ôter, de la région du moule, l'endoscope, son contrôleur et son unité d'affichage, ainsi que toute électronique déplaçable.
- Si cela n'est pas déjà fait, placer les planches de protection et feuilles de plomb des cryostats et des autres appareillages électroniques non déplaçables.
- Arrêter le cryostat de l'enceinte, déconnecter les tuyaux correspondants de l'isolation extérieure.
- Retirer les isolations extérieures à l'exception de celle de la presse.
- Dévisser les deux tiges qui maintiennent le moule sur son embase, tiges opposées à l'émetteur de rayons X (les deux autres restent en place).
- Ouvrir à fond le robinet de l'eau de refroidissement de l'émetteur.
- Fermer la porte blindée.

4.11.18.2 Préchauffage de l'émetteur

- Enclencher l'interrupteur général.
 - Sur le panneau de commande (fig. 4-39), bouton 1 sur E, bouton 2 sur petite source (tourner dans le sens contraire des aiguilles d'une montre), bouton 3 sur ampérage maximum (tourner complètement dans le sens des aiguilles d'une montre), clé (bouton 4) à droite enfoncée, mettre l'échelle du timer (bouton 5) sur 20 au moyen du bouton correspondant (no 6).
 - Placer un temps important sur le timer (bouton 5).
 - Déterminer sur le tableau
- 4-40 les incréments de temps et de kV nécessaires au préchauffage, exemple : period : 3 days, pour 125 à 145 kV (notre cas) $\Delta t = 5$ sec et $\Delta kV = 5$ kV.
- Enclencher l'émetteur (bouton 7), régler (bouton 8) les kV sur 125 et attendre 5 sec, passer ensuite à 130 kV et attendre 5 sec, et ainsi de suite jusqu'à 150 kV.
 - Eteindre l'émetteur (bouton 9 rouge).
 - Noter dans le carnet les caractéristiques du préchauffage : Nom de l'opérateur et date, type de source (petite), Δt et ΔkV et limites (125 à 150 kV par exemple).



4-39 Panneau de commande de l'émetteur à rayons X

4-40 Valeurs du préchauffage

Idle period	100 to 125 kV	125 to 150 kV
1 to 3 days	-	5 sec / 5 kV
3 to 7 days	-	15 sec / 5 kV
7 to 14 days	-	20 sec / 5 kV
2 to 4 weeks	5 sec / 5 kV	2 min / 5 kV
4 to 8 weeks	10 sec / 5 kV	4 min / 5 kV
8 to 12 weeks	20 sec / 5 kV	5 min / 5 kV

4.11.18.3 Préparation du film

- Dans la chambre noire, allumer les lumières rouges et la lampe de garde extérieure.
- Préparer sur la table : la cartouche de petite réserve des films (couleur alu) et la cartouche d'exposition. La « grande » réserve des films se trouve dans l'armoire.
- Ouvrir la cartouche d'exposition entre les deux plaques souples.
- Eteindre la lumière (seules les deux lampes rouges restent allumées).
- Ouvrir la cartouche de petite réserve, prendre un film, le placer, entre les deux plaques souples, dans la cartouche d'exposition (fermeture par crochet en haut à droite), refermer cette dernière ainsi que la cartouche de petite réserve.
- Allumer la lumière.
- Sortir la cartouche d'exposition de la chambre noire et la fixer sur le cadre (languette métallique derrière le sens du rayonnement).
- Placer le cadre support du film derrière le moule, contre son isolation intérieure. Le foyer de l'émetteur de rayons X doit se trouver le plus près possible de l'isolation intérieure du moule et être centré verticalement sur l'éprouvette.
- Régler la hauteur de la cartouche d'exposition si nécessaire.
- Fermer la porte du local à rayons X.

4.11.18.4 Exposition du film

- Sur le panneau de commande de l'émetteur (fig. 4-39) : timer (bouton 5) sur 8 minutes, avec l'échelle du timer (bouton 6) sur 20.
- Enclencher l'émetteur (bouton 7).
- Régler les kV avec le bouton 8 (145 kV dans notre cas).
L'appareil se déclenche automatiquement après le temps programmé.
- Déclencher l'interrupteur général.
- Noter les caractéristiques de la radiographie dans le carnet : opérateur et date, numéro de l'affaire, temps, kV, ampérage, source.
- Ouvrir la porte du local à rayons X, ôter la cartouche du film et son cadre et porter cette dernière dans la chambre noire avec lumière éteinte.

4.11.18.5 Ré-isolation du moule

- Avant le développement du film, remettre toutes les isolations, reconnecter les tuyaux du cryostat de l'enceinte et remettre en marche ce cryostat.

4.11.18.6 Développement du film dans la chambre noire

- Préparer le cadre de développement du film : ouvrir les 4 crochets et le poser à côté de la cartouche d'exposition.
- Eteindre la lumière (seules les lampes rouges restent allumées).
- Transférer le film de la cartouche d'exposition vers le cadre de développement et fermer ses crochets.
- Plonger le cadre dans le révélateur et enclencher le timer sur 4 minutes (tourner le bouton dans le sens des aiguilles d'une montre jusqu'à butée). Rester dans la chambre noire.
- Au bout de quatre minutes exactement (sonnerie), plonger le cadre dans le premier bain d'eau à droite du bac du révélateur.
- Le sortir en l'égoutant, puis le plonger dans le bain de fixation pendant environ 8 minutes (chronomètre). A ce moment, il est possible de sortir de la chambre noire.
- Après 8 minutes, plonger le cadre dans le deuxième bain d'eau à droite du bac du fixateur et le ressortir en l'égoutant.
- Allumer la lumière et éteindre les lampes rouges.
- Contrôler la radiographie au moyen de la « table » lumineuse.
- Mettre le cadre dans le séchoir et enclencher les deux interrupteurs de ce dernier.

4.11.18.7 Opérations finales

- Fermer le robinet du circuit de refroidissement de l'émetteur.

4.11.18.8 Exploitation des radiographies

- Découper le film pour permettre son insertion dans le scanner.
- Numériser le film sur le scanner Epson Expression 1680 Pro (voir 4.11.19.1).
- Traiter l'image avec Photoshop (voir 4.11.19.1)
- Déterminer les coordonnées du centre des billes de plomb fixes et mobiles avec le logiciel Labview IMAQ Vision Builder (voir 4.11.19.2).
- Calculer les déplacements des billes par transformation Helmert avec le fichier Excel développé à cet effet et dessiner les déplacements (voir 4.11.19.3).

4.11.19 Exploitation numérique des radiographies

4.11.19.1 Numérisation sur le scanner et traitement de l'image

Le scanner utilisé est l'Epson Expression 1680 Pro. Il permet la numérisation d'un film transparent dont les dimensions maximales sont de 216 · 297 mm.

Le film correspondant à un temps donné est tout d'abord découpé de façon à ne pas dépasser les dimensions maximales du scanner. Les billes de plomb collées sur le moule doivent absolument se trouver sur le film découpé. Les paramètres de la numérisation sont les suivants :

Mode: Diapos (mode professionnel)

Type du document: Transparent

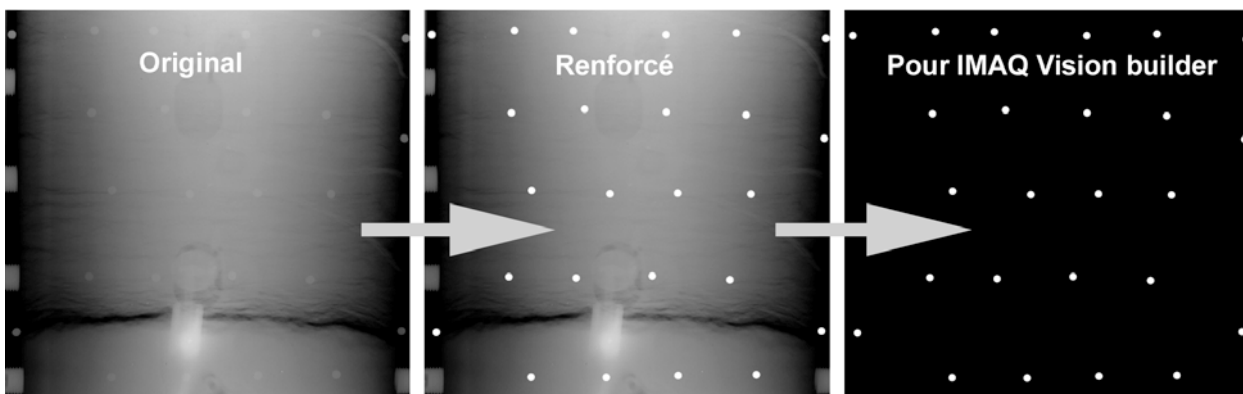
Type du film: Positif couleur

Type de l'image: 24 bits couleur

Resolution : 300 pixels/inch.

Avec Photoshop, l'image est ensuite convertie en niveaux de gris, puis traitée (contraste, luminosité, nettoyage, renforcement, etc.) de façon à faire ressortir les billes de plomb. Il est souvent aussi pratique de la transformer en dimensions réelles.

Enfin et toujours avec Photoshop, il faut créer une image noir et blanc : fond noir, billes blanches 300 ppi, format jpeg, dont le fichier est copié sur l'ordinateur accueillant le logiciel « IMAQ Vision builder ».



4-41 Etapes de la préparation des radiographies

4.11.19.2 Détermination des coordonnées des billes de plomb par IMAQ Vision builder

Dans « IMAQ Vision builder », il faut :

- Ouvrir le fichier image (jpeg, 8 bits) ; les billes doivent être en blanc sur fond noir.
- Ouvrir le script « Billes Pb.scr » : Script – Open script.
- Exécuter le script avec le bouton « Run script » (à gauche de l'écran, bouton de droite).

- Transférer les résultats dans un fichier Excel avec le bouton approprié (à droite de l'écran).
- Copier dans le presse-papier la fenêtre de l'image avec les numéros des billes : Alt + Print screen.
- Dans Photoshop, ouvrir un nouveau fichier et coller le contenu du presse-papier (ctrl V) ; recadrer l'image ; introduire un texte avec le nom de la radio ; aplatir l'image et la sauver dans un fichier jpeg.
- Ouvrir le fichier Excel correspondant, le modifier si nécessaire et copier dedans l'image avec les numéros des billes.
- Transférer les coordonnées des billes dans le fichier Excel de la transformation Helmert.

Le script « Billes Pb.scr » peut être modifié de la manière suivante :

- Double-cliquer sur la partie du script à modifier (trois parties : Threshold, Particle filter et Particle analysis) et la modifier.
- Cliquer sur « Replace » puis sur « Done » et sauver le script lorsque cela est demandé.

4.11.19.3 Transformation Helmert

Au moyen du fichier Excel développé à cet effet, Les deux groupes de coordonnées des billes de plomb (billes fixes collées sur le moule et billes mobiles placées dans l'éprouvette) sont introduits dans le fichier Excel développé à cet effet et leurs coordonnées sont calculées dans le système du moule par transformation Helmert.

4.11.19.4 Calcul des indices de vide et modules de déformation

Dans un fichier Excel, les indices de vide en fonction de la hauteur du moule ainsi que les modules oedométriques sont calculés en fonction des déplacements verticaux de chaque bille provenant de la transformation Helmert :

- Calcul des déplacements relatifs par rapport à la radiographie initiale (moyenne des deux billes centrales de chaque rang).
- Pour chaque radiographie, calcul de la déformation de chaque tranche de l'éprouvette comprise entre deux rangs de billes, ceci toujours par rapport à la radiographie initiale.
- Pour les deux radiographies correspondant à un cycle de charge-décharge (en principe 20 à 60 kPa), calcul des modules oedométriques.
- Pour chaque radiographie et pour chaque tranche, toujours par rapport à la radiographie initiale, calcul de la variation de l'indice de vide.
- Enfin, calcul des indices de vide correspondant en additionnant les variations de l'indice de vide à l'indice de vide initial déterminé lors du compactage de l'éprouvette dans son moule.

4.11.20 Usage du vérin

Avant le montage du dispositif, le moule et son éprouvette sont préparés selon le § 4.11.3.

Le montage du dispositif doit se faire ensuite dans l'ordre suivant :

- Placer la plaque supportant l'embase sur le vérin avec ses vis.
- Placer la partie inférieure de l'isolation extérieure.
- Placer l'embase du moule sur la plaque et, si nécessaire, la raccorder sur le cryostat correspondant.
- Placer le moule sur son embase en vissant la plaque supérieure de maintien, ceci après avoir ôté la protection des thermistances et placé l'isolation intérieure.
- Visser les 4 tiges de la presse.
- Placer la tête de refroidissement sur le sommet du moule et la raccorder si nécessaire au cryostat correspondant.
- Enfiler les capteurs TDR dans l'éprouvette.
- Placer la partie médiane de l'isolation extérieure.
- Placer et visser le plateau supérieur de la presse.
- Placer le support du capteur de gonflement, insérer la tige du capteur par un des trous du plateau et l'appuyer sur la tête de refroidissement.

- Placer la partie supérieure de l'isolation extérieure.

Ensuite, les opérations sont les mêmes que pour le dispositif sans le vérin : 4.11.4, 4.11.5, 4.11.6, 4.11.7, 4.11.9, 4.11.10, 4.11.11, 4.11.12, etc.





Pour imposer une contrainte verticale dans l'éprouvette, il faut procéder de la manière suivante :




- Mettre sous tension l'actuateur GDS.
- Contrôler que le vérin est dans une position basse et que le moteur de l'actuateur se trouve sur la gauche du rail. Si ce n'est pas le cas :
 - pour abaisser le piston du vérin, dévisser le raccord sur le cylindre de l'actuateur et laisser l'eau s'écouler sous le poids de la cellule, puis revisser le raccord en complétant l'eau perdue avec une pipette ;
 - pour déplacer le moteur sur la gauche, dévisser le raccord du tuyau avant la première vanne qu'il faut fermer avant, mettre le tuyau dans un récipient rempli d'eau, « reset » + « fill » et lorsque le moteur est dans une bonne position : « stop » + « reset » puis revisser le raccord en complétant l'eau perdue dans le tuyau avec une pipette et ouvrir la vanne.
- Ensuite, pour être sûr que l'actuateur GDS est dans une configuration initiale correcte (mise à zéro physique) :
 - fermer la première vanne du tube liant l'actuateur au vérin Bishop ;
 - dévisser le raccord sur le cylindre de l'actuateur ;
 - « reset » et « pressure – zéro » ;
 - compléter l'eau perdue dans le tube déconnecté, revisser le raccord sur le cylindre et ouvrir la vanne précédemment fermée ;
 - la pression correspondante au poids de la cellule s'établit alors à une valeur de quelque 150 kPa ;
 - Enfin : « reset » et « pressure – zero » + « reset » après une ou deux minutes.
- Placer la tige du capteur de force sur la tête de refroidissement (sans contact ou presque) par action sur la molette au-dessus du capteur.
- S'assurer que toutes les vannes sur le tube sont ouvertes.
- Introduire la pression désirée : « pressure – target » + introduction de la valeur sur le clavier + bien contrôler cette pression afin de ne pas abîmer le capteur et le vérin Belofram avec une trop grande pression, ensuite : « enter ».

Pour modifier une valeur de pression active :

- « reset » + introduction nouvelle valeur avec le clavier + contrôle + « enter ».

4.11.21 Démontage de l'éprouvette

- Enlever la tête de refroidissement en remettant dans le moule les morceaux de sol collés sur celle-ci.
- Enlever l'isolation extérieure en ménageant les conduits des capteurs.
- Démontez le capteur de gonflement.
- Sortir les tensiomètres et noter leur état sur le formulaire « Essai » (fig. 4-43) .
- Sortir les capteurs TDR et noter leur état sur le formulaire « Paramètres de l'essai » .
- Sortir le tube de l'endoscope.
- Enlever l'isolation intérieure.
- Peser le moule avec la protection des câbles et 3 attaches rouges (formulaire " Essai", figure 4-43) .
- Avant d'extraire une « carotte » (voir ci-dessous), effectuer un essai au cisaillement au moyen du scissomètre GEONOR en l'enfonçant complètement (fig. 4-21). La profondeur mesurée est celle de la surface au-dessus de l'ailette .

- Extraire petit à petit le sol du moule à l'aide d'outils adéquats. Prélever, au centre de l'éprouvette, au moins 5 « carottes » de quelque 4 cm de profondeur et 10 cm de diamètre et les placer dans des coupelles en vue de teneurs en eau ; essayer de prélever des matériaux à la hauteur des tensiomètres et des capteurs TDR. Mesurer la profondeur moyenne du trou .
- Peser le moule vide et nettoyé, avec la protection des câbles et 3 attaches rouges : (formulaire "Essai", figure 4-43) .
- Noter les teneurs en eau finales dans le formulaire "Essai", (fig. 4-43) .
- Nettoyer tout le dispositif.

EPFL - Laboratoire de mécanique des sols Thèse dégel Dysli

Préparation éprouvette et compactage

No éprouv. SY49-003	Nom essai Essai no 3 : Fonte lentilles & test rayons X	Opérateur PD	Date compactage
Nom éprouv. Essai no 3 : Fonte lentilles & test rayons X	Matériau Limon Bioley pour thèse Dysli	Dernière mise à jour 8.3.2004 15:27:17	
Ø_{max} grains [mm] 2	Coups 23	Couches par 11	Hauteur chute [mm] 305
			Masse dame [kg] 4.5
			Moule CBR
			Energie [MJ·m⁻³] 0.61
Valeurs désirées : ρ_d [t·m⁻³] 1.9		Volume éprouvette [10⁻³ m³] 5.661	
w_{init} [%] 14		arasée niv. fini 5.064	
		Masse totale sol sec M_{td} [g] 12'907.1	
Préparation du mélange :			w₀ estimé [%] 0
Teneur en eau w₀ du sol avant mélange			w₀ calculé [%]
M_{tare}	M_{tare} + M_{sol humide}	M_{tare} + M_{sol sec} [g]	
Masse total de sol à prendre pour préparer le mélange M_{t0} [g] 12'907.1			} à mélanger
Masse d'eau à ajouter pour atteindre la teneur en eau w_{init} M_w [g] 1'807.0			
Masse totale M_t = M_{t0} + M_w [g] 14'714.1			←
Masse une couche = 1.02 M_t /nbre couches [g] Prise en compte des pertes lors du compactage: 2% 1'364.4			
Mise en place de l'éprouvette :			
Pesée préliminaire : moule + embase & hausse compactage + filtre + protection câbles + 2 attaches			M_{tares compactage} [g] 12'222.0
Teneur en eau effectuée sur une couche :			
M_{tare} [g] 488.8	M_{tare} + M_{sol humide} [g] 4098	M_{tare} + M_{sol sec} [g] 3646	
	w_{init} [%] 14.3		
Pesée après compactage : moule + sol comp. + embase & hausse compact. + filtre + prot. câbles + 2 attaches éprouvette arasée			
M_{totale arasé} [g] 24'694.0	M_{sol humide compacté arasé} [g] = M_{totale arasé} - M_{tares compactage} 12'472.0		
Masse vol. sèche comp ρ_{d fcomp arasé} = (M_{sol humide comp arasée} / volume éprouvette)(1-w_{init}/100) [t·m⁻³] 1.89			utilisé par la suite
S_r 0.90	n 0.30	(ρ_s = 2.7 t·m⁻³) w_{sat} 15.9	
Pesée après compactage : moule + sol comp. + embase & hausse compact. + filtre + prot. câbles + 2 attaches éprouvette au niveau fini			
M_{totale niv fini} [g] 23'554.0	M_{sol humide comp. niv. fini} [g] = M_{totale niv. fini} - M_{tares compactage} 11'332.0		
Masse vol. sèche comp ρ_{d fcomp niv fini} = (M_{sol humide comp niv fini} / volume éprouvette)(1-w_{init}/100) [t·m⁻³] 1.92			
Obs. ρ_{d fcomp} M totale niv fini a été estimé	ρ_{d fcomp} estimé		
Conduct./ cap. thermique			
k_s (particules) [W·m⁻¹·C⁻¹] 3.0	w_u [%] 2.0	k_{non gelé} [W·m⁻¹·C⁻¹] 1.78	k_{gelé} [W·m⁻¹·C⁻¹] 2.44
		C_{non gelé} [J·m⁻³·C⁻¹] 2'471'854	C_{gelé} [J·m⁻³·C⁻¹] 1'989'438
Profondeur surface sup. éprouvette [mm] mesurée depuis le bord sup. du moule 30			
Observations			
Billes de plomb Ø 3,5 mm à placer pendant le compactage. Voir croquis (positions approximatives)			
M _{totale arasée} = 24'694.0 g			
M _{total niv. fini} (estimation) =			
M _{totale arasée} - 3.0 cm * 200 cm ² * 1.9 t/m ³ = 24'694 - 1'140 = 23'554g			
Croquis éventuel			

4-42 Exemple du formulaire « Préparation éprouvette et compactage »

EPFL - Laboratoire de mécanique des sols Thèse dégel Dysli

Essai

No éprouv.	Essai no 6 : Températures par trous tensio	Opér.	MD
SY49-06	Nom éprouv. Essai no 6 : Températures par trous tensio	Dernière mise à jour	
	Matériau Limon Bioley pour thèse Dysli	9.4.2004	10:52

ex : 13.5.2003

Date et heure début essai 19.3.2004 15:20 **ex : 13:45** **Date et heure fin mesures** 8.4.2004 10:30

Mesures avant accommodation

Teneur en eau sur matériau forage tensiomètres	<input type="text"/>	[%]
M_{tare}	<input type="text"/>	$M_{tare} + M_{sol\ humid}$
<input type="text"/>	<input type="text"/>	$M_{tare} + M_{sol\ sec}$
		[g]
Teneur en eau sur matériau forage endoscope	<input type="text"/>	[%]
M_{tare}	<input type="text"/>	$M_{tare} + M_{sol\ humid}$
<input type="text"/>	<input type="text"/>	$M_{tare} + M_{sol\ sec}$
		[g]

Mesures avant gel **Gonflement avant gel [mm]** (valeur chaîne mesure)

Mesures après dégel **Obs.**

Masse éprouv. : sol + moule + filtre + câbles + prot. + 2 attaches	$M_{sol} + tare$ après dégel [g]	<input type="text" value="19'985.0"/>	
Masse des trous (endoscope, tensiomètres, pertes tête & emb. : environ 120 g)		<input type="text" value="0.0"/>	
Masse éprouvette + trous + tare	$M_{sol} + tare + trous$ après dégel [g]	<input type="text" value="19'985.0"/>	
Tare : moule + câbles + prot. + 2 attaches (en princ. : 8'465 g)	$M_{tare\ dégel}$ [g]	<input type="text" value="8'703.0"/>	h équiv. [mm]
Masse sol humide	$M_{sol\ humid}$ après dégel = $M_{sol} + tare$ après dégel - $M_{tare\ dégel}$ [g]	<input type="text" value="11'282.0"/>	
Masse eau absorbée	$M_w\ totale\ absorbée = M_{sol\ humid}$ après dégel - $M_{sol\ humid}\ comp.\ niv.\ fini$ [g]	<input type="text" value="269"/>	<input type="text" value="13.5"/>
Profondeur sol gelé [mm]	mesurée depuis le bord sup. du moule	<input type="text" value="139"/>	
Hauteur sol gelé [mm]	depuis surface supérieure éprouvette	<input type="text" value="106"/>	
Hauteur sol non gelé [mm]	= 305 mm - prof. gelé	<input type="text" value="166"/>	
Gonflement après dégel [mm]	(valeur chaîne mesure)	<input type="text" value="8.9"/>	

No obs.	Prof. [mm] depuis le bord sup. du moule	Teneurs en eau					No obs.	Prof. [mm] depuis le bord sup. du moule	Scissomètre		
		h [mm]	M_{tare} [g]	$M_{tare} + M_{sol\ humid}$	$M_{tare} + M_{sol\ sec}$	w_{final}			h [mm]	τ [kPa]	
<input type="text"/>	45	260	218.44	632.08	567.60	<input type="text" value="18.5"/>	<input type="text"/>	41	264	54	
<input type="text"/>	68	237	182.75	560.84	502.89	<input type="text" value="18.1"/>	<input type="text"/>	72	233	70	
<input type="text"/>	108	197	271.43	720.10	653.17	<input type="text" value="17.5"/>	<input type="text"/>	99	206	68	
<input type="text"/>	158	147	291.47	681.11	627.82	<input type="text" value="15.8"/>	<input type="text" value="(1)"/>	139	166	124	
<input type="text"/>	188	117	270.16	538.63	504.55	<input type="text" value="14.5"/>	<input type="text"/>	184	121	190	
<input type="text"/>	222	83	130.70	442.29	402.83	<input type="text" value="14.5"/>	<input type="text"/>	221	84	236	
Eprouvette entière (moyenne) :						$w_{final\ tout}$	<input type="text" value="16.5"/>	<input type="text"/>	256	49	184

Masses volumiques

Masse sol sec $M_d = M_{sol\ humid}$ après dégel / (1 - $w_{final\ tout}$ / 100) [g]

Masse volumique sèche initiale $\rho_{d\ initial} = M_d / volume\ moule\ niv.\ fini$ [t·m⁻³]

Masse volumique sèche finale $\rho_{d\ final} = M_d / volume\ final\ éprouvette$ [t·m⁻³]

Etat tensiomètres

Etat capteurs TDR

Observations générales

Un morceau en bas de l'isolation ext. mouillé => perte ou condensation
Forte condensation sur l'embase.

1) prof max gel au milieu de l'ailette

Croquis éventuel

Fin d'essai :

4-43 Exemple du formulaire "Essai"

EPFL - Laboratoire de mécanique des sols
Thèse dégel Dysli

Suivi de l'essai

No essai	SY49-003	Nom essai	Essai no 3 : Fonte lentilles & test rayons X	Opérateur	MD
No éprouv.	SY49-003	Nom éprouv.	Essai no 3 : Fonte lentilles & test rayons X		
Début essai	18.9.2003 17:45	Fin essai	18.11.2003 13:00	Dernière mise à jour	19.11.2003 10:37
Date	Heure	Opérations	Fichier (1)		
18.9.03	17:30	Le capteur de temp. 2-6 (ou 1-6 ?) a été arraché. ACCOMMODATION	Essai_3_1.xls		
		Recollage avec Cementit			
		Les tensiomètres et le capteur de gonflement seront placés plus tard. Idem pour tube endoscope.			
		Consignes cryostats : Tête = 1.5°C (sans cryo.vi), Embase = 1.5°C			
23.9.03	11:00	Température du labo aberrantes !			
	16:15	Arrêt cryostat tête et remplacement thermistance			
		Eau de condensation sur le sommet de l'éprouvette - épongée			
	17:15	Remise en place tête de refroidissement.			
		Placement capteur de gonflement et remise marche cryostat			
	19:05	Fin mise en place des tensiomètres avec alésage des trous à la perceuse			
25.9.03	11:45	Ôté capt. de gonflement et plombs. Forage trou et placement endoscope			
	12:45	Remise capt. gonfl. et plombs. Ménisque Mariotte au dessus bas tube => effet forage			
	17:15	Réglage ménisque Mariotte			
26.9.03	10:15	Stop Labview. Démontage capteur gonfl. & tête refroid. Epongeage sommet éprouvette			
		Recherche axe A-2 => nord. L'isol. ext. y est la plus rapprochée du moule			
26.9.03	10:40	Redémarrage LabView GEL	Essai_3_2.xls		
	10:50	Remplacement tête & capteur gonfl.			
	15:05	Température tête = -5°C (sans cryo.vi)			
	20:55	Lancement Snap.vi sur une première lentille à 254 mm			
27.9.03	18:10	Contrôle			
29.9.03	13:50	Déplacement endoscope sur une lentille à h = 191 mm			
		Air au sommet des tubes des tensios 1, 2, 3			
30.9.03	11:05	Air au sommet des tensios : 1 beaucoup, 2 beaucoup, 3 vide !, 4 petite bulle			
		Ôté un peu de glace sur la tête			
	15:45	T tête = -6°C			
1.10.03	14:40	Ôté et remonté capteur de gonflement et un Pb			
	17:40	T tête = -7°C			
2.10.03	16:40	Déplacement endoscope sur une lentille à h = 180 mm			
		Ajout Glycol dans Haake car glace dans le réservoir			
4.10.03	20:10	Recentrage de l'isolation extérieure			
	20:25	Dépl. endo sur lentille à 175 mm. Dépl. anneaux Pb pour jeu vis tête tube endo & capt. gonfl.			
6.10.03	11:25	Tête = 0.0°C DEGEL	Essai_3_3a.xls		
		Elimination glace tête => env. 17:30			
	15:15	Déplacement endoscope sur une lentille à h = 205 mm			
7.10.03	12:45	Déplacement endoscope sur une lentille à h = 194 mm			
8.10.03	12:15	Tête = 1.0°C			
	15:00	Mauvais remplacement capteur de gonflement après dégât Marguerat(en l'air !!)			
9.10.03	9:45	Remplacement correct capt. gonflement			
	13:15	Tête = +3°C			
10.10.03	10:00	Tête = +6°C / Déplacement endoscope sur une lentille à h = 194 mm			
11.10.03	15:50	Tête = +10°C / Coups marteau sur plomb de charge			
13.10.03	9:30	Temb = +3°C			
17.10.03	17:30	Petit déplacement probable du capteur de gonflement			
	21:15	Déplacement endoscope sur une lentille à h = 200 mm (abandon H = 194)			
18.10.03	16:00	Ôter un plomb et capteur gonfl. / Arrêt Snap.vi / Fin des panos 360°			
	16:45	Fin des panos / Remis plomb et capteur gonfl. / Relance Snap.vi sur lentille à 200 mm			
19.10.03	11:35	Arrêt Dégel.vi (par sécurité)			
	12:07	Redémarrage Dégel.vi	Essai_3_3b.xls		
22.10.03	9:10	Redémarrage SNAP après déplacement endoscope avec sauvetage et purge dossier			
25.10.03	20:30	Pano 360° : arrêt SNAP, démontage capt. gonfl., remontage et relance SNAP (21:30)			
31.10.03	17:45	Depuis un certain temps, probl. avec Mariotte: menisque tube int. à 500 au lieu de env. 230			
	18:00	Durée actuelle totale de l'essai: 1032 h à savoir: 43 jours. Acco =184h, gel=240h, dégel=608h			
	18:40	Vase Mariotte réinitialisé à 997 cc			
1.11.03	16:00	Stop SNAP, ôter pb et capt., Panorama 360°. A env. 17:20 remise pb et capt., redémarrage SNAP Δt=1/4h			
4.11.03	18:30	Stop des VI SNAP et DEGEL. Mise à jour Windows2000. Redémarrage des deux VI.	Essai_3_3c.xls		
5.11.03	15:20	Tête = +15°C, Temb = +5°C (consigne)			
6.11.03	10:55	Arrêt des deux cryostats et enlèvement isolation extérieure			
7.11.03	15:52	Arrêt de l'acquisition des données. Préparation dispositif pour son transport dans local rayons X			
11.11.03	10:00	Transport du dispositif dans le local des rayons X. Tests rayons X			
18.11.03	13:00	Démontage et vidage éprouvette avec teneurs en eau			
Obs. gén.	<ul style="list-style-type: none"> • Ne pas oublier de faire des teneurs en eau, à différentes hauteurs, sur le matériau sorti de l'éprouvette à la fin de l'essai • Probl. avec Labview : impossible de modifier l'intervalle de mesure sans arrêter le vi. • Les tiges des TDR passent trop près du tube de l'endoscope => modifier un peu la tête ou déplacer la fente de l'isolation ext. • Faire image 360° à différents niveaux de l'éprouvette : libérer vis rotation • 26.10.03 passage à l'heure d'été (3h matin = 2h matin). Les heures de l'acquisition des données restent toutes en heures d'été. 				

4-44 Exemple du formulaire "Suivi de l'essai"

4.12 Plans de construction

La construction du dispositif d'essai a nécessité le dessin de quelque 40 plans de construction dont la liste fait l'objet de la figure 4-46. Tout le dispositif a été réalisé dans l'atelier des Laboratoires de mécanique des sols et des roches de l'EPFL. Les numéros manquant dans la séquence des plans correspondent à des dessins qui ont été abandonnés. Les fichiers de ces plans de constructions sont tous inclus dans le CD-Rom annexé à ce rapport.

No	Titre	Nom fichier	Echelle	Format
SY49-01	Cellule Bishop 1	D01 Cellule Bishop 1.cdd		A2
SY49-02	Cellule Bishop 2 Ø 150 mm	D02 Cellule Bishop 2 150.cdd	1:2	A1
SY49-03	Tube endoscope pour test	D03 Tube-endo-test.cdd	1:1	A4
SY49-04	Endoscope spécial	D04 Endoscope spécial.cdd	1:1	A4
SY49-05	Endoscope déplaçable	D05 Endoscope déplaçable.cdd	1:1	A4
SY49-06	Thermistances	D06 Thermistance.cdd	2:1	A4
SY49-07	Cellule genre CBR Ø 150 mm	D07 Cellule genre CBR 150.cdd	2:1	A1
SY49-08	Cellule CBR Embase	D08 Cell_CBR Embase.cdd	1:1	A1
SY49-09	Cellule CBR Couvercle	D09 Cell_CBR Couvercle.cdd	1:1	A1
SY49-10	Cellule CBR Moule PVC	D10 Cell_CBR Moule PVC.cdd	1:1	A1
SY49-11	Tube endoscope déplaçable	D11 Tube endo dépl.cdd	1:1	A2
SY49-12	Passage des capteurs au travers moule	D12 Passage capt moule.cdd	1:1	A1
SY49-14	Plaque connecteurs acquisition données	D14 Plaque connecteurs.cdd	1:2	A3
SY49-15	Chariot	D15 Presse et chariot.cdd	1:10	A4
SY49-16	Socle datalogger	D16 Socle datalogger.cdd	1:5	A3
SY49-17	Soudures et textes plaque connexions	D17 S&T plaque connexions.cdd	1:2	A3
SY49-18	Câbles	D18 Câbles.cdd	–	A4
SY49-19	Support capteur de gonflement	D19 supp capteur gonfl.cdd	1:2	A3
SY49-20	Isolation extérieure	D20 Isolation ext.cdd	1:5	A2
SY49-21	Embase de compactage	D21 Embase compactage 1.cdd	1:2	A4
SY49-22	Connecteur boîtier analogique Haake	D22 Connect anal Haake.cdd	–	A4
SY49-23	Couvercle: pierre poreuse rempl. par plaque alu	D23 Mofif pierre poreuse.cdd	1:1	A3
SY49-24	Modification embase 1	D24 Modif embase 1.cdd	1:1	A3
SY49-25	Embase compactage 2 & hausse.cdd	D25 Embase comp 2 & hausse.cdd	1:1	A1
SY49-26	Dispositions Rayons X	D26 Dispos rayons X.cdd	–	A4
SY49-27	Socle pour UPS	D27 Socle UPS.cdd	1:5	A4
SY49-28	Portique isolation ext.	D28 Portique isol.cdd	1:10	A3
SY49-29	Usage cellule Bishop comme presse	D29 Cellule Bishop.cdd	1:2	A2
SY49-30	Dispositions local rayons X	D30 Dispo local RX.cdd	1:20	A4
SY49-31	Position billes Pb fixes	D31 Position billes Pb.cdd	–	A4
SY49-32	Partie supérieure de l'isolation ext.	D32 Partie sup isol ext.cdd	1:5	A3
SY49-33	Tête du tube de l'endoscope	D33 Tête tube endo.cdd	2:1	A4
SY49-35	Tube pour thermistances centrales	D35 Thermi centre.cdd	1:2, 2:1	A3
SY49-36	Moule PVC pour tests RX	D36 Cell_essais RX.cdd	1:2	A3
SY49-37	Partie inférieure isolation extérieure	D37 Partie inf isolation ext.cdd	1:5	A2
SY49-38	Simulation moule pour presse Bishop	D38 Simul moule pr Bishop.cdd	1:4	A4
SY49-39	Protection électronique contre rayons X	D39 Prot électronique X.cdd	1:10	A3
SY49-40	Modification plateau sup. et tête refroid.	D40 Modif plaque sup & tête.cdd	1:2	A3
SY49-41	Poinçon pour capteur TDR	D41 Poinçon TDR.cdd	1:1	A4
SY49-42	Pèse Mariotte	D42 Pèse Mariotte.cdd	1:2	A4
SY49-43	Câbles pèse Mariotte	D43 Câble pèse Mariotte.cdd	–	A4
SY49-44	Refroidissement isolation extérieure	D44 Refroid isol ext.cdd	1:5	A2
SY49-45	Modification support film rayons X	D45 Modif support film.cdd	1:2	A4
SY49-46	Modification couvercle	D46 Modif couvercle.cdd	1:1	A3
SY49-47	Moule pour essais wu & u = f(T)	D47 Moule wu=f(T)	1:1	A4

4-46 Liste des plans de construction

5

Résultats des essais sans la presse

5.1 Introduction

Ce chapitre contient les résultats détaillés de tous les essais réalisés, en laboratoire, dans le moule d'essai avec une charge verticale statique constituée d'anneaux de plomb. Certaines interprétations de ces essais font partie de ce chapitre, mais l'essentiel des interprétations est consigné au chapitre 7.

Par commodité de mise en pages, les simulations numériques entreprises avec ces essais font l'objet du chapitre 8. Leurs résultats peuvent être néanmoins utilisés dans le présent chapitre.

Pour faciliter la lecture de ce chapitre et du chapitre 6, consacré aussi aux résultats des essais, les tableaux 5-1 et 5-2 sont un résumé des buts et des principales caractéristiques de tous les essais.

5-1 Buts et principales caractéristiques des essais du chapitres 5

Essai	But	Principales caractéristiques et remarques	Energie compact. [MJ·m ⁻³]	Charge vert. [kPa]
1 & 2	Evaluation de l'effet des capteurs sur la répartition des températures dans le moule.		0,6	Plomb 4
3	Essai de mise au point avec tous les capteurs et l'endoscope.		0,6	dito
4	Premier essai avec un dispositif et des paramètres corrects. Tous les capteurs et l'endoscope ont été utilisés.	Gel et dégel progressif. $T_{\text{tête min}} = -7^{\circ}\text{C}$	0,6	dito
5	Mesure des températures sur l'axe de l'éprouvette. Prévu pour caler la simulation numérique. Les thermistances sont placées dans le tube qui remplace celui de l'endoscope.	Programme de gel – dégel presque semblable à celui de l'essai no 4. La mesure des températures sur l'axe a mal fonctionné.	0,6	dito
6	Même but que l'essai no 5 mais avec un autre dispositif pour la mesure des températures sur l'axe de l'éprouvette : les thermistance sont placées directement dans le limon et leurs câbles sortent par les trous des tensiomètres. Tube de l'endoscope non mis en place.	Programme de gel – dégel semblable à celui de l'essai no 4. Mesure correct des températures sur l'axe.	0,6	dito
7	Mesure du régime permanent des tensions capillaires dans l'éprouvette avant le gel. L'éprouvette est ensuite utilisée pour l'essai no 8.		0,6	dito
8	Créer des lentilles de glace de grande épaisseur pour filmer leur dégel et étude de l'effet d'un réchauffement suivi d'un refroidissement.	Eprouvette de l'essai no 7 utilisée. Très intéressantes observations.	0,6	dito

5-2 Buts et principales caractéristiques des essais du chapitre 6

Essai	But	Principales caractéristiques et remarques	Energie compact. [MJ·m⁻³]	Charge vert. [kPa]
9	Etude répartition déformations par rayons X avec charge par plombs. Etude de l'effet du compactage plus faible de l'éprouvette et mesure des pertes d'eau par évaporation.	Programme de gel – dégel un peu semblable à ceux des essais no 4 à 6.	0,4	Plomb 4
10	Tester la mesure des déformations sous différentes charges verticales, au moyen de radiographies.	Cet essai a aussi permis une dernière mise au point de la presse Bishop. Même éprouvette que essai 9.	0,4	Presse Bishop
11	Comparer essais 3 à 8 dont la charge verticale est de 4 kPa avec charge de 20 kPa. Au dégel, évaluation module résilient.	Approximativement les mêmes que celles des essais no 3 à 8.	0,6	Presse Bishop 20
12	Idem essai no 11, mais avec une énergie de compactage de 0,4 MJ·m ⁻³	Idem essai no 11.	0,4	Presse Bishop 20

5.2 Essais no 1 et 2

5.2.1 But des essais

Ces deux premiers essais avaient pour but d'évaluer l'effet des capteurs : endoscope, TDR et tensiomètres, sur la répartition des températures dans et sur les limites de l'éprouvette. L'essai no 1 a été réalisé sans capteur et l'essai no 2 avec tous les capteurs. Ces deux essais ont aussi permis de tester la procédure d'essai et de la modifier en fonction des problèmes rencontrés.

5.2.2 Caractéristiques de l'éprouvette

Les caractéristiques de compactage de l'éprouvette sont données sur le tableau 5-3.

5-3 Caractéristiques du compactage des éprouvettes des essais no 1 & 2

Essai	1	2
Diamètre max. des grains [mm]	2	2
Nombre de couches	11	11
Coups par couche	38	23
Hauteur de chute [mm]	305	305
Masse de la dame [kg]	2,5	4,5
Energie de compactage [$\text{MJ}\cdot\text{m}^{-3}$]	0,56	0,61
Masse volumique éprouvette ρ_d [$\text{t}\cdot\text{m}^{-3}$]	1,9 (1)	1,67
Teneur en eau de l'éprouvette [%]	18 (1)	14,4
Degré de saturation S_r [-], $\rho_s = 2,70 \text{ t}\cdot\text{m}^{-3}$	–	0,63
(1) Valeurs désirées ; les ρ_d et w n'ont pas été déterminés		

La procédure du compactage n'étant pas encore parfaitement déterminée pour le premier essai, les valeurs du tableau 5-3 ne sont pas tout à fait les mêmes pour les deux éprouvettes ou sont imprécises.

5.2.3 Problèmes rencontrés

Englaçage de la tête de refroidissement

Au contact de l'air ambiant, la tête de refroidissement s'englace fortement. Pour éviter que l'eau de fonte de cette glace ne pénètre dans l'éprouvette par l'interstice entre la tête et le moule, cette glace doit être éliminée soigneusement au début du dégel.

Position initiale de la tête de refroidissement

Au début d'un essai, la distance entre le haut du moule et celui de l'éprouvette doit être assez faible afin que la sortie du câble de la thermistance ne s'appuie pas sur le bord du moule.

Tensiomètres

Trois des quatre tensiomètres se sont cassés lorsque le front de gel les a dépassés. Ils doivent être remplis avec de l'eau mélangée de glycol de façon à ce que leur céramique ne casse pas sous l'effet de la glace se formant dans leur cavité centrale.

Efficacité des isolations

Isolation intérieure trop faible.

Températures du laboratoire

Le laboratoire dans lequel les essais sont réalisés est, en principe, un laboratoire à température constante de $22\pm 1^\circ\text{C}$. Cependant, le Service d'exploitation de l'EPFL, a beaucoup de peine à régler correctement l'installation de climatisation et pendant les essais no 1 & 2 cette température n'a de loin pas été constante. Elle a même atteint quelque 28°C ! Cela a perturbé les essais dans une mesure qu'il est difficile d'estimer car cette température n'était pas mesurée en continu. Le LMS a réagi auprès du Service d'exploitation et dès l'essai no 3, les choses se sont améliorées. En outre, dès cet essai no 3, la température du local est mesurée de façon continue par la chaîne de mesures.

5.2.4 Paramètres donnés

Pour les deux essais, les températures de la tête de refroidissement et de l'embase (températures mesurées) sont données sur la figure 5-4. Ces deux températures peuvent être considérées comme les deux conditions aux limites principales, avec aussi le niveau de la nappe phréatique. La figure 5-4 montre aussi la hauteur de la nappe dans l'éprouvette.

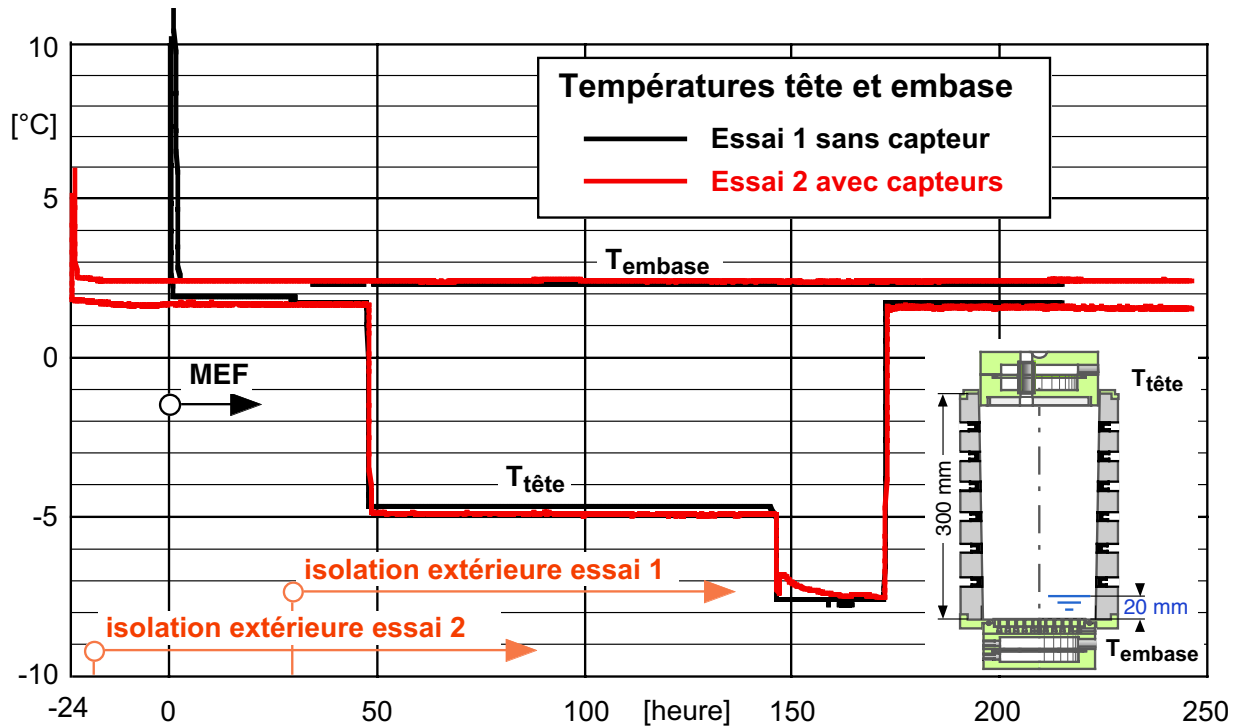
On remarquera sur la figure 5-4 que, pour différentes raisons pratiques, l'isolation extérieure du dispositif n'a pas été placée au même moment des essais no 1 & 2. Comme pour la température variable du laboratoire, cela a nui à la comparaison des résultats, mais dans une mesure qu'il est difficile d'estimer. En outre, la durée du dégel, a été, volontairement, beaucoup trop courte. Les lentilles de glace n'ont, de loin pas, eu le temps de fondre.

5.2.5 Résultats des mesures

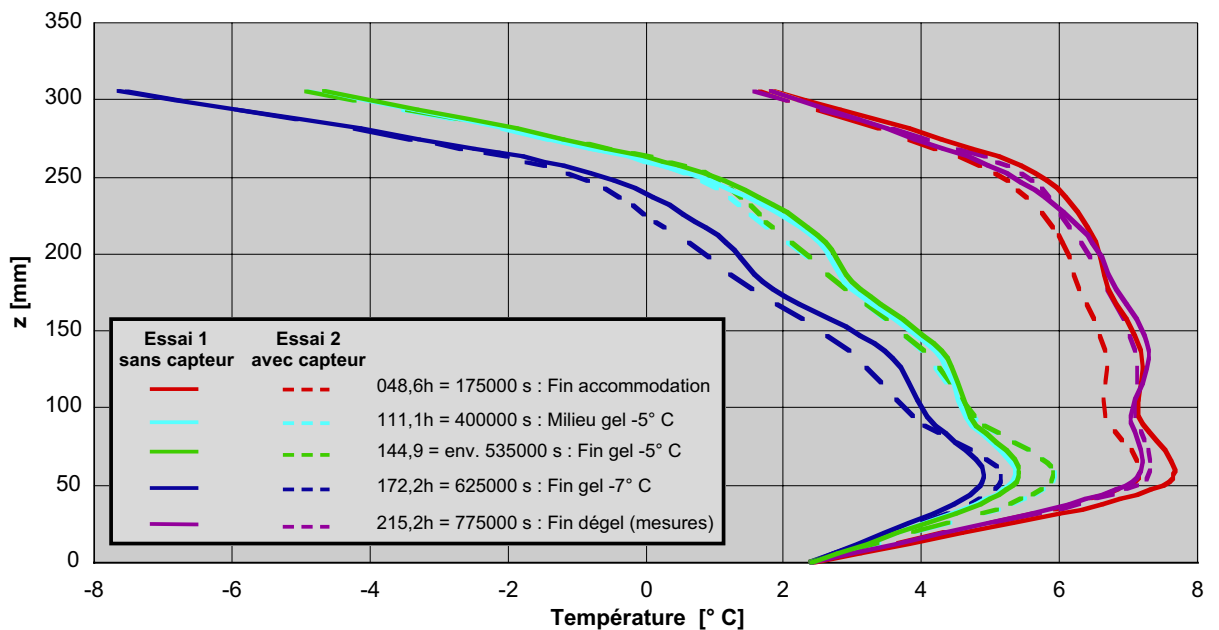
Les seuls résultats intéressants pour l'étude de l'effet des capteurs sur le champ thermique à l'intérieur de l'éprouvette sont les mesures de la température au moyen des thermistances placées, sur deux axes opposés, dans la paroi du moule. Cependant et comme déjà mentionné plus haut, ces mesures comparatives ont été perturbées par un facteur indépendant de la volonté de l'opérateur, à savoir la température du local qui a varié fortement pendant les deux essais, alors qu'elle aurait dû rester constante à 1°C près. En outre, la consigne des températures de la tête de refroidissement n'a pu être exactement la même d'un essai à l'autre, ceci comme le montre la figure 5-4.

Les résultats de cette comparaison sont résumés sur la figure 5-5. Elle montre qu'il n'y a pas trop de variations entre l'essai sans capteur et celui avec capteurs. Compte tenu de la variabilité des conditions aux limites de l'éprouvette, on peut admettre que les capteurs ne perturbent que très peu le champ thermique à l'intérieur de l'éprouvette.

Il est, bien entendu, que de nombreux autres résultats ont été obtenus pendant ces deux essais. Ils n'ont cependant un intérêt que pour la mise au point de la procédure d'essai et ne seront pas discutés ici. Pour l'auteur de ces lignes, cette comparaison n'est nonobstant pas tout à fait satisfaisante. Pour cette raison, une autre comparaison par simulation numérique a été réalisée. Elle est placée dans le chapitre 6.



5-4 Essais no 1 & 2 : Paramètres



5-5 Essais 1 et 2 : Comparaison des températures mesurées par les thermistances.

La forme des courbes de température au bas du moule peut paraître curieuse. Elle provient du fait que les températures au-dessus de 50 mm ont été mesurées sur la face intérieure du moule et que celle à la base du moule est donnée par la thermistance placée en son centre.

5.2.6 Conclusions

La comparaison des résultats des mesures de températures sur la face intérieure du moule, faites sans et avec les capteurs et avec des simulations numériques menées par un modèle élaboré, montre que l'effet des capteurs sur la répartition des températures à l'intérieur de l'éprouvette n'est pas nulle, mais peut être négligé.

5.3 Essai no 3

5.3.1 But de l'essai

C'est le premier essai complet où tous les paramètres ont été (tentés d'être !) mesurés, et où l'endoscope a été utilisé de manière continue. On peut cependant encore considérer cet essai comme un essai de mise au point de la procédure, car tout n'a pas été sans problème. Comme tous les essais suivants, le but principal de cet essai est l'examen des conditions de fonte des lentilles de glace. Ceci sur le plan visuel par les prises de vues au moyen de l'endoscope lors de la formation des lentilles de glace et, surtout, lors de leur fonte.

Par des corrélations entre ces prises de vue et :

- les mesures opérées avec les capteurs de températures, de teneur en eau non gelée et de succion capillaire (tensiomètres),
- les mesures de la déformation verticale de l'éprouvette et des volumes d'eau échangés entre le tube de Mariotte et l'éprouvette,

une description exhaustive du dégel des sols gélifs devrait pouvoir être établie sur le plan hydraulique, thermique et mécanique.

5.3.2 Caractéristiques de l'éprouvette

Les caractéristiques de compactage de l'éprouvette sont données sur le tableau 5-6.

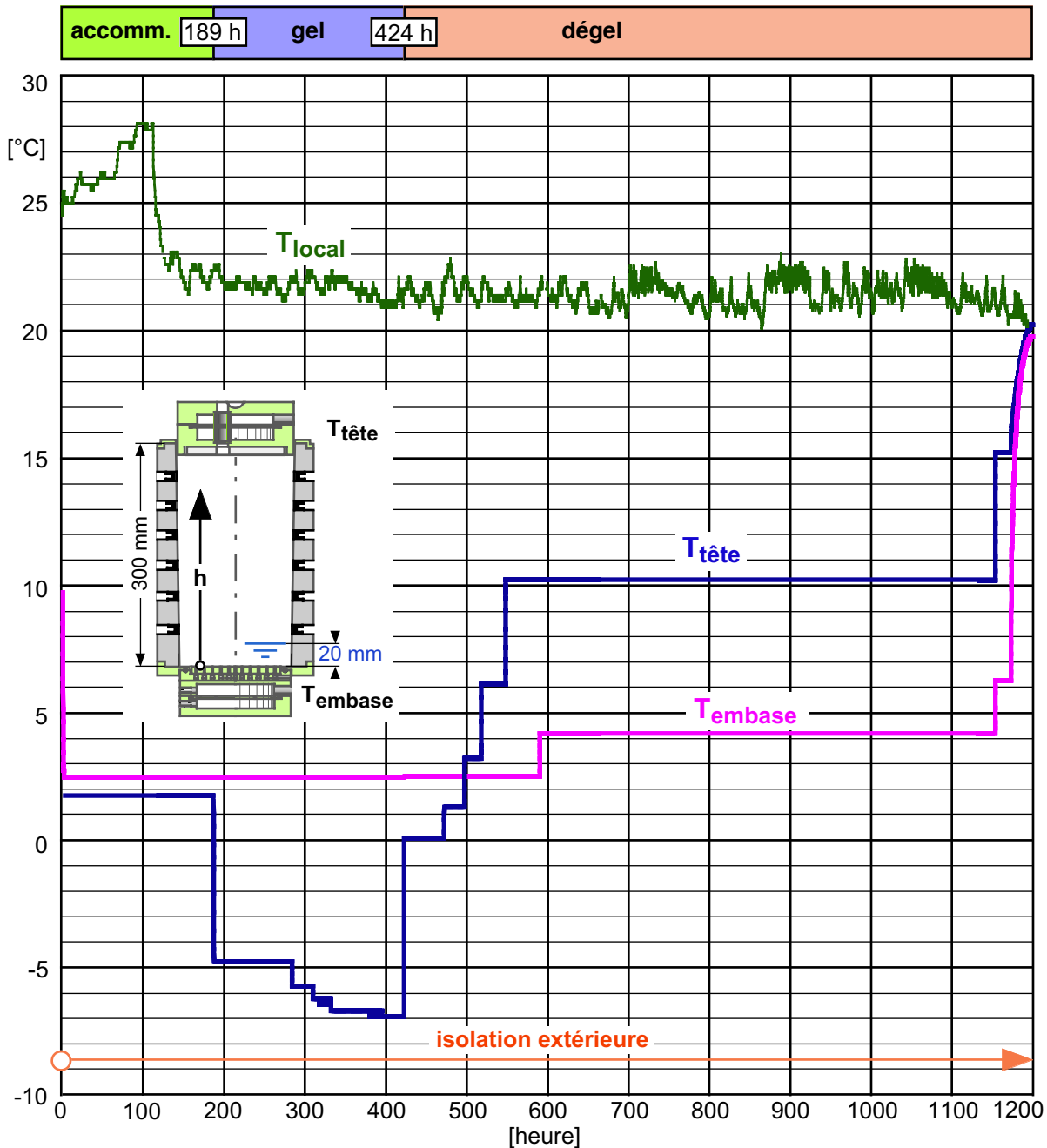
5-6 Essai no 3 : Caractéristiques du compactage de l'éprouvette

Essai	3
Diamètre max. des grains [mm]	2
Nombre de couches	11
Coups par couche	23
Hauteur de chute [mm]	305
Masse de la dame [kg]	4,5
Energie de compactage [$\text{MJ}\cdot\text{m}^{-3}$]	0,61
Masse volumique éprouvette ρ_d [$\text{t}\cdot\text{m}^{-3}$]	1,89
Teneur en eau de l'éprouvette [%]	14,3
Degré de saturation S_r [-], $\rho_s = 2,70 \text{ t}\cdot\text{m}^{-3}$	0,90

5.3.3 Paramètres donnés

Pour cet essai, les températures de la tête de refroidissement et de l'embase (températures mesurées), ainsi que la hauteur de la nappe phréatique, sont données sur la figure 5-7. La durée du dégel a été volontairement longue ; ceci de façon à pouvoir évaluer toutes les influences parasites qui peuvent altérer les résultats. Lors des essais suivants, cette durée sera réduite.

On remarquera sur la figure 5-7 que, après l'accommodation, la température du local s'est stabilisée à $21,5 \pm 1^\circ \text{C}$, ce qui est acceptable.

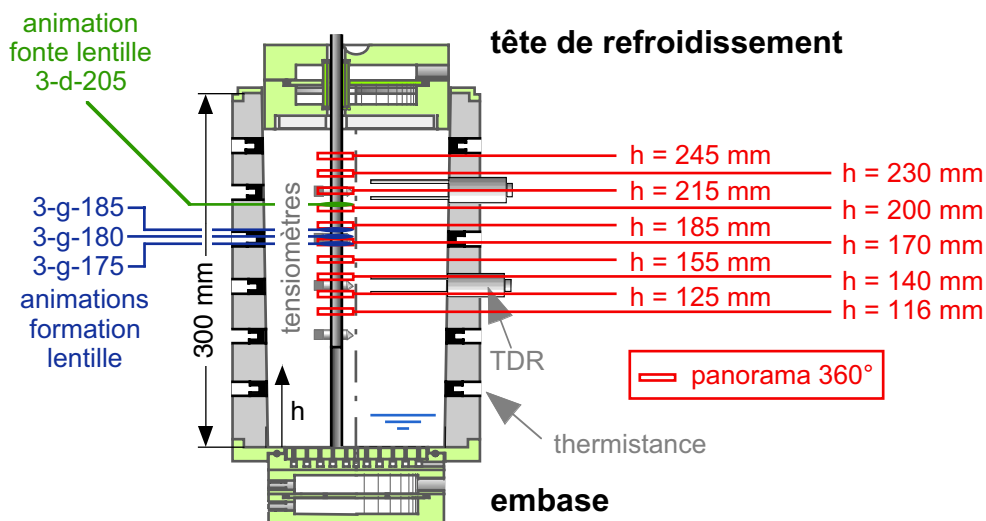


5-7 Essai no 3: Paramètres

5.3.4 Prises de vues avec l'endoscope

Les niveaux des panoramas sont décrits par la figure 5-8. Lors de la réalisation de l'essai no 3, toute la procédure n'était pas encore au point. Ainsi et par exemple, des panoramas à 360° au moyen de l'endoscope n'ont pas été réalisés à la fin de l'accommodation et du gel, et les hauteurs des panoramas ne sont pas celles prescrites au chapitre 4.

La figure 5-9 présente huit extraits d'une première animation (3-g-185-310) du gel d'une lentille de glace dont les prises de vues ont été réalisées à une hauteur h de 185 mm (voir fig. 5-8), qui débute 308 heures après le début de l'essai no 3 et qui dure 23h30.



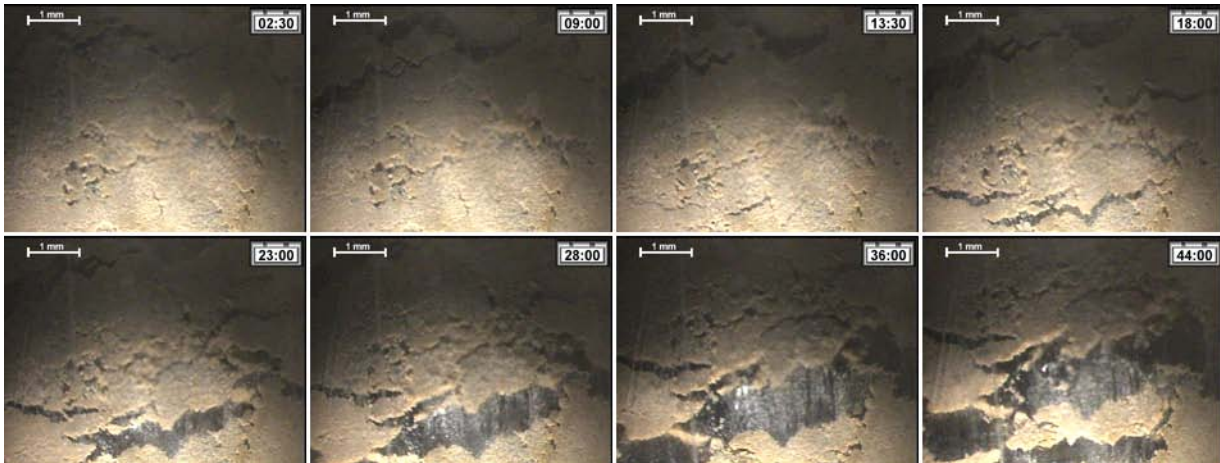
5-8 Essai no 3: Niveaux des panoramas à 360° et animations



5-9 Essai no 3 : Formation d'une lentille de glace, $h=185$ mm, 0 h = 308 h de tout l'essai (fig. 5-8)
Séquence d'images tirée d'une animation

Pendant la première partie de l'animation (cinq premières photos de la figure 5-9), la partie inférieure des lentilles ne bouge absolument pas. Elles croissent au-dessus de ce niveau. La cinquième photo correspond à la fin de la formation des lentilles visibles. L'isotherme 0°C « décroche » alors vers le bas et va former d'autres lentilles invisibles sur les photos. La formation de ces dernières pousse le sol vers le haut (gonflement), comme le montre les deux dernières photos de la figure 5-9.

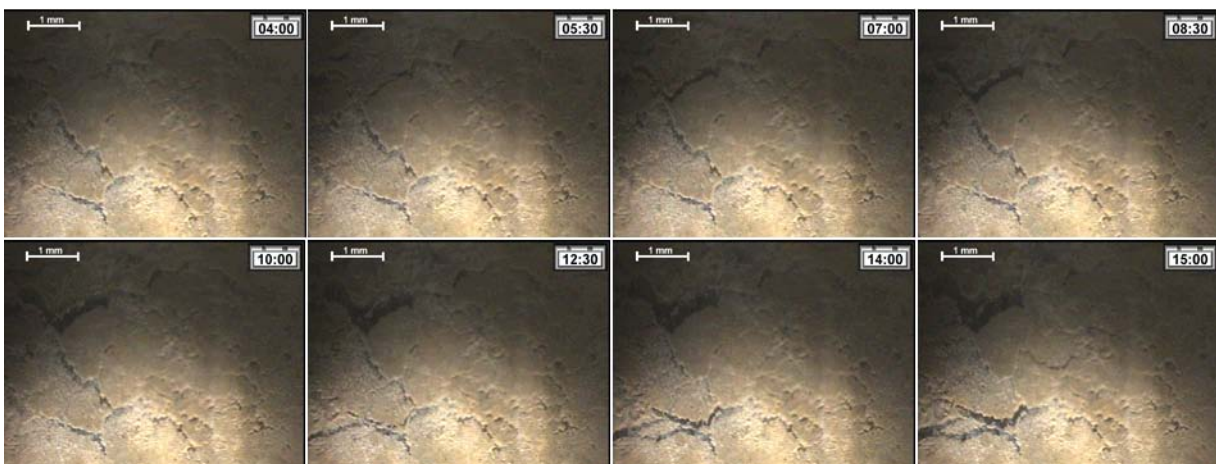
La figure 5-10 présente huit extraits d'une deuxième animation (3-g-180-336) du gel de plusieurs lentilles de glace réalisée à une hauteur de 180 mm et qui débute 335 heures après le début de l'essai no 3 et qui dure 44 heures.



**5-10 Essai no 3: Formation d'une lentille de glace, $h=180$ mm, 0 h = 335 h de tout l'essai (fig. 5-8)
Séquence d'images tirée d'une animation**

Au début de l'animation, les lentilles en croissance sont placées en haut des images (pas très visible sur la figure 5-10). Ensuite, dès 12:00 h environ, des lentilles commencent à se former en bas des images. Elles croissent tout en poussant les lentilles supérieures vers le haut. En fin d'animation, elles sont poussées vers le haut par des lentilles en formation que l'on ne voit pas sur les images. Toutes les lentilles visibles dans cette animation ne sont pas du tout horizontales. Les zones de faiblesse de l'éprouvette sont dues au compactage qui n'est pas tout à fait uniforme ; elles déterminent l'orientation des lentilles. Par contre, les vecteurs vitesse de leur croissance sont quasi verticaux.

La figure 5-11 présente huit extraits d'une troisième animation (3-g-175-409) du gel de plusieurs lentilles de glace réalisée à une hauteur de 175 mm et qui débute 407 heures après le début de l'essai no 3 et qui dure 15 heures.

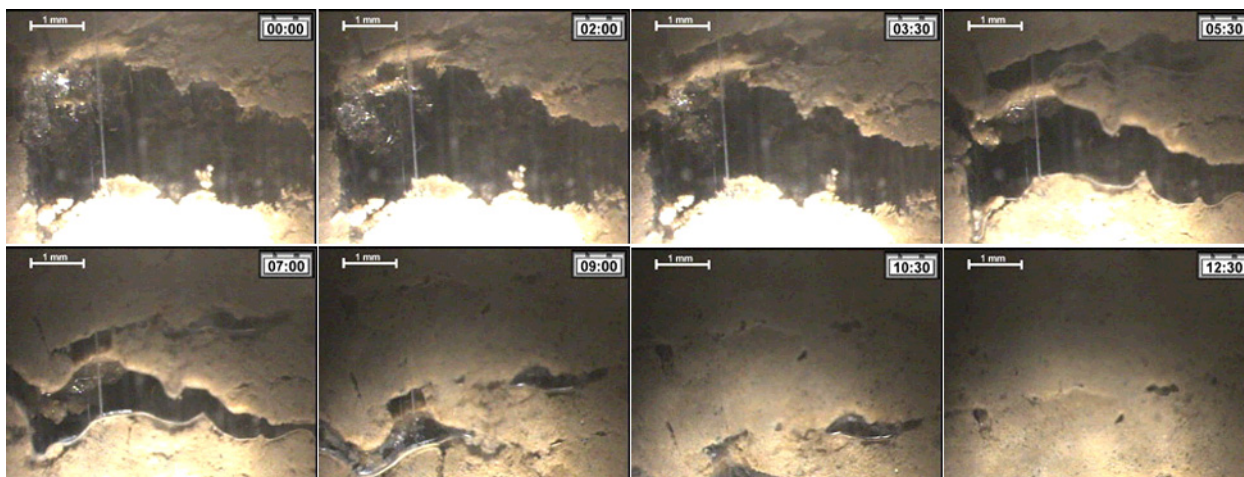


**5-11 Essai no 3: Formation de lentilles de glace, $h=175$ mm, 0 h = 407 h de tout l'essai (fig. 5-8)
Séquence d'images tirée d'une animation**

On remarque, tout d'abord, que le sol a une certaine structure due au compactage ; les zones grises filiformes que l'on peut voir sur l'image 04:00 ne sont pas des lentilles de glace, mais des fissures. Une lentille commence à se former en haut à gauche de l'image 04:00. Sa croissance est

bien visible sur les images 05:30 à 08:30 et, au-dessous, rien ne se passe. Dès 10:00 heures, une lentille commence à se former, en bas à gauche, dans une fissure préexistante. La lentille supérieure continue à croître, ceci jusqu'à la fin de l'animation. De 12:30 à 15:00, la lentille inférieure se développe et son gonflement provoque la fermeture d'une fissure se trouvant juste au-dessus et l'ouverture d'une fissure au centre de l'image.

La figure 5-12 présente huit extraits d'une animation (3-d-205-430) de la fonte d'une lentille de glace placée à une hauteur de 205 mm. Les prises de vues ont été réalisées 428 heures après le début de l'essai no 3 et l'animation dure 12h30.

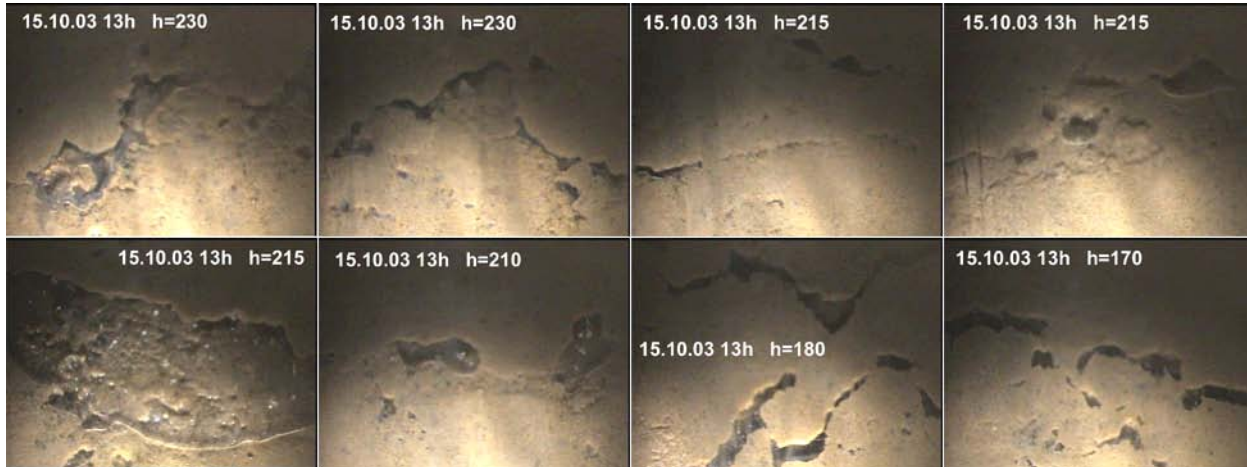


5-12 Essai no 3: Fonte d'une lentille, h=205 mm, 4 heures après début dégel, 0 h = 428 h (fig. 5-8). Séquence d'images tirée d'une animation.

La séquence de la figure 5-12 montre, tout d'abord, que la fonte de la lentille est plus rapide que les formations de lentilles qui font l'objet des figures 5-9, 5-10. et 5-11. La durée de la fonte est de quelque 12h30. On voit aussi sur la figure 5-12 l'eau de fonte de la lentille qui s'accumule contre le tube en plexiglas. Les photos ne montrent cependant pas où va cette eau de fonte. Il faudrait corrélérer ces prises de vues avec les mesures de la succion capillaire et de la teneur en eau non gelée pour démontrer comment chemine cette eau de fonte, ce qui sera fait pour d'autres essais. Un curieux phénomène est visible sur cette animation (pas très bien sur le figure 5-12) : La lentille qui se trouve sur le haut des photos continue à croître jusqu'à environ 05:00 h, alors que la grosse lentille inférieure est déjà en train de fondre. La décompression de la zone autour de cette lentille supérieure due à la fonte de la lentille inférieure est probablement la cause de ce regel.

Enfin, la dernière photo de la figure 5-12 montre, qu'à la fin du dégel de la lentille, l'ancienne position de la lentille n'est qu'à peine marquée. Sous la faible contrainte de 4 kPa produite par les trois plombs de charge de l'éprouvette, le sol s'est reconsolidé en grande partie. Le régime de la succion capillaire sous l'ancienne lentille joue aussi un rôle important dans cette reconsolidation (voir chapitre 2).

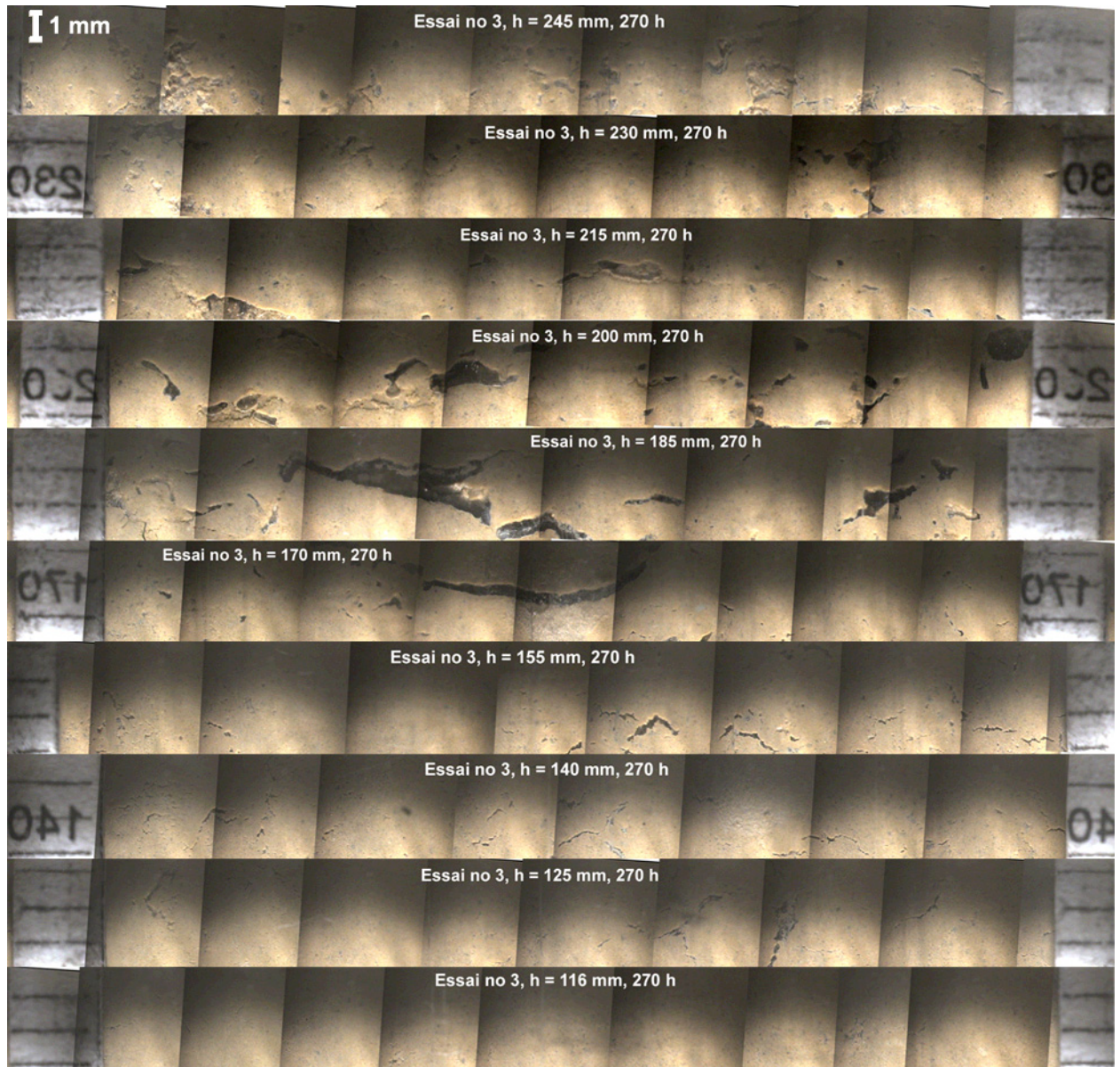
La figure 5-13 montre quelques formations particulières photographiées 218 heures après le début du dégel de l'essai no 3. *Aucune de ces formations ne sont des lentilles de glace* car, à ce moment, le dégel était terminé depuis longtemps. La photo en bas à gauche montre, peut-être, la trace laissée par la fonte d'une lentille. Les autres formations proviennent des billes de plomb ou des particules grossières du limon.



5-13 Essai no 3: Formations particulières 218 heures après début dégel (642 h sur fig. 5-8)

Le panorama de la figure 5-14 a été réalisé 270 heures après le début du dégel. À ce moment, toutes les lentilles avaient fondu. D'autres panoramas auraient dû être réalisés à la fin de l'accommodation, pendant le gel et au début du dégel, pendant la fonte des lentilles. Cela sera le cas lors des essais suivants.

Enfin, pour le plaisir, la figure 5-15 montre des aiguilles de glace qui se sont formées juste sous la tête de refroidissement, contre le tube de plexiglas de l'endoscope, ceci 10 heures après le début du gel. Cette forme de glace est classique des zones où le gradient thermique est important.



5-14 Essai no 3: Panoramiques à 360° à différentes profondeurs, 270 heures après le début du dégel (694 h sur fig 5-8).



5-15 Essai no 3: Aiguilles de glace juste sous la tête de refroidissement

Les animations dont des extraits font l'objet des figures 5-9, 5-10, 5-11 et 5-12 se trouvent sur le CD-Rom annexé :

Gel :

- Essai no 3. Formation lentille à $h = 185$ mm : **3-g-185-310**
- Essai no 3. Formation lentille à $h = 180$ mm : **3-g-180-336**
- Essai no 3. Formation lentille à $h = 175$ mm : **3-g-175-409**

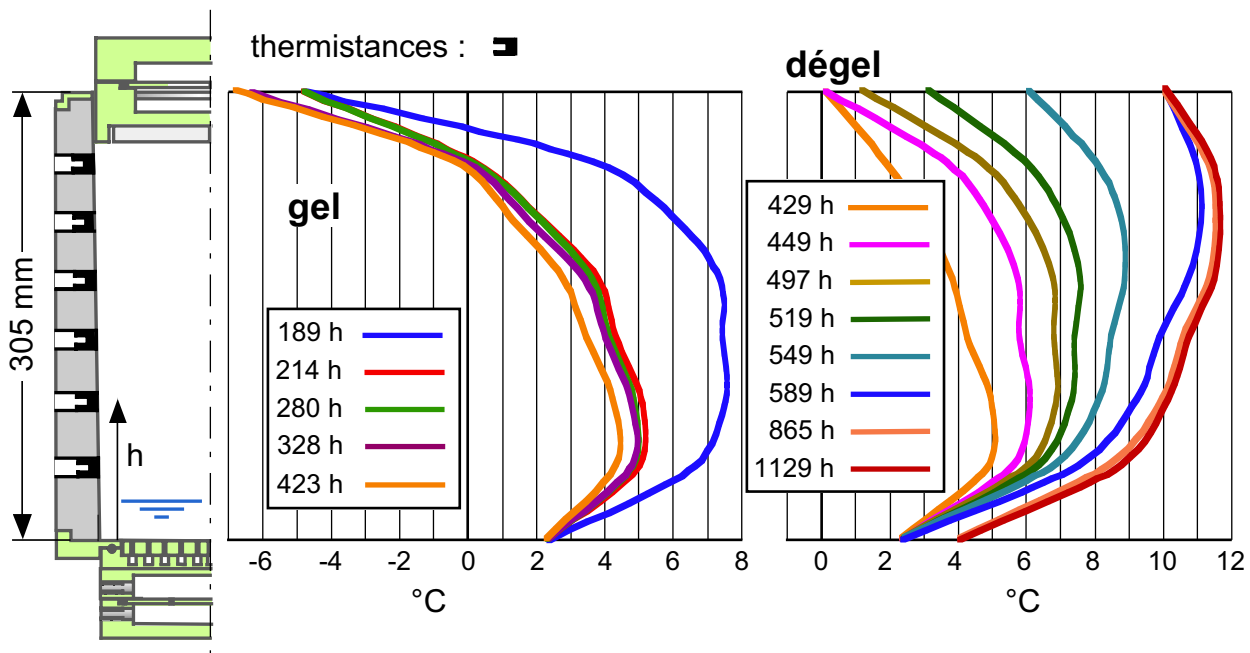
Dégel :

- Essai no 3. Fonte lentille à $h = 205$ mm : **3-d-205-430**

5.3.5 Résultats des mesures

5.3.5.1 Températures

La figure 5-16 montre, en fonction de la profondeur dans le moule, les températures mesurées avec les thermistances placées dans la paroi du moule. Les courbes sont les moyennes des mesures sur les deux axes opposés de mesure. Les températures sur la paroi du moule sont plus élevées que celles, déterminantes, sur l'axe du moule (voir les simulations numériques du chapitre 8 et les mesures de l'essai no 5 (section 5-36) effectuées avec des thermistances placées dans le tube central. Sur la figure 5-16 on constate même qu'elles ne sont négatives que juste sous la tête de l'éprouvette.



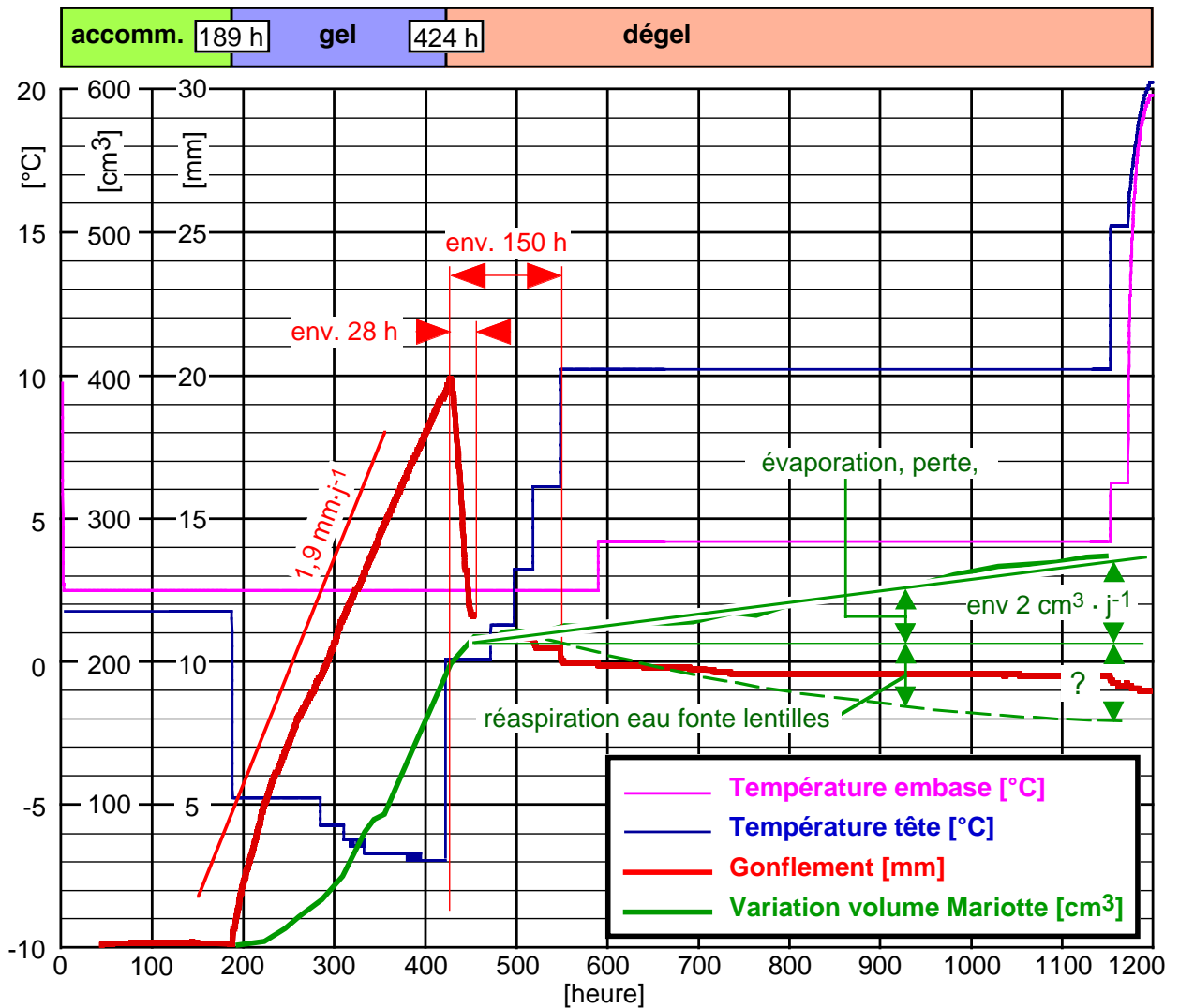
5-16 Essai no 3: Températures moule en fonction de la profondeur pendant le gel et le dégel

5.3.5.2 Gonflement et vase de Mariotte (fig. 5-17)

Le gonflement mesuré en tête de l'éprouvette dénote assez exactement le volume des lentilles de glace. En outre, l'eau nécessaire à leur formation provient en grande partie de l'embase alimentée par le vase de Mariotte. Ce volume d'eau devrait donc correspondre approximativement (une partie de l'eau provient de la partie inférieure de l'éprouvette et le

volume de la glace est environ 9% supérieur à celui de l'eau) au volume des lentilles de glace. La section du moule dans la zone des lentilles étant de quelque 200 cm³, 1 cm de gonflement devrait correspondre, approximativement, à 200 cm³ d'eau prélevée dans le vase de Mariotte. Sur la figure 5-17, l'échelle de la variation du volume d'eau dans le vase de Mariotte et celle du gonflement correspondent approximativement : 200 cm³ = 10 mm. La courbe verte de la figure devrait donc être proche de la courbe rouge. Ce n'est pas le cas et cette différence sera discutée au chapitre 7.

Enfin, pendant le dégel et la longue période après ce dernier, on constate une diminution du volume d'eau dans le vase de Mariotte d'environ 2 cm³ par 24 heures qui provient de l'évaporation en tête de l'éprouvette et de pertes éventuelles dans le circuit du vase de Mariotte. À cette diminution, devrait s'ajouter le volume d'eau réaspiré vers le pied de l'éprouvette qui est, malheureusement inconnu.



5-17 Essai no 3: Gonflement et variation volume du vase de Mariotte

5.3.5.3 Tensiomètres (haut fig. 5-18)

Le forage du trou de l'endoscope provoque une petite surpression, ce qui est tout à fait normal. Ensuite, les tensiomètres réagissent bien dans l'ordre à l'augmentation de la succion capillaire lors de la pénétration du front de gel dans l'éprouvette. Le plus haut (1) réagit en premier et le plus bas (4) en dernier. L'allure des courbes de succion pour les tensiomètres no 1 à 2 est normale si l'on sait qu'ils ont été remplis d'eau sans glycol. Cette eau gèle et la valeur mesurée par le tensiomètre s'annule. Le fait d'avoir rempli les tensiomètres avec de l'eau sans glycol est une erreur qui avait déjà été commise lors des essais réalisés dans la halle fosses d'Écublens (Dysli, 1982) car leur gel peut les casser ! Cela n'a pas été le cas pour cet essai.

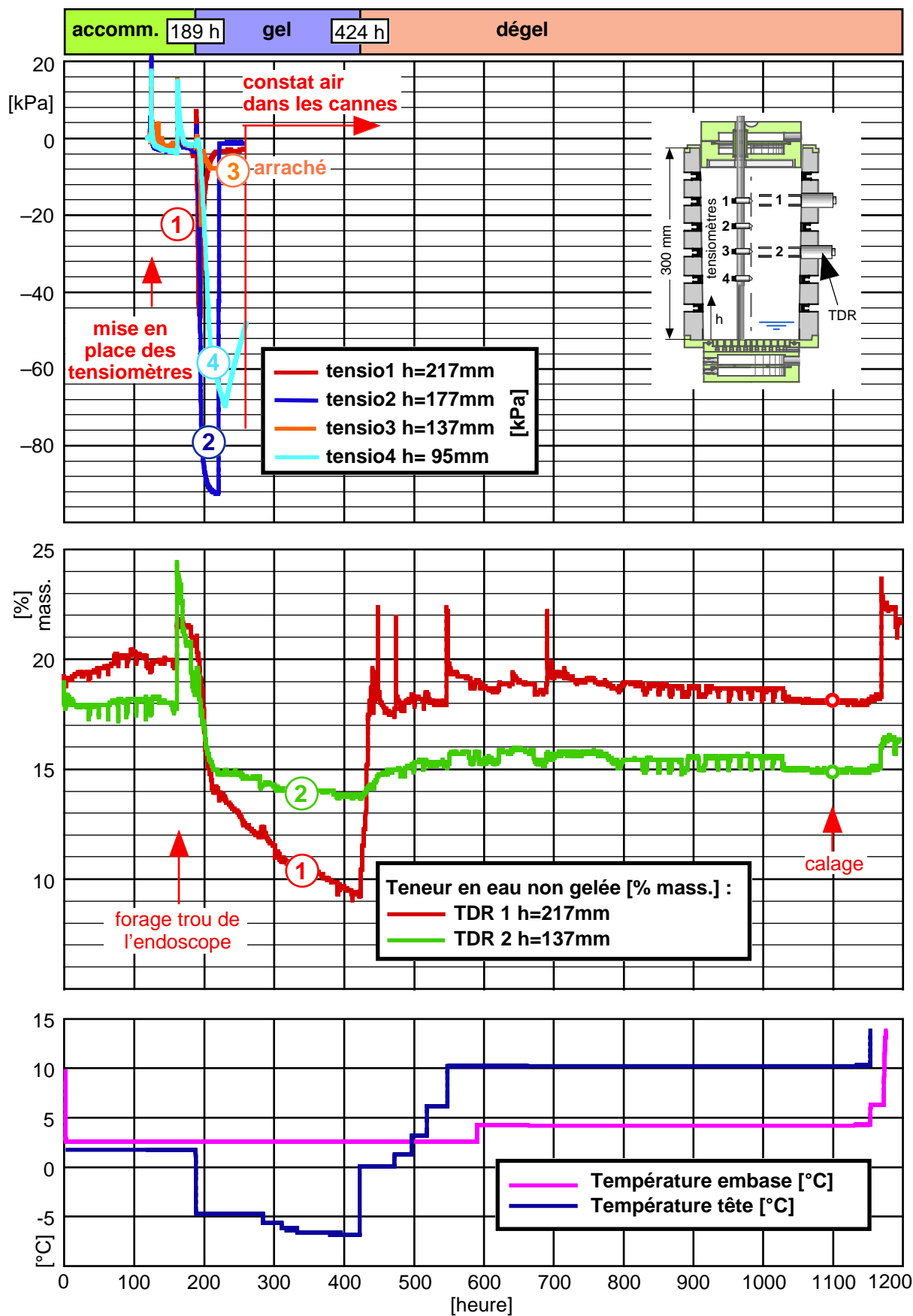
L'allure de la courbe de succion du tensiomètre no 3 ($h = 137$ mm) est anormale ; à la fin des essais, son extraction a en effet montré que ce tensiomètre avait, durant l'essai, été partiellement retiré par accident.

Le comportement du tensiomètre no 4 est un peu curieux. Jusqu'à 210 heures, tout se passe normalement et la succion engendrée par l'aspiration de l'eau vers le front de gel est compatible avec le limon utilisé et la durée du gel. La valeur maximale mesurée est forte ; cependant des valeurs de quelque 60 kPa avaient déjà été mesurées lors des essais réalisés dans la halle fosses d'Écublens (Dysli, 1982). Au-delà, les succions données par le tensiomètre sont un peu anormales. Il est probable que les entrées d'air dans la canne du tensiomètre constatées à environ 260 heures se soient déjà produites avant.

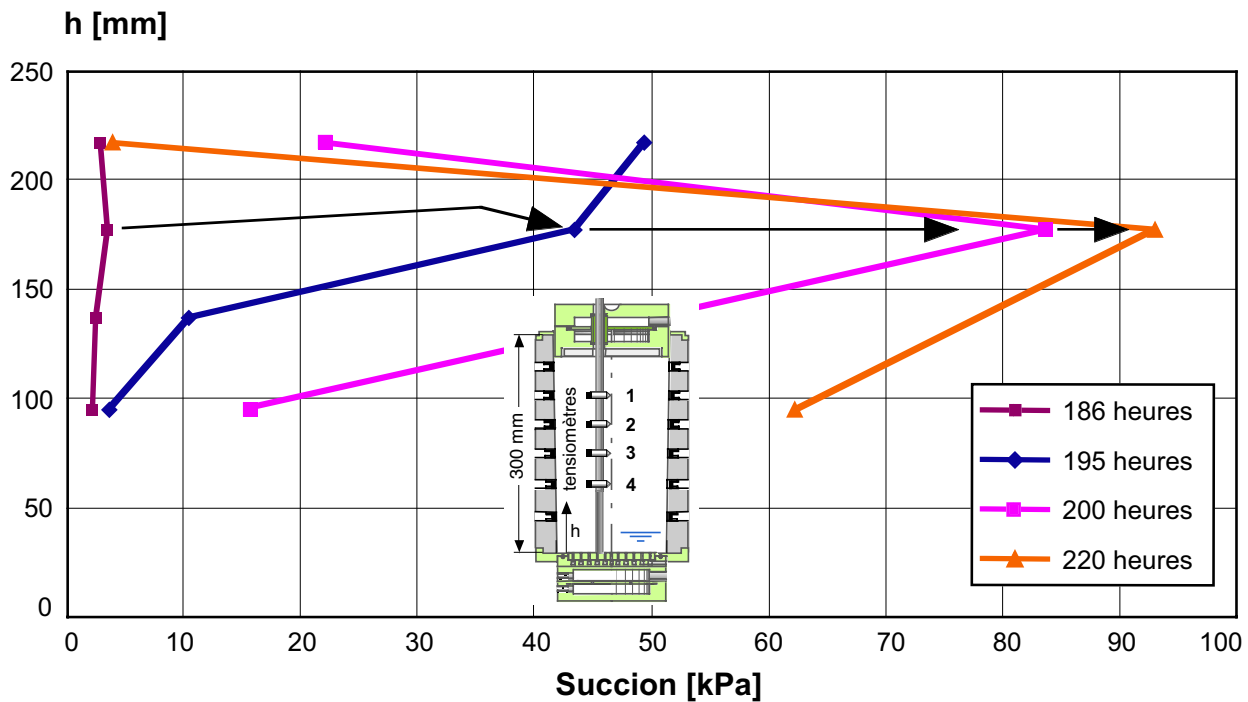
La figure 5-19 montre l'allure des succions capillaires en fonction de la profondeur et à différents moments. Sur cette figure, les valeurs des tensiomètres défectueux ne sont pas montrées. Le temps de 186 heures correspond à la fin de la période d'accommodation. Les succions sont constantes en fonction de la profondeur ce qui montre que le régime permanent des succions ne s'est pas encore établi. Si c'était le cas, la succion au sommet de l'éprouvette devrait être plus faible que celle donnée par le tensiomètre le plus profond.

La polygonale à 195 heures, soit au début du gel, est correcte. Les premières lentilles provoquent une forte augmentation de la succion dans la partie supérieure de l'éprouvette, alors que la valeur du tensiomètre le plus profond n'a pas bougé.

À 200 heures, la succion du 2^{ème} tensiomètre a encore augmenté, ce qui est normal. En outre, celle du tensiomètre le plus profond a nettement augmenté, ce qui est dû à la formation de lentilles au-dessus. La très faible valeur donnée par le premier tensiomètre est due au gel de l'eau contenue dans sa pierre poreuse. Enfin, à 220 heures, le phénomène décrit ci-dessus s'accroît.



5-18 Essai no 3: Succions capillaires et teneurs en eau non gelée en fonction du temps.



5-19 Essai no 3: Succions capillaires en fonction de la profondeur

5.3.5.4 Teneurs en eau non gelées (partie centrale fig. 5-18)

La teneur en eau est mesurée au moyen de deux capteurs TDR. Comme expliqué au chapitre 4, les valeurs mesurées sont calées sur les mesures de teneur en eau réalisées à différentes profondeurs en fin d'essai. Cependant, les capteurs TDR ont donné des valeurs manifestement trop élevées et ont été ré-étalonnés à la fin de l'essai (§ 5.3.5.5).

Ces capteurs mesurent en fait des teneurs en eau volumiques et il faut passer par les masses volumiques sèches ρ_d pour calculer les valeurs massiques correspondantes ($w = \theta \cdot \rho_w / \rho_d$, θ étant la teneur en eau volumique et ρ_w la masse volumique de l'eau). Une masse volumique sèche moyenne de $1,89 \text{ t}\cdot\text{m}^{-3}$ a été utilisée pour cette transformation ; elle correspond à celle obtenue lors du compactage de l'éprouvette.

À part les anomalies dans les mesures qui sont discutées au chapitre 4, l'allure des courbes des teneurs en eau non gelée est très vraisemblable. Les capteurs réagissent tout d'abord au forage du trou de l'endoscope, puis le capteur le plus haut (TDR 1) montre une diminution significative de la teneur en eau non gelée jusqu'à la fin du gel. Celle du capteur inférieur (TDR 2) est beaucoup plus faible, ce qui est tout à fait normal. Ensuite, lors du dégel, la teneur en eau du capteur TDR 1 augmente rapidement pour revenir approximativement aux valeurs d'avant le gel (fonte des lentilles de glace). Pour le capteur inférieur TDR 2, les valeurs de la teneur en eau pendant le dégel sont moins élevées que celles avant le gel, ce qui est explicable car, dans l'éprouvette, l'eau nécessaire à la formation des lentilles de glace a été en partie puisée sous l'isotherme 0°C .

5.3.5.5 Ré-étalonnage des capteurs TDR

Comme les valeurs mesurées pendant l'essai au moyen des capteurs TDR étaient manifestement trop élevées, un ré-étalonnage de ces capteurs a été réalisé à la fin de l'essai. La méthode suivante a été utilisée :

- Mesure de la teneur en eau volumique θ dans les billes de verre immergées (matériau de référence), au moyen des capteurs TDR 1 et TDR 2, ceci au travers de la chaîne d'acquisition de données.
- Mesure de θ dans les billes de verre, au moyen d'un capteur TDR autonome dont l'étalonnage est garanti (capteur de référence) avec affichage de la valeur sur le capteur lui-même.
- Dans un moule Proctor, mesure de θ dans le limon utilisé pour les essais, au moyen des capteurs TDR 1 et TDR 2, ceci au travers de la chaîne d'acquisition de données.
- Dans un moule Proctor, mesure de θ dans le limon utilisé pour les essais, au moyen du capteur autonome de référence.
- Établissement, par essais en laboratoire classiques, de la masse volumique et de la teneur en eau massique des billes de verre.
- Enfin, établissement, par essais en laboratoire classiques, de la masse volumique et de la teneur en eau massique de l'éprouvette de limon placée dans le moule Proctor.

Les résultats de ce ré-étalonnage font l'objet du tableau 5-20.

5-20 Essai no 3: Résultats du ré-étalonnage des capteurs TDR

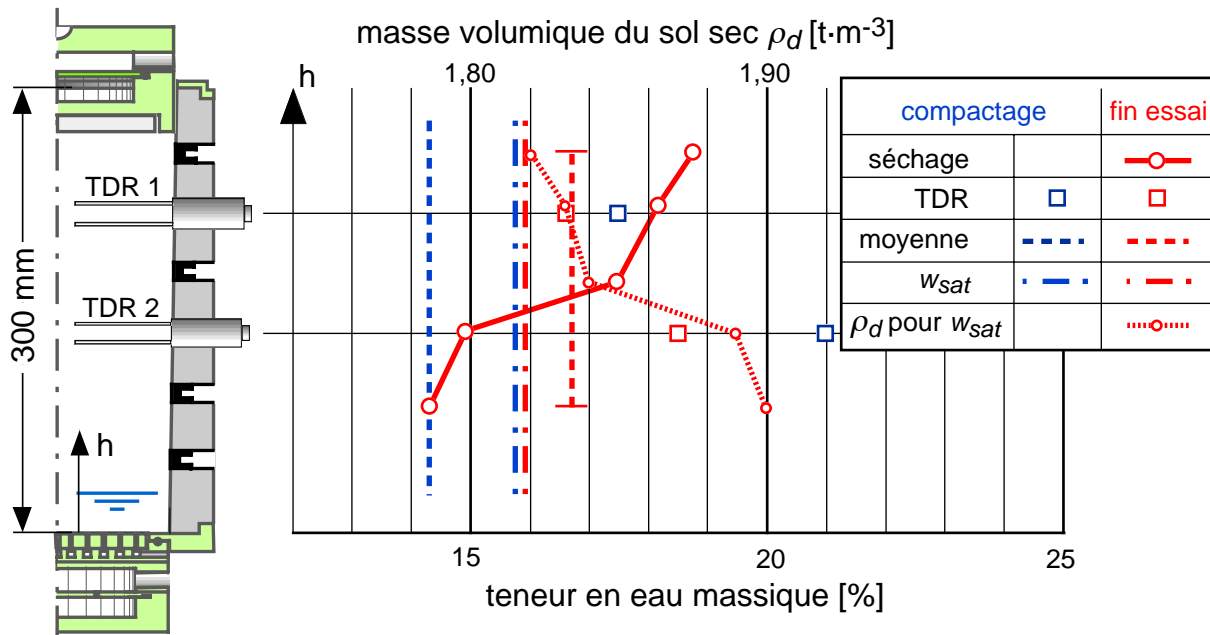
	TDR			w par θ TDR et ρ_d [%]	Laboratoire		θ par w labo et ρ_d [%]
	TDR	θ [%]	TDR_FM / TDR		ρ_d [t/m ³]	w [%]	
Billes verre	TDR_FM	35,3	1,00	22,8	1,55	23,6	36,6
	TDR 1	43,0	0,82	27,7			
	TDR 2	43,0	0,82	27,7			
Limon Proctor	TDR_FM	27,1	1,00	17,3	1,57	20,0	31,4
	TDR 1	32,0	0,85	20,4			
	TDR 2	30,0	0,90	19,1			

Dans le matériau de référence, constitué de billes de verre immergées, la teneur en eau volumique déterminée par une mesure par séchage en laboratoire (selon SN 670 340), à savoir $\theta = 36,6$ %, est très proche de celle mesurée au moyen du capteur de référence TDR_FM : 35,3. Par contre, dans le moule Proctor rempli de limon compacté, la valeur donnée par séchage est, elle, proche de celles données par les deux capteurs TDR 1 et TDR 2 !

5.3.5.6 Teneurs en eau en fin d'essai

À la fin de l'essai, cinq teneurs en eau ont été effectuées à différentes profondeurs. La figure 5-21 montre l'allure de ces teneurs en eau en fonction de la profondeur. Elle compare aussi les teneurs en eau au début et à la fin de l'essai. Elle donne en plus la variation des masses volumiques du sol sec calculées au moyen de la teneur en eau du sol saturé. On remarquera sur cette figure, comme déjà dit plus haut, que les teneurs en eau massiques données par les capteurs

TDR ne correspondent pas bien avec celles mesurées sur des éprouvettes par séchage. Par contre, la variation des masses volumiques du sol sec est très plausible et montre l'augmentation de l'indice de vide dans la zone des lentilles de glace.

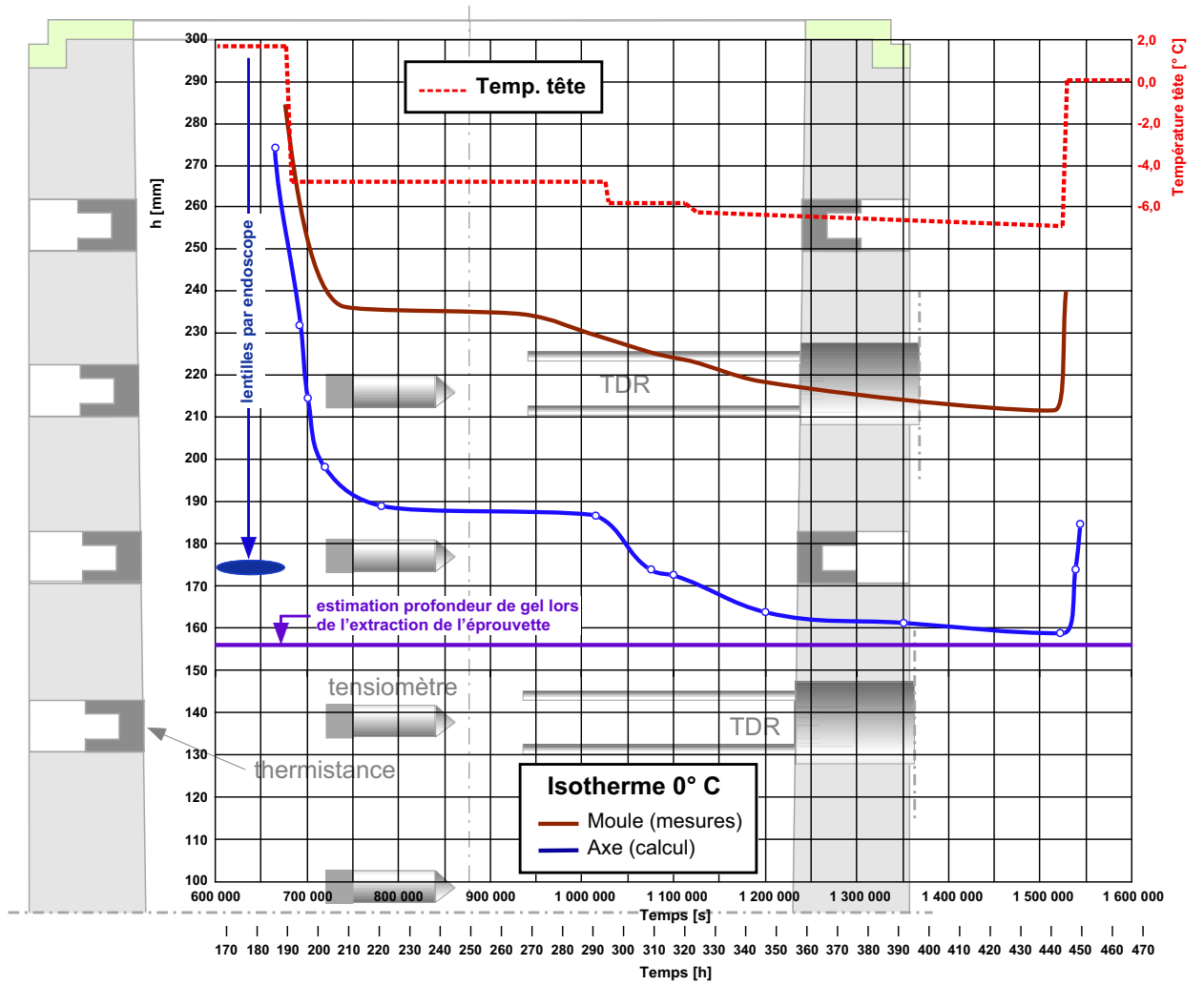


5-21 Essai no 3: Teneurs en eau après compactage et à la fin de l'essai

5.3.6 Propagation du front de gel

Les températures ne sont mesurées que sur la face intérieure du moule et les isothermes sont loin d'être horizontales. Pour cette raison, nous allons utiliser la simulation numérique (chap. 8) pour évaluer cette propagation à l'intérieur de l'éprouvette (fig. 5-22). La corrélation entre les mesures :

- de la profondeur maximale des lentilles de glace au moyen de l'endoscope et,
 - à la fin de l'essai, de la profondeur de la zone gelée lors de l'extraction du sol,
- est étonnement bonne. Il faut néanmoins souligner que le calcul de la profondeur du gel sur l'axe de l'éprouvette a été réalisé avec un modèle calé sur les mesures de la température sur l'axe de l'éprouvette réalisée lors de l'essai no 5.



5-22 Essai no 3: Progagation de l'isotherme 0° C

5.4 Essai no 4

5.4.1 But de l'essai

Il est un peu le même que celui de l'essai no 3 avec cependant des paramètres qui tiennent compte des petits problèmes rencontrés lors de l'essai no 3. Il devait surtout permettre d'examiner un peu mieux le phénomène de la fonte des lentilles de glace. Dans cet essai, le dégel est notamment beaucoup plus progressif. En outre, comme le dégel, le gel a été progressif avec une lente diminution des températures.

5.4.2 Caractéristiques de l'éprouvette

Les caractéristiques de compactage de l'éprouvette sont données sur le tableau 5-23. Elles sont presque les mêmes que pour l'essai no 3.

5-23 Essai no 4 : Caractéristiques du compactage de l'éprouvette

Essai	4
Diamètre max. des grains [mm]	2
Nombre de couches	11
Coups par couche	23
Hauteur de chute [mm]	305
Masse de la dame [kg]	4,5
Energie de compactage [$\text{MJ}\cdot\text{m}^{-3}$]	0,61
Masse volumique éprouvette ρ_d [$\text{t}\cdot\text{m}^{-3}$]	1,87
Teneur en eau de l'éprouvette [%]	14,3
Degré de saturation [-], $\rho_s = 2,70 \text{ t}\cdot\text{m}^{-3}$	0,87

5.4.3 Paramètres donnés

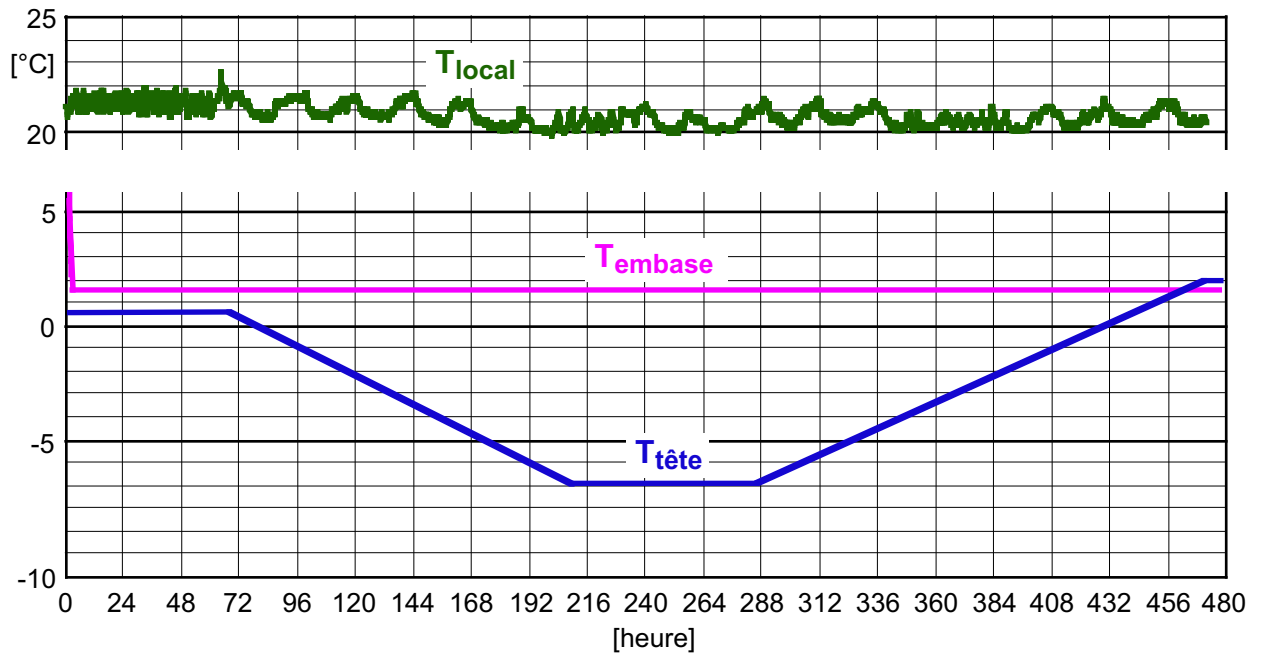
Les températures de la tête de refroidissement et de l'embase (températures mesurées), ainsi que la hauteur de la nappe phréatique, sont données sur la figure 5-24. On remarquera sur la figure 5-24 que la température du local est restée relativement stable autour d'une moyenne de 21,7° C.

5.4.4 Prises de vues avec l'endoscope

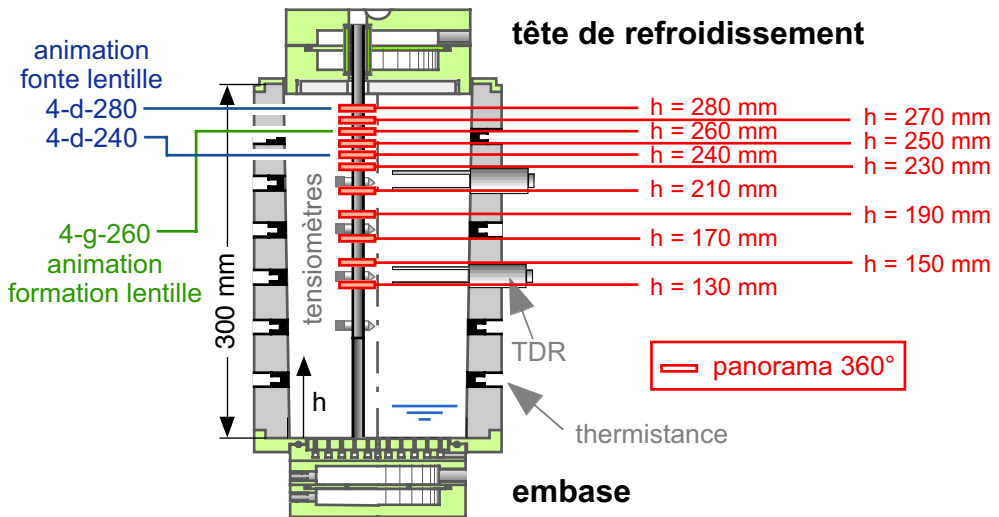
La position des panoramiques à 360° ainsi que celle des animations du gel et du dégel de lentilles de glace fait l'objet de la figure 5-25. Le panorama de la figure 5-26 montre le limon de l'éprouvette à la fin de l'accommodation. Il n'y a presque rien à voir sur cette figure ; il fallait cependant la montrer au moins une fois ! Elle montre cependant la bonne homogénéité de l'éprouvette. Sur cette figure, il manque le panorama à 270 mm ; il est cependant tout à fait comparable aux autres.

Le panorama de la figure 5-27 correspond approximativement au milieu de la période de gel (188 heures). Le gonflement de l'éprouvette est alors de 10 mm. Les premières lentilles

apparaissent à 270 et 250 mm. Les panoramas en dessous de $h=230$ ne sont plus montrés car ils sont semblables à ceux de la figure 5-26.



5-24 Essai no 4: Paramètres



5-25 Essai no 4: Niveaux des panoramas à 360° et des animations



5-26 Essai no 4: Panoramas 360° à différentes profondeurs, 65 heures après début essai (fin accommodation)



5-27 Essai no 4: Panoramas 360° à différentes profondeurs, 188 heures après début essai (milieu gel)

Le panorama de la figure 5-28 correspond au début de la rampe de dégel (288 heures). Le gonflement de l'éprouvette est alors de 17 mm. Seule la partie supérieure de l'éprouvette, où des lentilles de glace se sont formées, est montrée. Les lentilles que l'on peut voir sur cette figure ne correspondent pas à celles de la figure 5-28, car l'éprouvette a gonflé de quelque 7 mm entre ces deux prises de vue. En outre, vers $h = 250$ mm, des lentilles sont encore en cours de formation.



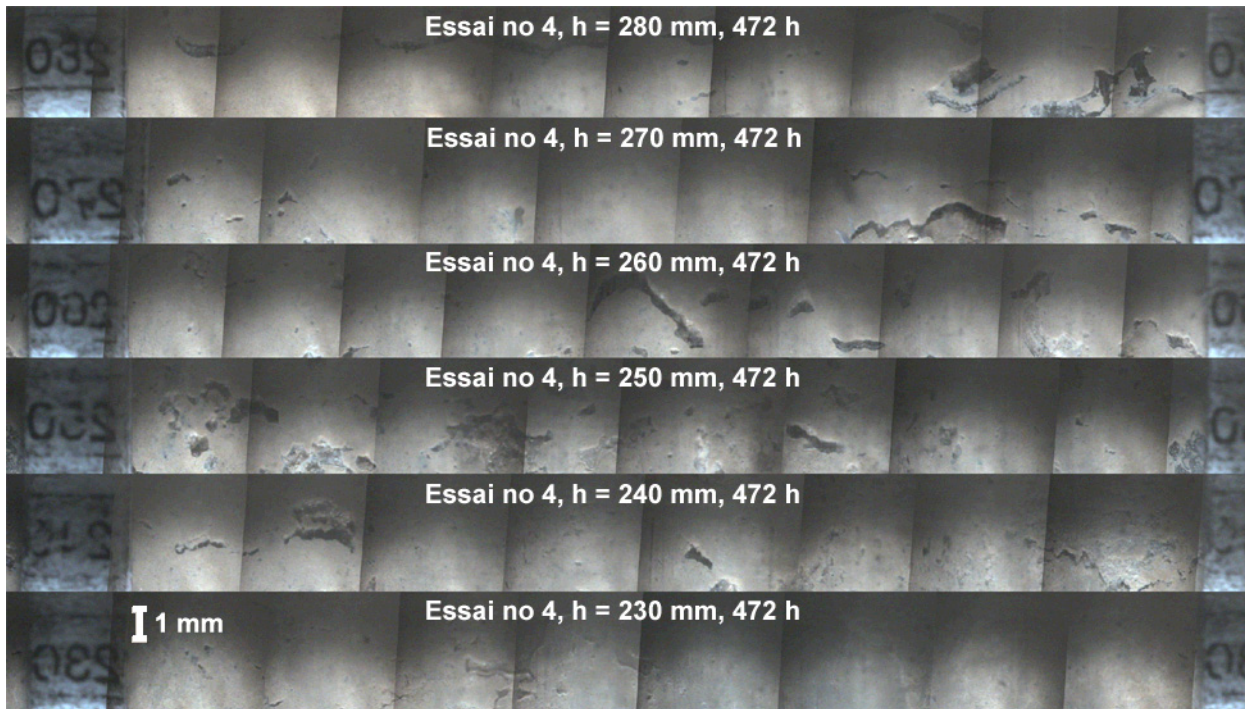
5-28 Essai no 4: Panoramas 360° à différentes profondeurs, 288 heures après début essai (début rampe dégel)

Le panorama de la figure 5-29 a été pris 430 heures après le début de l'essai, vers la fin de la rampe de dégel. Le gonflement de l'éprouvette est alors revenu à 10 mm. À ce moment, la température de la tête était de $+0,75^{\circ}\text{C}$. Un pano supplémentaire à 280 mm a été effectué, car, à ce niveau, des lentilles n'ont pas encore fondu.



5-29 Essai no 4: Panoramas 360° à différentes profondeurs, 430 heures après début essai (vers fin rampe dégel)

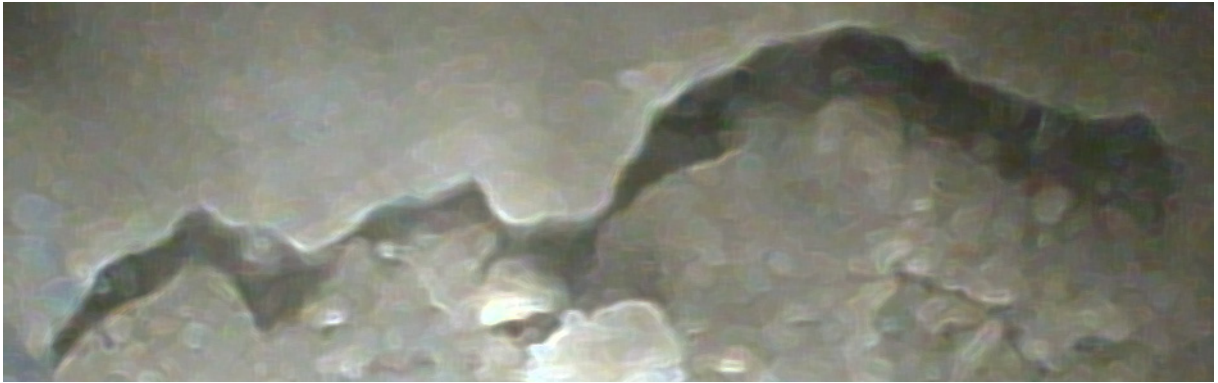
Enfin, le panorama de la figure 5-30 a été pris à la fin de l'essai (472 heures depuis le début de l'essai). À ce moment, le gonflement de l'éprouvette est revenu à 9,3 mm.



5-30 Essai no 4: Panoramas 360° à différentes profondeurs, fin de l'essai (472 heures)

Toutes les zones foncées des panoramas ne sont pas des lentilles de glace. Il est parfois difficile de distinguer une lentille d'un petit caillou (heureusement très peu nombreux dans le limon utilisé) ou d'un trou laissé par la fonte d'une lentille. Trous qui expliquent le gonflement résiduel en fin d'essai, ainsi que les teneurs en eau plus élevées dans la zone gelée. Les panoramas montrés dans ce rapport sont en quelque sorte des réductions. Ceux qui sont utilisés pour l'analyse fine des zones de l'éprouvette sont environ trois fois plus grands et, sur ces derniers, il est plus facile de discerner un trou d'une lentille. La forme concave du trou est souvent bien marquée. En outre, pendant l'essai, en bougeant latéralement le tube de l'endoscope, on voit très bien l'eau contenue dans le trou se déplacer légèrement.

La photo de la figure 5-31, prises à la fin du dégel, 450 heures après le début de l'essai à h = 280 mm, est un exemple d'une photo d'un trou laissé par une lentille fondue, photo reproduite à la dimension utilisée pour l'analyse fine.



5-31 Essai no 4: Trou laissé par une lentille fondue
Hauteur de l'image = env. 1,5 mm

Les prises de vues réalisées pendant l'essai no 4 font l'objet d'animations qui se trouvent sur le CD-Rom annexé :

Gel :

- Essai no 4. Formation lentille à $h = 260$ mm : **4-g-260-146**

Dégel :

- Essai no 4. Fonte lentille à $h = 240$ mm : **4-d-240-363**
- Essai no 4. Fonte lentille à $h = 280$ mm : **4-d-280-407**

L'animation de la formation de lentilles (4-g-260-146) montre la formation de très petites lentilles sur des discontinuités, non horizontales, dues à la préparation du matériau et à un compactage imparfait (grumeaux). Ces discontinuités sont des zones de faiblesse mécanique. Selon la théorie élémentaire, elles devraient se développer perpendiculairement à l'isotherme 0°C qui est quasiment horizontale au droit de l'endoscope. En fait, leur direction de développement est un compromis entre cette théorie et la résistance mécanique du sol. R.D. Miller (1978) l'avait déjà, dans une certaine mesure démontré.

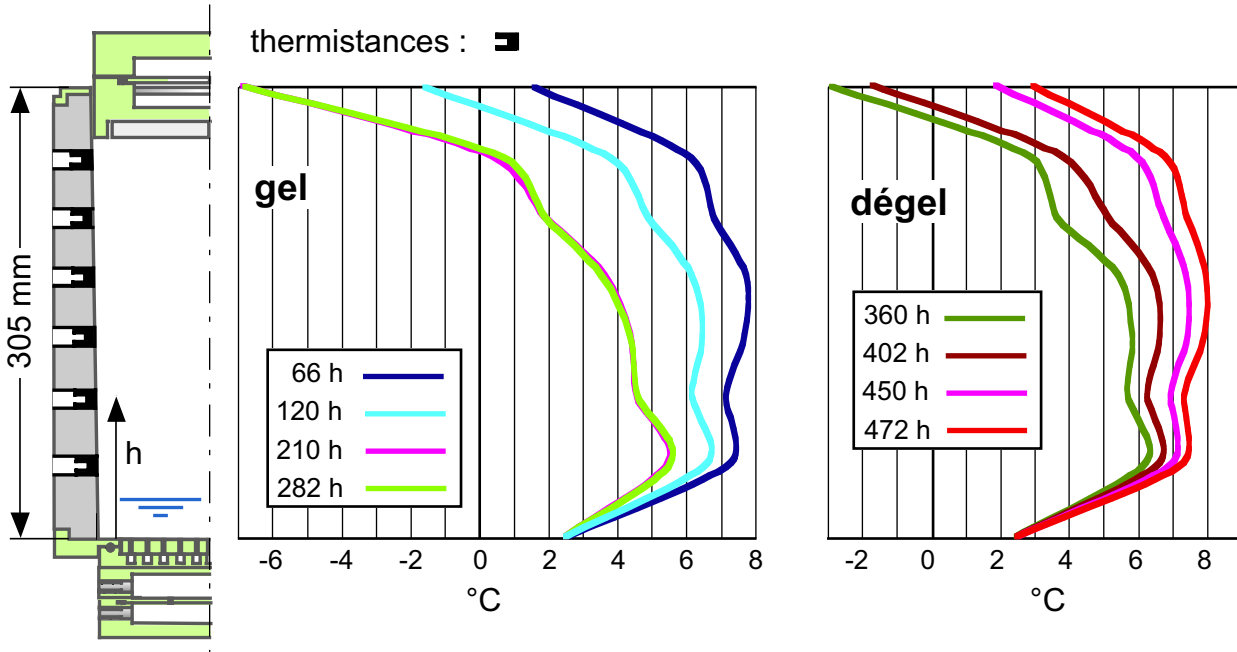
La première animation de la fonte d'une lentille (4-d-240-363) montre le début d'une fonte qui progresse du haut vers le bas. Vers la fin de l'animation, alors que la lentille n'est de loin pas encore totalement fondue, on voit un petit film (trait blanc) d'eau se former sous la lentille.

La deuxième animation de la fonte d'une lentille de glace (4-d-280-407) montre une fonte qui progresse du haut vers le bas. L'image se déplace vers le bas, ce qui signifie que d'autres lentilles sont déjà en dégel au-dessous. 3:15 heures après le début de l'animation, la partie supérieure droite de la lentille regèle curieusement et ce phénomène dure 1:15 heure. Après, le dégel se poursuit et un film d'eau important apparaît contre le tube de l'endoscope.

5.4.5 Résultats des mesures

5.4.5.1 Températures

La figure 5-32 montre, en fonction de la profondeur dans le moule, les températures mesurées avec les thermistances placées dans la paroi du moule. Les courbes sont les moyennes des mesures sur les deux axes opposés de mesure.

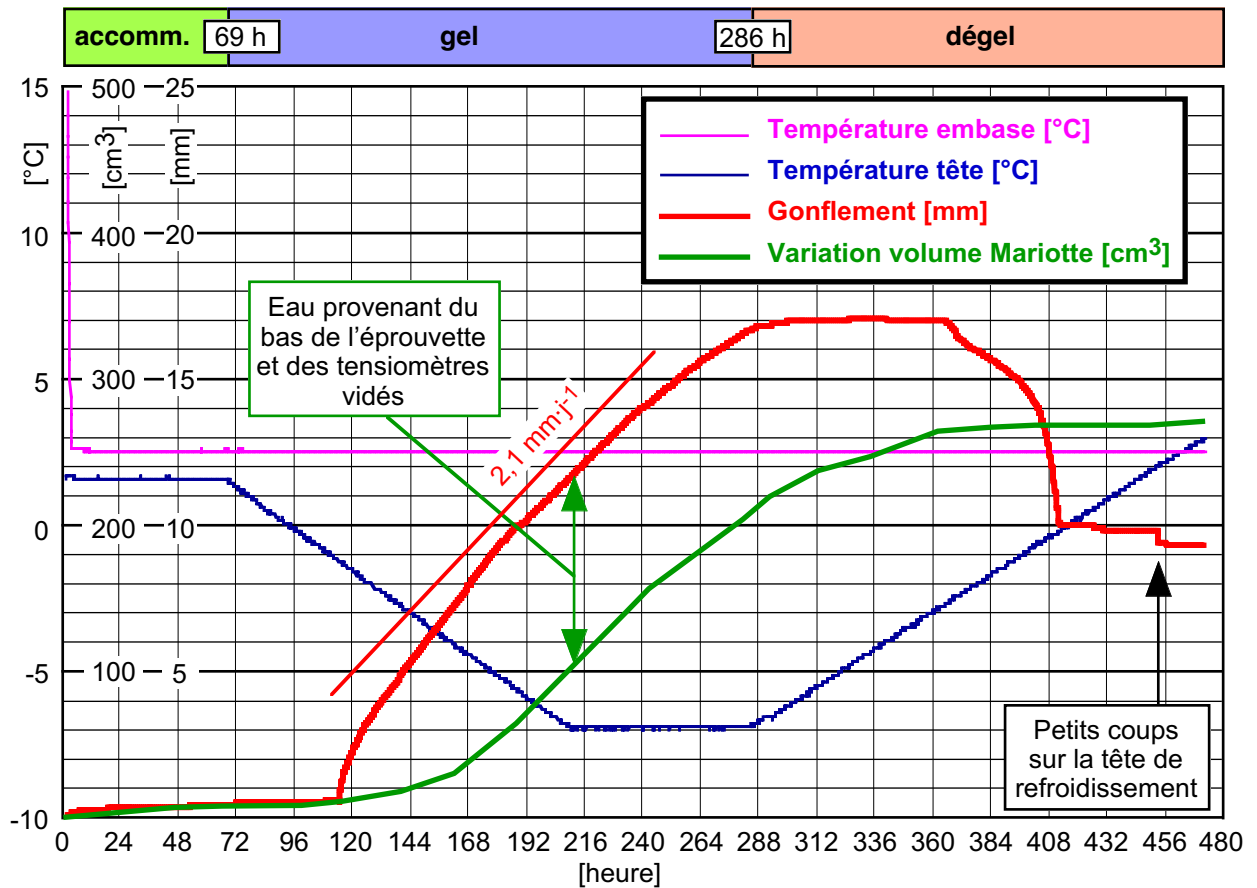


5-32 Essai no 4: Températures en fonction de la profondeur pendant le gel et le dégel

5.4.5.2 Gonflement et vase de Mariotte (fig. 5-33)

Comme cela a déjà été dit pour l'essai no 3, le gonflement mesuré en tête de l'éprouvette dénote assez exactement le volume des lentilles de glace et l'eau nécessaire à leur formation provient en grande partie de l'embase alimentée par le vase de Mariotte. La variation du volume d'eau dans le vase de Mariotte devrait donc correspondre approximativement au volume des lentilles de glace et comme la section du moule dans la zone des lentilles étant de quelque 200 cm^3 , 1 cm de gonflement devrait correspondre, approximativement, à 200 cm^3 d'eau prélevée dans le vase de Mariotte. Sur la figure 5-33, l'échelle de la variation du volume d'eau dans le vase de Mariotte et celle du gonflement correspondent approximativement : $200 \text{ cm}^3 = 10 \text{ mm}$.

Comme pour l'essai no 3, la courbe verte de la figure est cependant assez éloignée de la courbe rouge. Cela s'explique notamment par l'eau aspirée du bas de l'éprouvette vers le front de gel. Dans le cas de l'essai no 4, une petite partie de cette eau provient des tubes des tensiomètres qui se sont vidés pendant l'essai (mauvaise étanchéité entre les tubes et les vacuomètres). Le volume d'eau des quatre tubes est assez important (70 cm^3) et correspond à un gonflement de 3,5 mm.

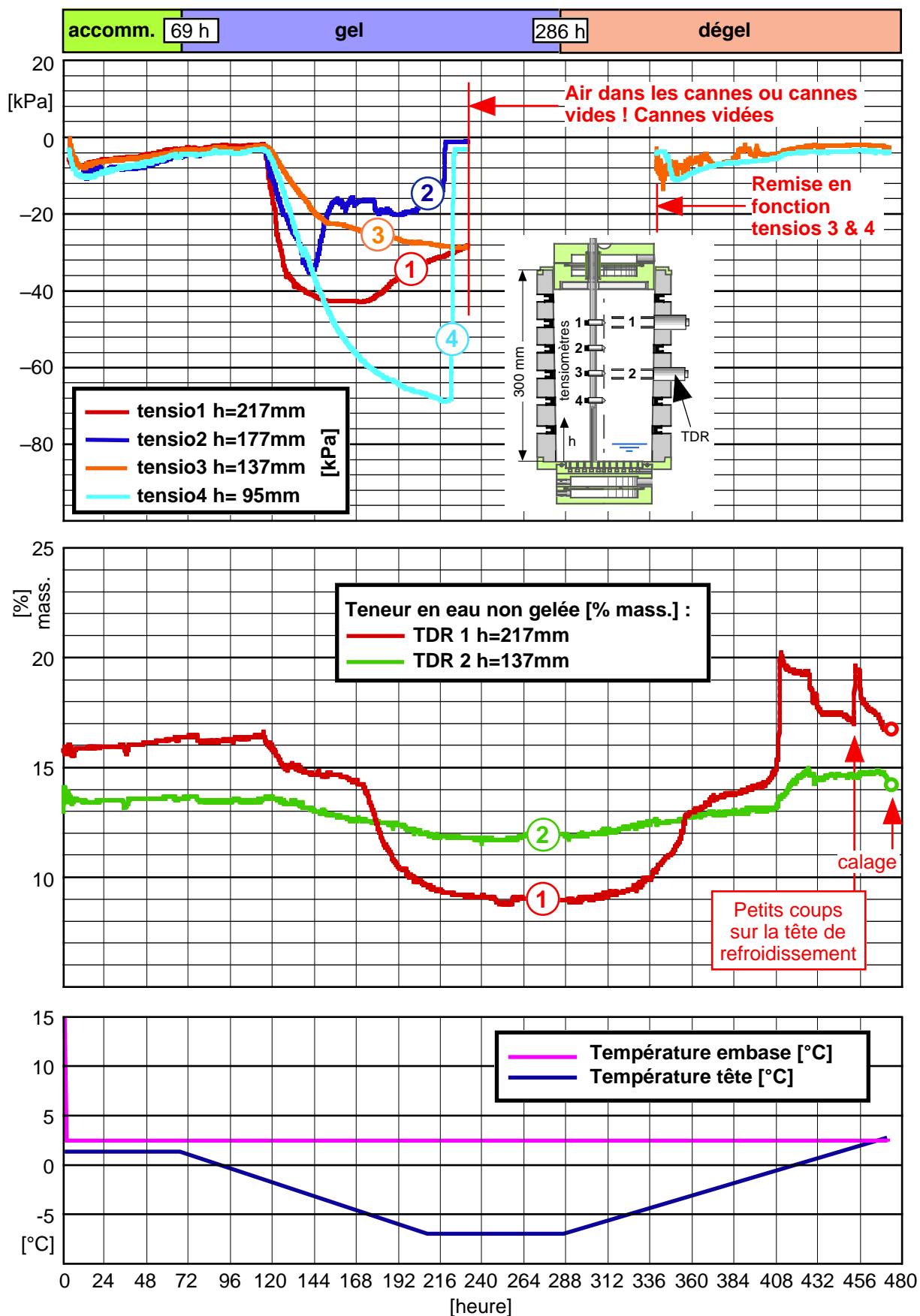


5-33 Essai no 4: Gonflement et variation volume du vase de Mariotte

5.4.5.3 Tensiomètres (haut fig. 5-34)

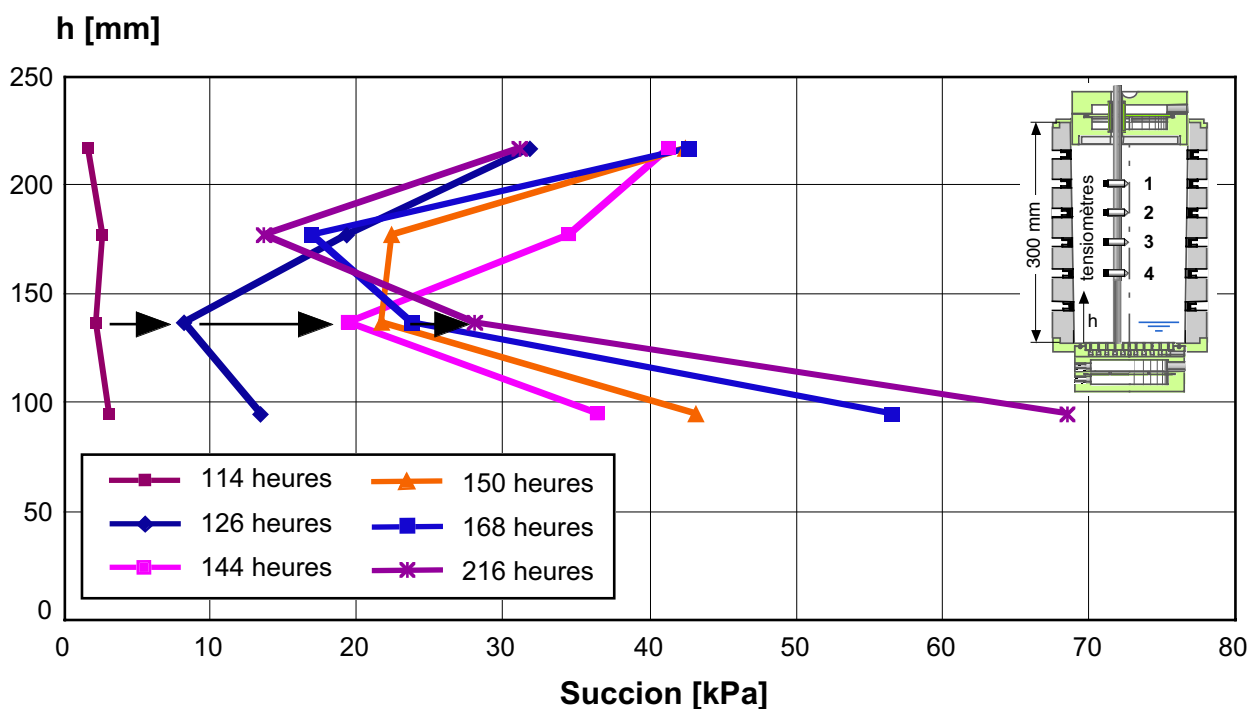
Après une légère augmentation de la pression pendant l'accommodation, les tensiomètres 1 à 3 réagissent bien dans l'ordre à l'augmentation de la succion capillaire lors de la pénétration du front de gel dans l'éprouvette, ceci jusqu'à 150 heures environ. Ensuite la mauvaise étanchéité entre les tubes des tensiomètres et les vacuomètres commence à faire son effet et se poursuit jusqu'au vidage complet des tubes. Le premier constat de ce phénomène a été fait environ 230 heures après le début de l'essai.

Quant au tensiomètre 4, le plus profond, il a un comportement complètement aberrant qui provient probablement de son extraction partielle et accidentelle vers 120 heures. La pierre poreuse est dès ce moment en contact avec l'air et non plus avec le sol. Ce défaut a été constaté lors du démontage du dispositif d'essai.



5-34 Essai no 4: Succions capillaires et teneurs en eau non gelée en fonction du temps.

La figure 5-35 montre l'allure des succions capillaires en fonction de la profondeur et à différents moments. Sur cette figure, les valeurs des tensiomètres fortement défectueux ne sont pas montrées. À 114 heures, les températures sont encore positives dans toute l'éprouvette et comme pour l'essai no 3, le régime permanent de la suction capillaire ne s'est pas encore établi. À 126 heures, après la formation des premières lentilles de glace, la suction en tête de l'éprouvette a fortement augmenté. Celle du tensiomètre le plus profond a aussi augmenté mais dans une moins forte mesure. Le même phénomène se poursuit ensuite. Les relativement faibles valeurs mesurées par le tensiomètre no 3 sont anormales et proviennent probablement de son fonctionnement un peu défectueux. Elles n'ont cependant pas été supprimées sur la figure. Après 216 heures, tous les tensiomètres sont devenus inutilisables (voir fig. 5-34).



5-35 Essai no 4: Succions capillaires en fonction de la profondeur

5.4.5.4 Teneurs en eau non gelées (partie centrale fig. 5-34)

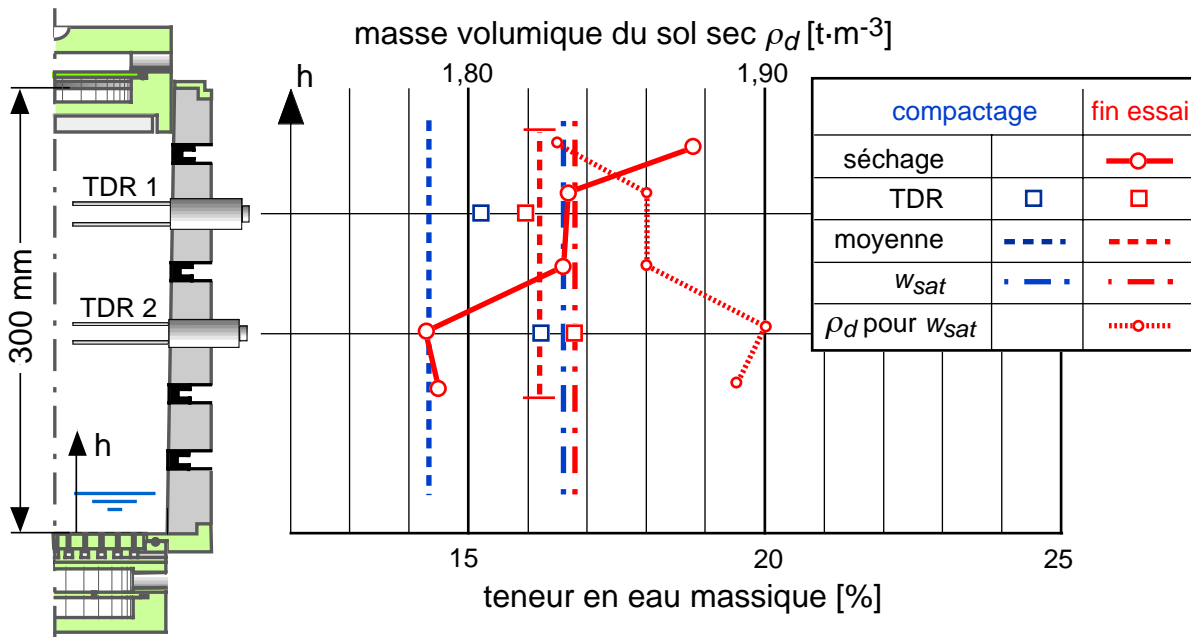
La teneur en eau est mesurée au moyen de deux capteurs TDR. Comme expliqué au chapitre 4, les valeurs mesurées sont calées sur les mesures de teneur en eau réalisées à différentes profondeurs en fin d'essai. Les valeurs données par les capteurs TDR sont très correctes (voir fig. 5-36). Cela provient probablement du fait que leurs antennes ont été enfoncées légèrement de travers (horizontalement) de façon à être le plus éloigné possible du tube de l'endoscope.

Les deux capteurs commencent à réagir en même temps que les tensiomètres (fig. 5-34), à savoir vers 120 heures. Ensuite, la valeur du capteur 1 qui se trouve dans la zone des lentilles de glace diminue de façon plus importante que celle du capteur 2 qui se trouve sous ces lentilles, dans la zone mise en plus légère dépression.

5.4.5.5 Teneurs en eau en fin d’essai

À la fin de l’essai, cinq teneurs en eau ont été effectuées à différentes profondeurs. La figure 5-36 montre l’allure de ces teneurs en eau en fonction de la profondeur et les compare avec celles au début et à la fin de l’essai.

L’allure des teneurs en eau en fin d’essai en fonction de la profondeur est conforme à la réalité du phénomène du gel et du dégel dans les sols, avec une augmentation importante de la teneur en eau dans la zone des lentilles de glace et une diminution vers le bas de l’éprouvette. La variation des masses volumiques du sol sec, calculée avec la teneur en eau du sol saturé, est, comme pour l’essai no 3, plausible et montre l’augmentation de l’indice de vide dans la zone des lentilles de glace.



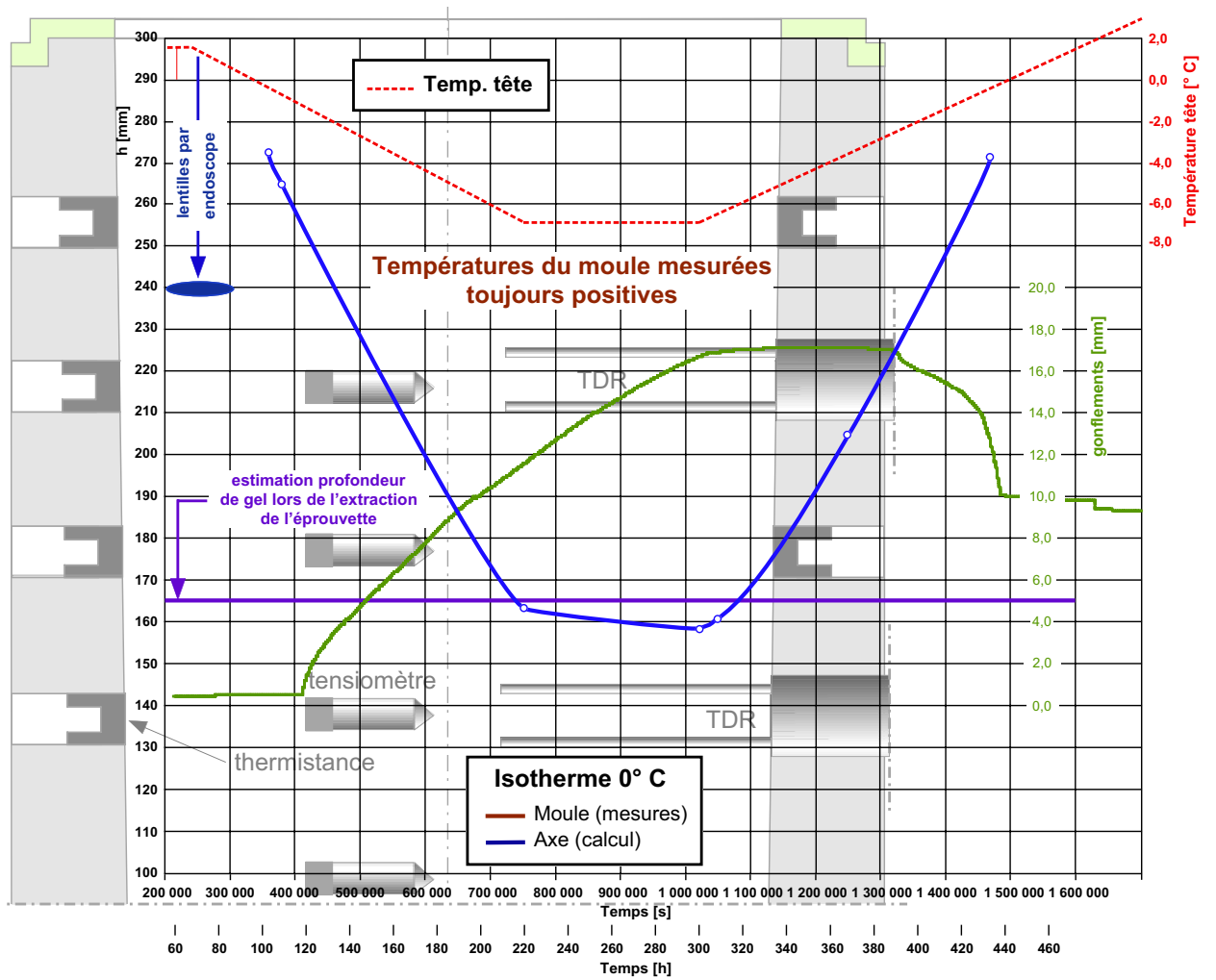
5-36 Essai no 4: Teneurs en eau après compactage et à la fin de l’essai

5.4.6 Propagation du front de gel

Comme pour l’essai no 3, la figure 5-37 a été réalisée avec les résultats de la simulation numérique de l’essai no 4 calés sur les mesures des températures sur l’axe du moule réalisées lors de l’essai no 5. La simulation numérique de la progression de l’isotherme 0° C est compatible avec la profondeur de la zone gelée mesurée lors de l’extraction du sol de l’éprouvette. Par contre, la profondeur maximale des lentilles de glace estimée au moyen des prises de vues à l’endoscope est beaucoup trop faible. La courbe des gonflements est incorporée à cette figure pour montrer qu’elle est tout à fait comparable à celles des autres essais. Que s’est-il passé ?

Le panorama de la figure 5-29 montre bien qu’il n’y a plus de lentilles au-dessous de $h = 240$ mm et si les panoramas au-dessous n’ont pas été montrés c’est qu’il n’y a vraiment plus de lentilles visibles au-dessous ! La seule explication est que, dans le volume très restreint qui

fait l'objet de l'examen à l'endoscope, il n'y a pas de lentilles. Par contre, ailleurs et au-dessous de $h = 240$ mm, des lentilles ont dû forcément se former.



5-37 Essai no 4: Progagation de l'isotherme 0° C

5.5 Essai no 5

5.5.1 But de l'essai

Le but principal de l'essai no 5 est de mesurer les températures sur l'axe de l'éprouvette avec des thermistances placées sur l'axe de l'endoscope, ceci afin de résoudre les problèmes posés par la simulation numérique. Aucune image à l'endoscope n'a donc pu être prise pendant cet essai.

Ce dispositif n'a cependant pas fonctionné correctement, et cette mesure des températures sur l'axe de l'éprouvette a été recommencée, lors de l'essai no 6, avec des thermistances mises à la place des tensiomètres.

5.5.2 Caractéristiques de l'éprouvette

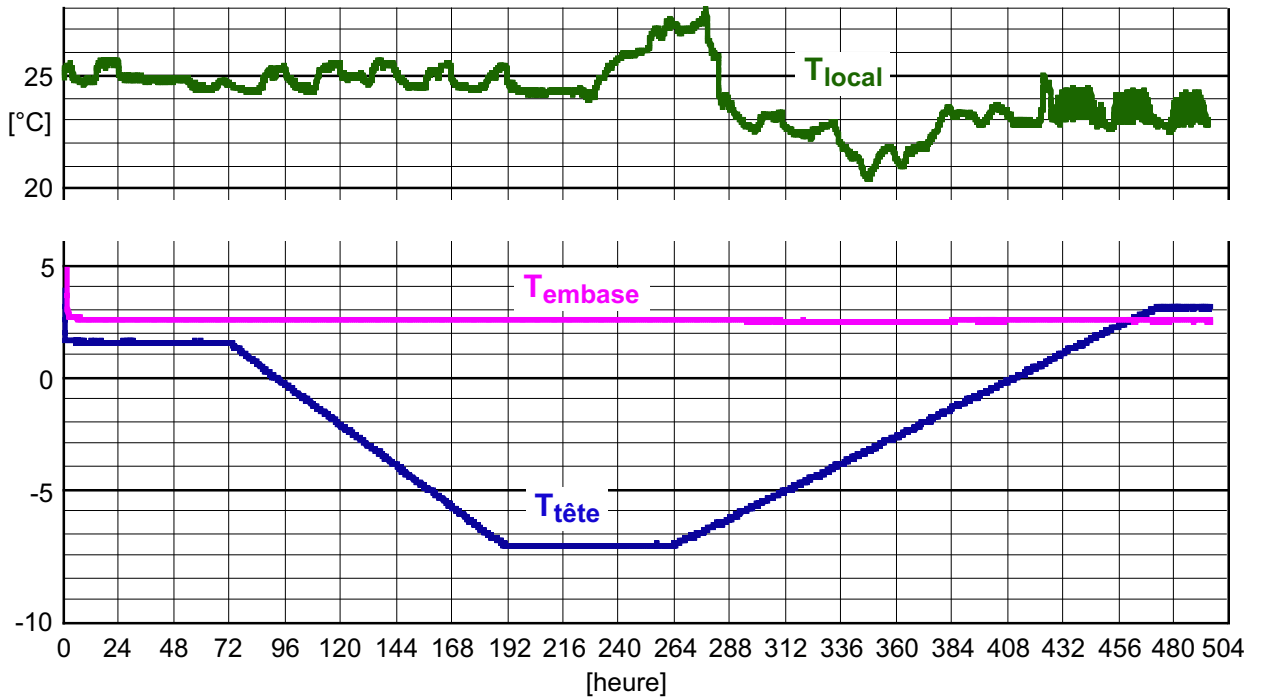
Les caractéristiques de compactage de l'éprouvette, décrites par le tableau 5-38, sont approximativement les mêmes que pour l'essai no 4.

5-38 Essai no 5 : Caractéristiques du compactage de l'éprouvette

Essai	5
Diamètre max. des grains [mm]	2
Nombre de couches	11
Coups par couche	23
Hauteur de chute [mm]	305
Masse de la dame [kg]	4,5
Energie de compactage [$\text{MJ}\cdot\text{m}^{-3}$]	0,60
Masse volumique éprouvette ρ_d [$\text{t}\cdot\text{m}^{-3}$]	1,88
Teneur en eau init. de l'éprouvette [%]	13,7
Degré de saturation [-], $\rho_s = 2,70 \text{ t}\cdot\text{m}^{-3}$	0,85

5.5.3 Paramètres donnés

Les températures en tête, sur l'embase et la température du local sont données sur la figure 5-39. Le programme du gel et du dégel est presque semblable à celui de l'essai no 4. Par rapport à ce dernier essai, la durée du gel a été légèrement diminuée.

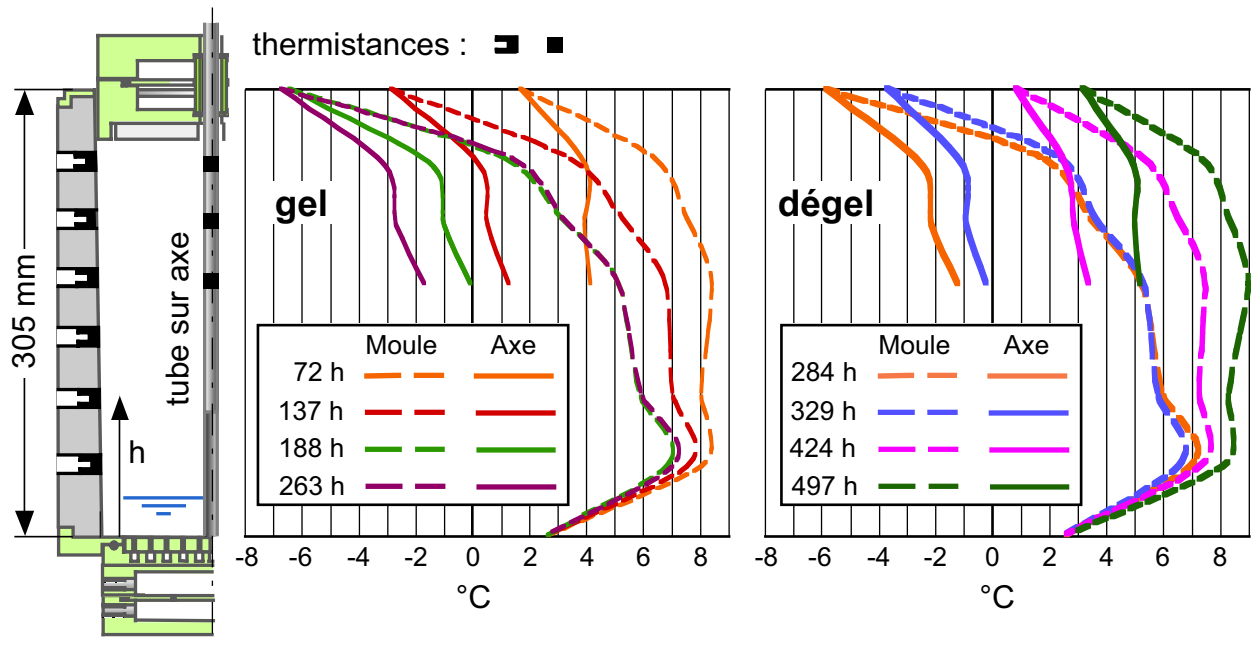


5-39 Essai no 5: Paramètres

5.5.4 Résultats des mesures

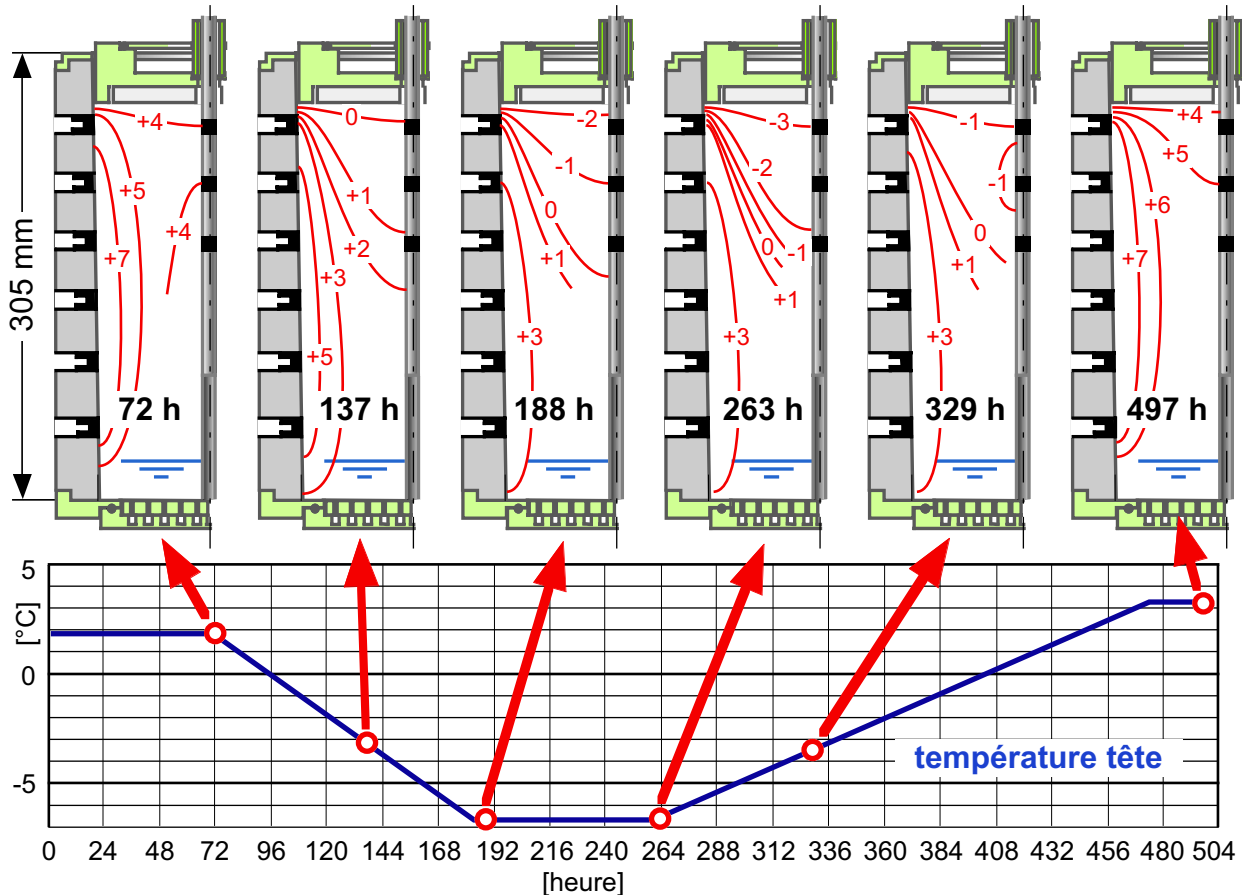
5.5.4.1 Températures (fig. 5-40)

La figure 5-40 montre, en fonction de la profondeur dans le moule, les températures mesurées avec les thermistances placées dans la paroi du moule et sur l'axe de l'éprouvette. Pour la paroi du moule, les courbes sont les moyennes des mesures sur les deux axes opposés de mesure.



5-40 Essai no 5: Températures en fonction de la profondeur pendant le gel et le dégel

La figure 5-41 montre les isothermes déterminées par la mesure des températures sur les parois du moule et par les mesures sur l'axe au moyen des trois thermistances placées dans le tube de plexiglas.



5-41 Essai no 5: Isothermes à différents moments

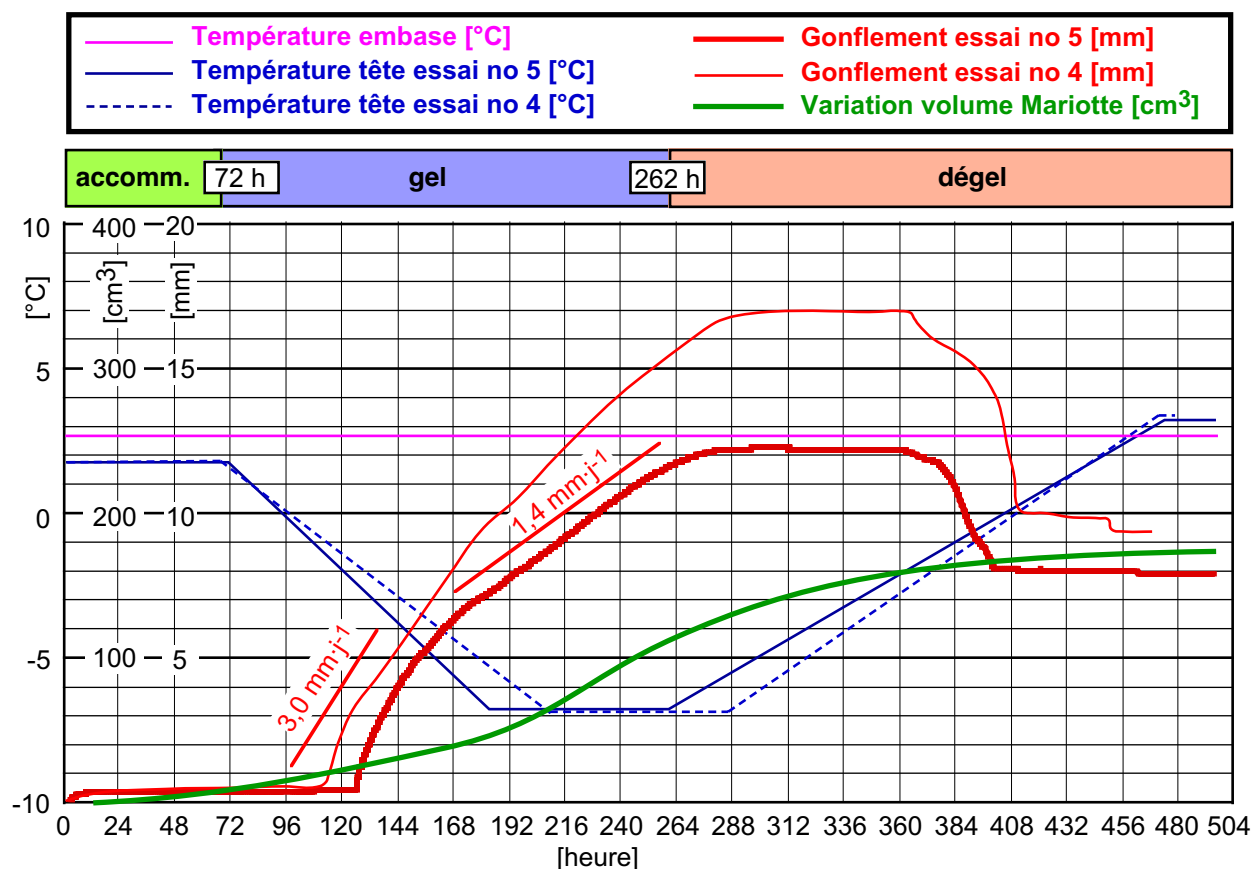
La figure 5-41 montre que malgré la double isolation du moule, les températures sur l'axe du moule sont fortement inférieures à celles qui sont mesurées sur les parois du moule. Les isothermes ne sont de loin pas horizontales ce qui influence le régime de formation des lentilles de glace qui sont très probablement concentrées au centre de la section horizontale de l'éprouvette.

Bien heureusement, les zones d'action des tensiomètres et, dans une moindre mesure, des capteurs TDR sont aussi situés au centre de l'éprouvette et les valeurs qu'ils mesurent doivent correspondre au phénomène de formation et de fonte des lentilles de glace.

5.5.4.2 Gonflement et vase de Mariotte (fig. 5-42)

En ce qui concerne le gonflement et la variation de volume d'eau dans le vase de Mariotte, on observe sur cette figure un comportement de l'éprouvette très semblable à celui de l'essai no 4. Le gonflement maximum (env. 12 mm) est cependant sensiblement moins important que celui de l'essai no 4 (env. 17 mm). Sur la figure 5-42 on voit que la durée du gel de l'essai no 4 a été un plus grande et, ainsi, un gonflement plus important est conforme à l'expérience et à la théorie qui

démontrent que la vitesse de gonflement est proportionnelle au gradient thermique. La différence entre les deux gonflements maximum est cependant un peu surprenante.

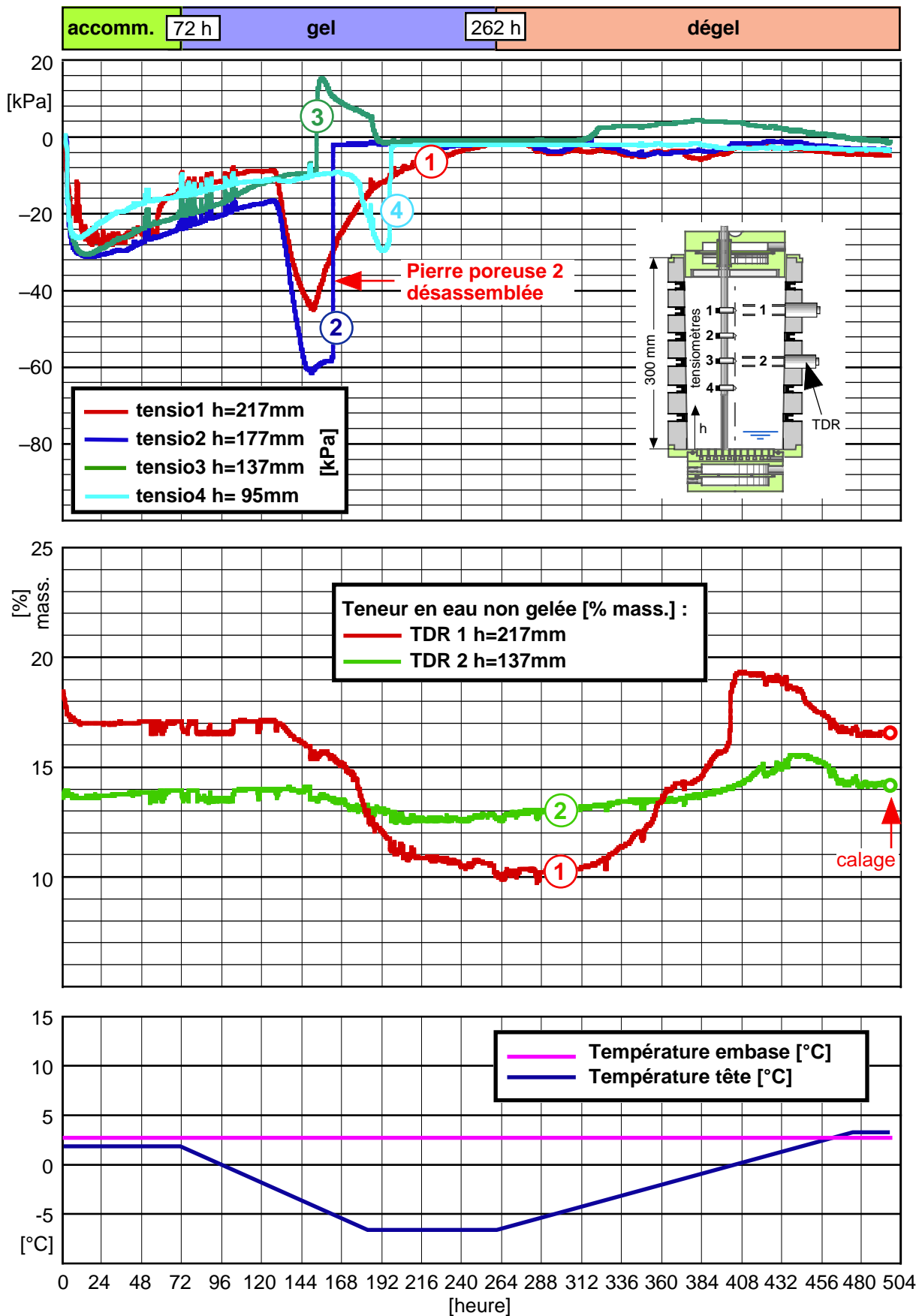


5-42 Essai no 5: Gonflement et variation volume du vase de Mariotte

5.5.4.3 Tensiomètres (haut fig. 5-43)

Au début de l'accommodation, soit juste après le placement des tensiomètres dans l'éprouvette, toutes les pressions mesurées diminuent très rapidement. Les tensiomètres sont en effet saturés lorsqu'ils sont enfilés dans l'éprouvette ; il leur faut quelque 3 heures pour atteindre leur régime d'équilibre qui est déterminé par le degré de saturation de l'éprouvette. Parallèlement, la teneur en eau de l'éprouvette augmente par aspiration de l'eau de l'embase, pour atteindre une nouvelle valeur d'équilibre vers 120 heures. À cette augmentation de la teneur en eau correspond une diminution de la succion capillaire dans tous les tensiomètres.

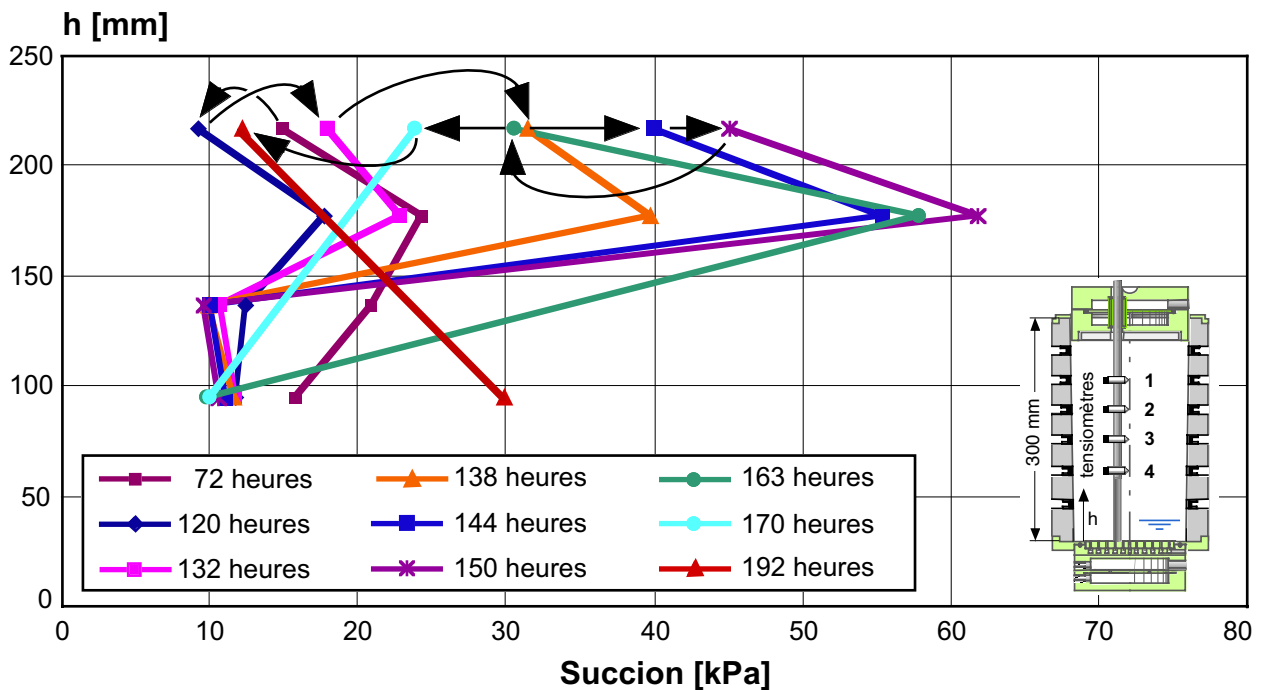
Le gel intervient ensuite. Dès ce moment, les tensiomètres 1 et 4 ont fonctionné très correctement malgré la présence d'air au sommet du tube du tensiomètre 1 ; rien d'anormal n'a été constaté sur le tensiomètre 4. La pierre du tensiomètre 2 s'est désassemblée du tube vers 160 heures et le tensiomètre 3 a connu un problème dès le début du gel dont la cause reste inconnue.



5-43 Essai no 5: Succions capillaires et teneurs en eau non gelée en fonction du temps

La figure 5-44 montre l'allure des succions capillaires en fonction de la profondeur et à différents moments. Sur cette figure, et comme pour les autres essais, les valeurs des tensiomètres fortement défectueux ne sont pas montrées.

À 72 heures, à savoir à la fin de la période d'accommodation de l'éprouvette, et si l'on excepte la valeur du tensiomètre supérieur, l'allure de la polygonale se rapproche de celle d'un régime permanent des succions au-dessus d'une nappe phréatique. À 120 heures, au début du gel, les premières lentilles font augmenter la succion mesurée par le tensiomètre supérieur. À 132 heures, cette augmentation se poursuit et l'effet de la formation des lentilles dans la partie supérieure de l'éprouvette se fait sentir jusqu'au niveau du tensiomètre le plus profond. Après 132 heures, ce dernier tensiomètre donne des valeurs plus faibles ce qui est difficilement explicable. Dès 132 heures, les valeurs mesurées par le tensiomètre supérieur sont plus faibles que celles qui sont mesurées par le tensiomètre inférieur. Comme pour l'essai no 3, cela provient probablement du fait que le tensiomètre supérieur se trouve dans la zone des lentilles et doit être gelé en partie.



5-44 Essai no 5: Succions capillaires en fonction de la profondeur
Les flèches noires indiquent la séquence des mesures.

5.5.4.4 Teneurs en eau non gelées (partie centrale fig. 5-43)

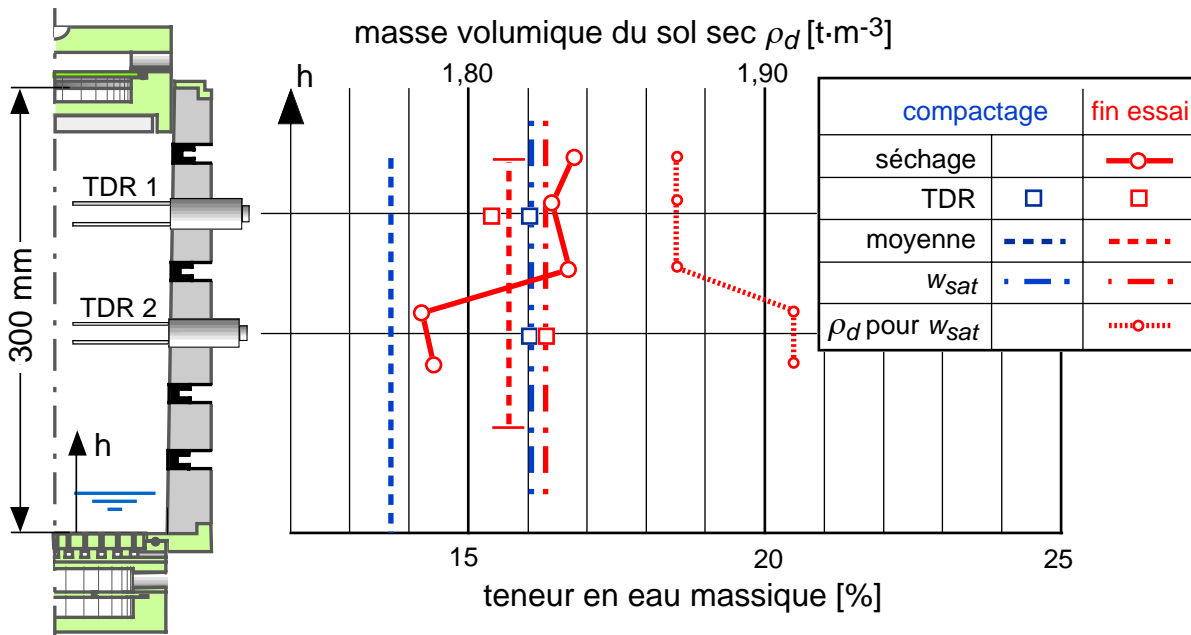
La teneur en eau est mesurée au moyen de deux capteurs TDR. Les valeurs mesurées sont calées sur les mesures de teneur en eau réalisées à différentes profondeurs en fin d'essai.

Comme pour l'essai no 4, les valeurs mesurées par les capteurs TDR sont très correctes. Cela provient aussi du fait que leurs antennes ont été enfoncées légèrement de travers (horizontalement) de façon à être le plus éloigné possible du tube de l'endoscope.

Toujours comme pour l'essai no 4, les deux capteurs commencent à réagir en même temps que les tensiomètres (fig. 5-43), à savoir vers 130 heures. Ensuite, la valeur du capteur 1, qui se trouve dans la zone des lentilles de glace, diminue de façon plus importante que celle du capteur 2 qui se trouve sous ces lentilles, dans une zone mise en plus légère dépression.

5.5.4.5 Teneurs en eau en fin d'essai (fig. 5-45)

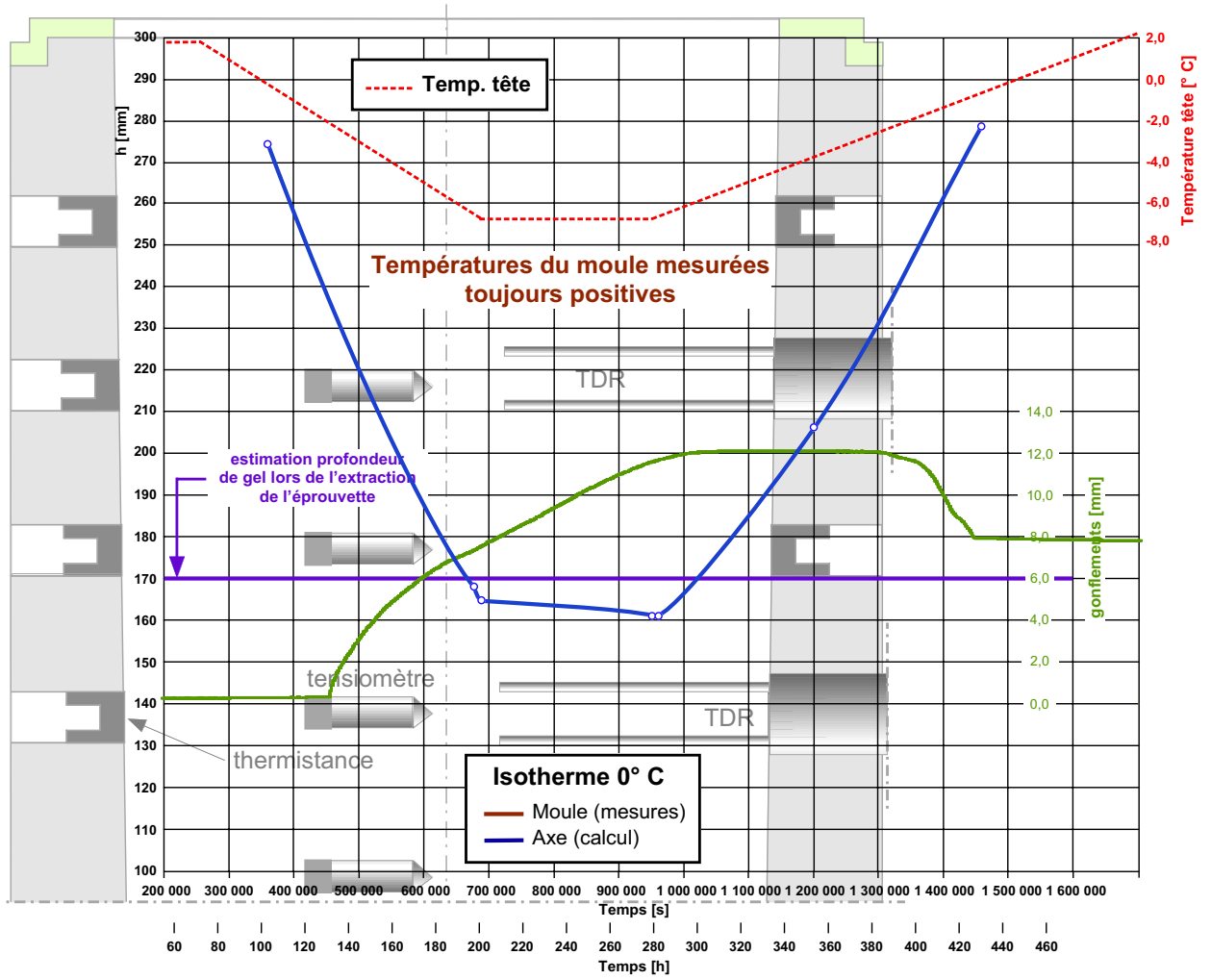
À la fin de l'essai, cinq teneurs en eau ont été effectuées à différentes profondeurs. La figure 5-45 montre l'allure de ces teneurs en eau en fonction de la profondeur et les compare avec celles des teneurs en eau au début et à la fin de l'essai. Comme pour l'essai no 4, l'allure des teneurs en eau en fin d'essai en fonction de la profondeur est conforme à la réalité du phénomène du gel et du dégel dans les sols, avec une augmentation importante de la teneur en eau dans la zone des lentilles de glace et une diminution vers le bas de l'éprouvette. La variation des masses volumiques du sol sec, calculée avec la teneur en eau du sol saturé, est, comme pour les essais no 3 et 4 plausible et montre l'augmentation de l'indice de vide dans la zone des lentilles de glace. Elle est cependant un peu brutale.



5-45 Essai no 5: Teneurs en eau après compactage et à la fin de l'essai

5.5.5 Propagation du front de gel

Comme pour les précédents essais, la figure 5-46 a été réalisée avec les résultats de la simulation numérique de l'essai no 5, elle-même calée sur les mesures des températures sur l'axe du moule. La simulation numérique de la progression de l'isotherme 0° C est compatible avec la profondeur de la zone gelée mesurée lors de l'extraction du sol de l'éprouvette. Comme l'essai no 5 a été réalisé avec des thermistances placées sur l'axe de l'éprouvette, les prises de vues à l'endoscope n'ont pu être faites ; la profondeur des lentilles de glace estimée avec cette méthode n'est ainsi pas reportée sur la figure.



5-46 Essai no 5: Progagation de l'isotherme 0° C

5.6 Essai no 6

5.6.1 But de l'essai

Le but principal de l'essai no 5 a été la mesure des températures sur l'axe de l'éprouvette au moyen de thermistances placées dans un tube de plexiglas, tube qui remplaçait le tube de l'endoscope. La modélisation numérique correspondante a cependant montré des différences notoires avec les mesures. L'essai no 6 est réalisé pour tenter de résoudre une fois pour toute ce problème. Dans cet essai, les températures sur l'axe de l'éprouvette sont mesurées par des thermistances placées sur l'axe du moule et introduites, pendant le compactage, par les orifices des quatre tensiomètres. Cet essai se fera donc sans mesure des succions capillaires.

Pour éviter tout effet parasite sur l'axe de l'éprouvette, le tube de l'endoscope n'a pas été placé sur l'axe de l'éprouvette et, ainsi, des prises de vues de la formation et de la fonte de lentilles de glace n'ont pu être réalisées.

À la fin du dégel, les résistances au cisaillement seront mesurées en fonction de la profondeur au moyen du scissomètre Geonor.

5.6.2 Caractéristiques de l'éprouvette

Elles sont quasiment les mêmes que celles de l'essai no 5 et sont décrites sur le tableau 5-47.

5-47 Essai no 6 : Caractéristiques du compactage de l'éprouvette

Essai	6
Diamètre max. des grains [mm]	2
Nombre de couches	11
Coups par couche	23
Hauteur de chute [mm]	305
Masse de la dame [kg]	4,5
Energie de compactage [$\text{MJ}\cdot\text{m}^{-3}$]	0,60
Masse volumique éprouvette ρ_d [$\text{t}\cdot\text{m}^{-3}$]	1,88
Teneur en eau init. de l'éprouvette [%]	13,7
Degré de saturation S_r [-], $\rho_s = 2,70 \text{ t}\cdot\text{m}^{-3}$	0,85

5.6.3 Paramètres donnés

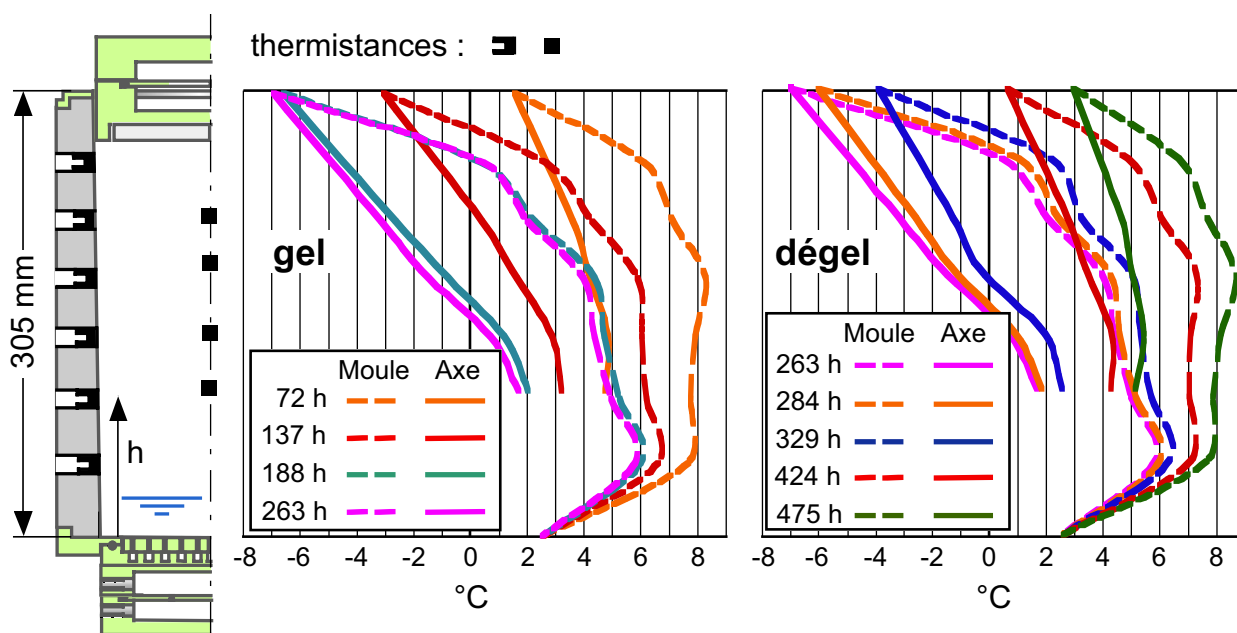
Les températures en tête et sur l'embase sont les mêmes que celles de l'essai no 5 qui sont données sur la figure 5-39. Quant aux températures du local, elles ont été beaucoup plus régulières que celles de l'essai no 5. Leur moyenne est de 22,8° C avec un écart type de 0,2° C.

5.6.4 Résultats

5.6.4.1 Températures (fig. 5-48)

La figure 5-48 montre, en fonction de la profondeur dans le moule, les températures mesurées avec les thermistances placées dans la paroi du moule et sur l'axe de l'éprouvette. Pour la paroi du moule, les courbes sont les moyennes des mesures sur les deux axes opposés de mesure. Les temps des mesures sont les mêmes que ceux de l'essai no 5 (fig. 5-40).

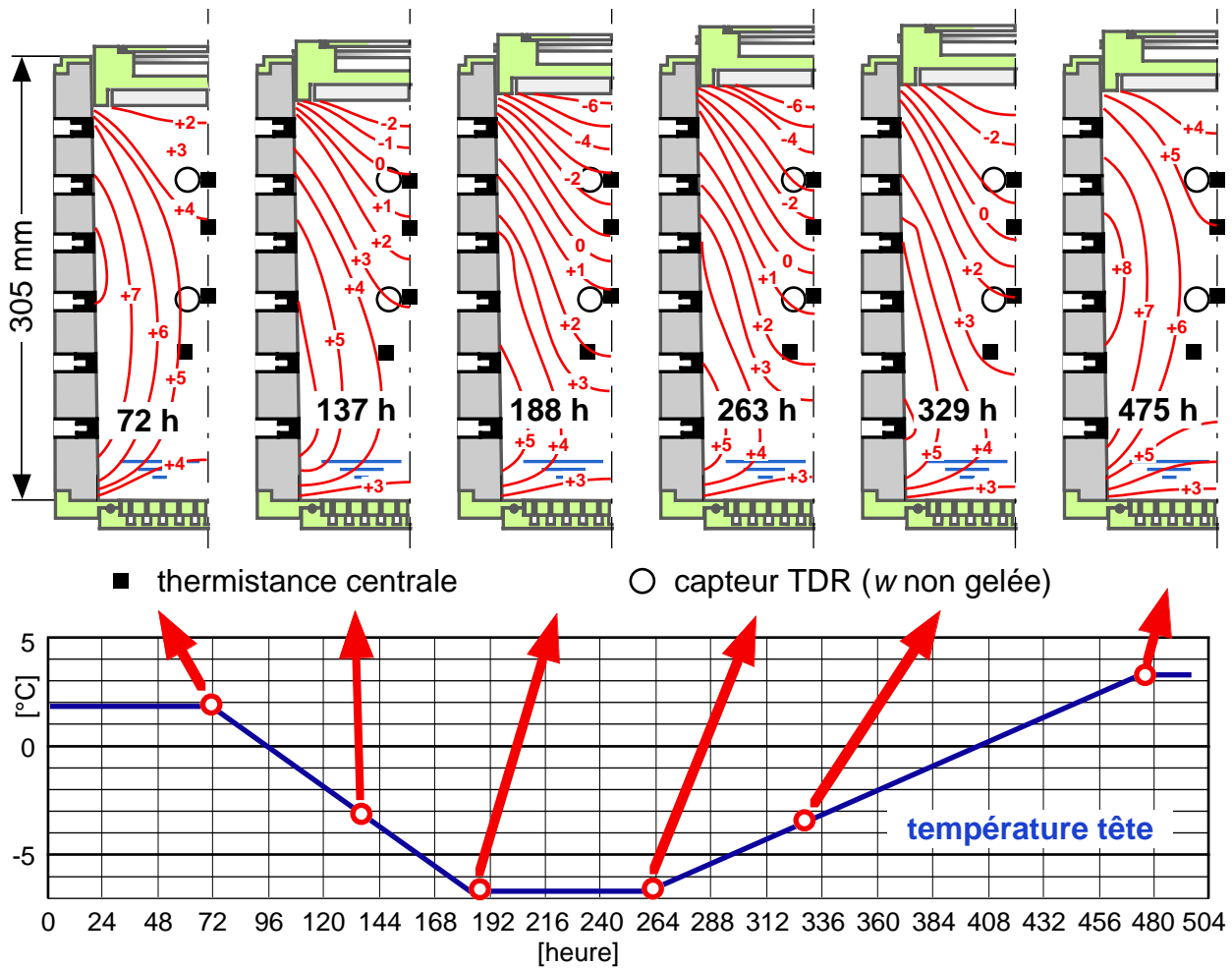
On remarque sur cette figure que la thermistance centrale la plus profonde donne des températures un peu trop froides par rapport à un gradient thermique linéaire. Cette anomalie s'explique par le désaxage de 16 mm de cette thermistance.



5-48 Essai no 6: Température en fonction de la profondeur pendant le gel et le dégel

La figure 5-49 montre les isothermes déterminées par les mesures des températures sur les parois du moule et sur l'axe de l'éprouvette au moyen de quatre thermistances remplaçant les tensiomètres. Pour réaliser cette représentation, la thermistance centrale la plus profonde (désaxée) est placée au bon endroit.

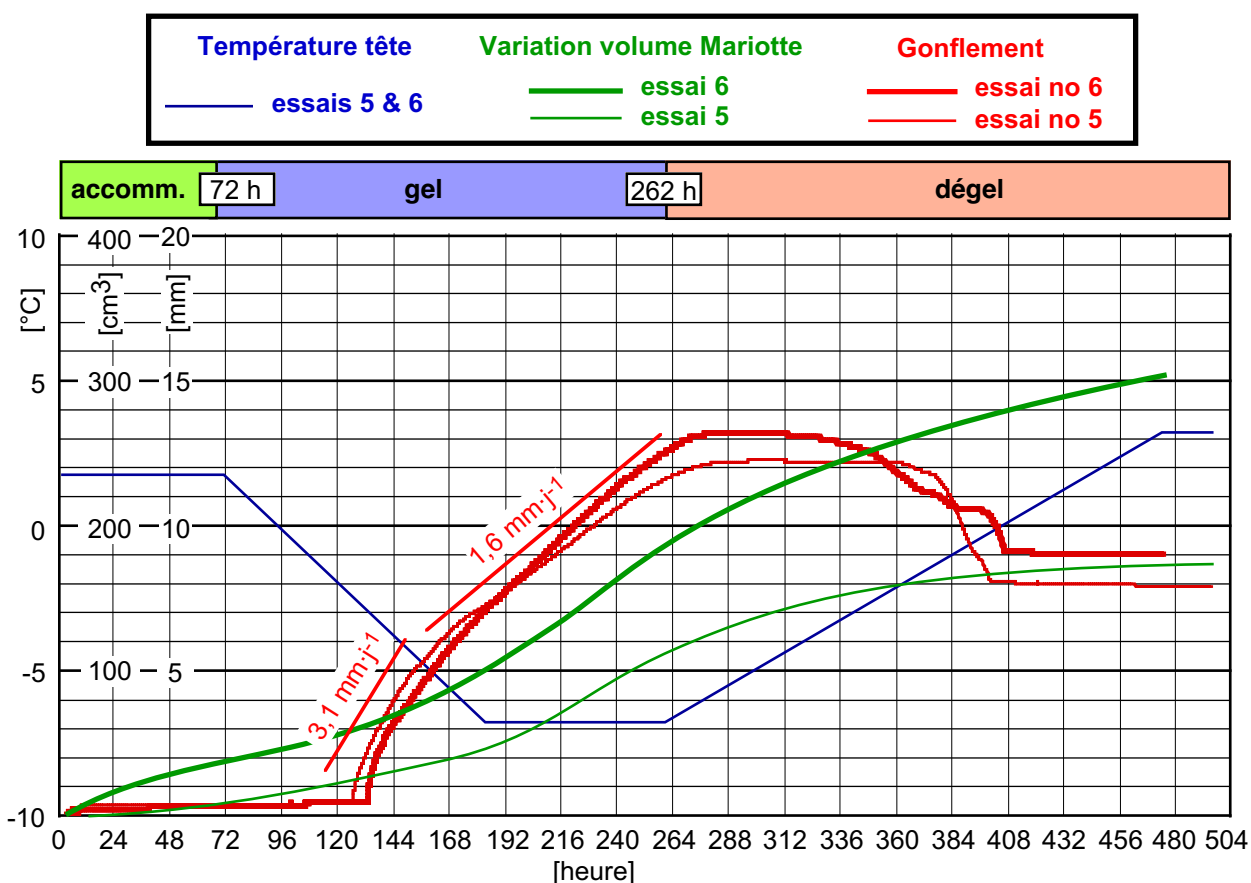
Au chapitre 8, ces isothermes obtenues avec un dispositif de mesure plus sûr que celui utilisé lors de l'essai no 5 (thermistances placées sur l'axe par les orifices des tensiomètres) seront comparées avec les résultats de la simulation numérique.



5-49 Essai no 6: Isothermes à différents moments

5.6.4.2 Gonflement et vase de Mariotte (fig. 5-50)

La figure 5-50 montre la variation du gonflement et du volume du vase de Mariotte pendant l'essai no 6 ainsi que, pour comparaison, celles de l'essai no 5 dont les températures de la tête de refroidissement sont exactement les mêmes. Si les gonflements sont tout à fait comparables, ce n'est pas le cas pour la variation du volume d'eau dans l'éprouvette mesurée par le vase de Mariotte qui est beaucoup plus importante que lors de l'essai no 5. La cause de cette différence est certainement une fuite d'eau, mais elle n'a pas pu être localisée. En fin d'essai, le bas de l'isolation extérieure était cependant localement gorgé d'eau.

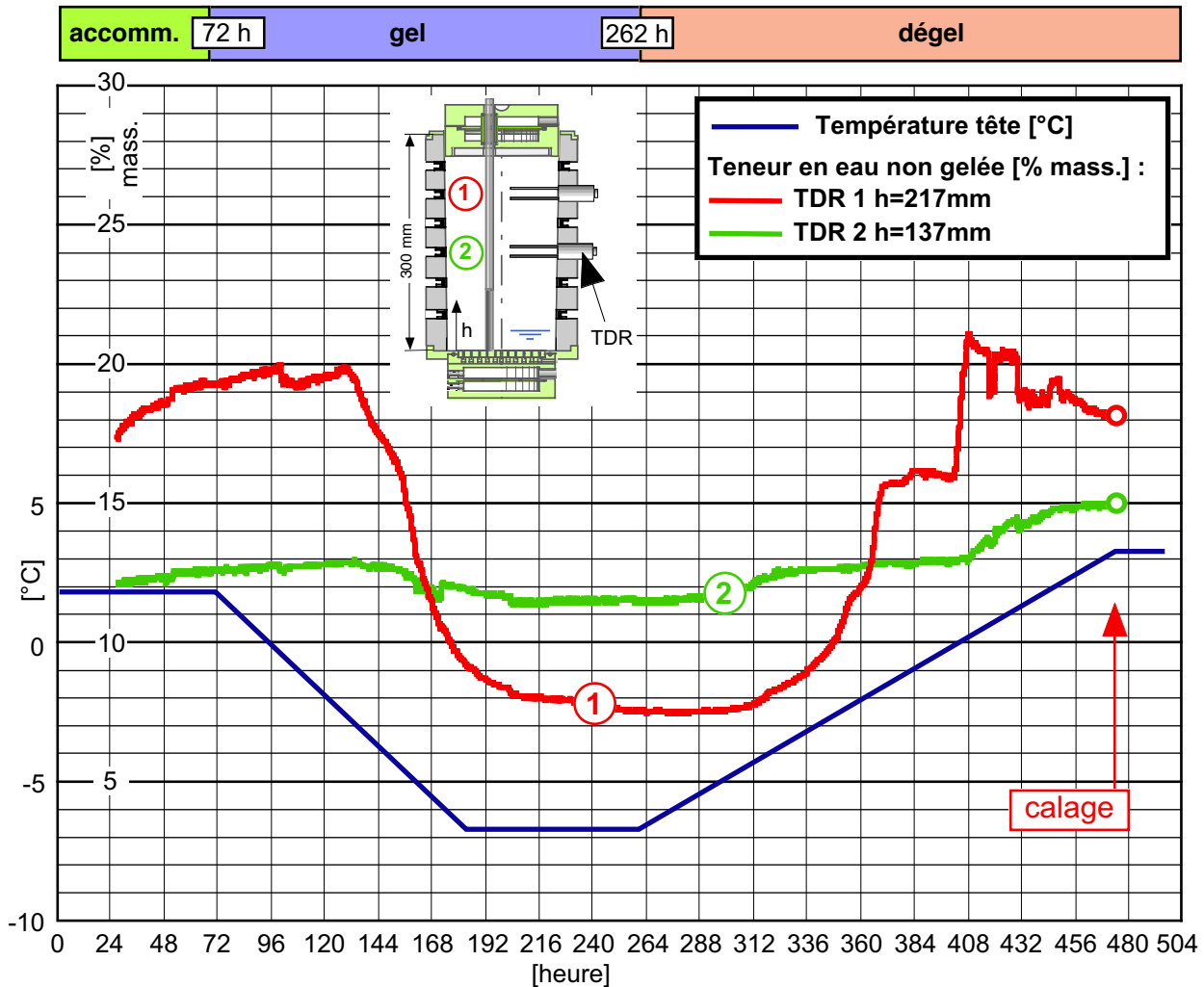


5-50 Essai no 6: Gonflement et variation volume du vase de Mariotte

5.6.4.3 Teneurs en eau non gelées (fig. 5-51)

Les valeurs mesurées sont calées sur les mesures de teneur en eau réalisées à différentes profondeurs en fin d'essai. Lors de cet essai, les deux capteurs TDR ont subi des dommages provoqués par leur enfoncement dans l'éprouvette. Les antennes se sont tordues et, lors de leur extraction, trois d'entre elles se sont même cassées. Les mesures initiales étant fortement différentes de celles qui ont été mesurées lors de l'essai no 5, elles ont été calées sur ces dernières. Il faut donc considérer les résultats montrés sur la figure 5-51 plutôt de manière qualitative que quantitative.

Pour limiter les efforts subis par les antennes lors de leur enfoncement dans l'éprouvette, un dispositif permettant la réalisation de pré-trous, avant l'enfoncement des capteurs, a été construit (voir chapitre 4).



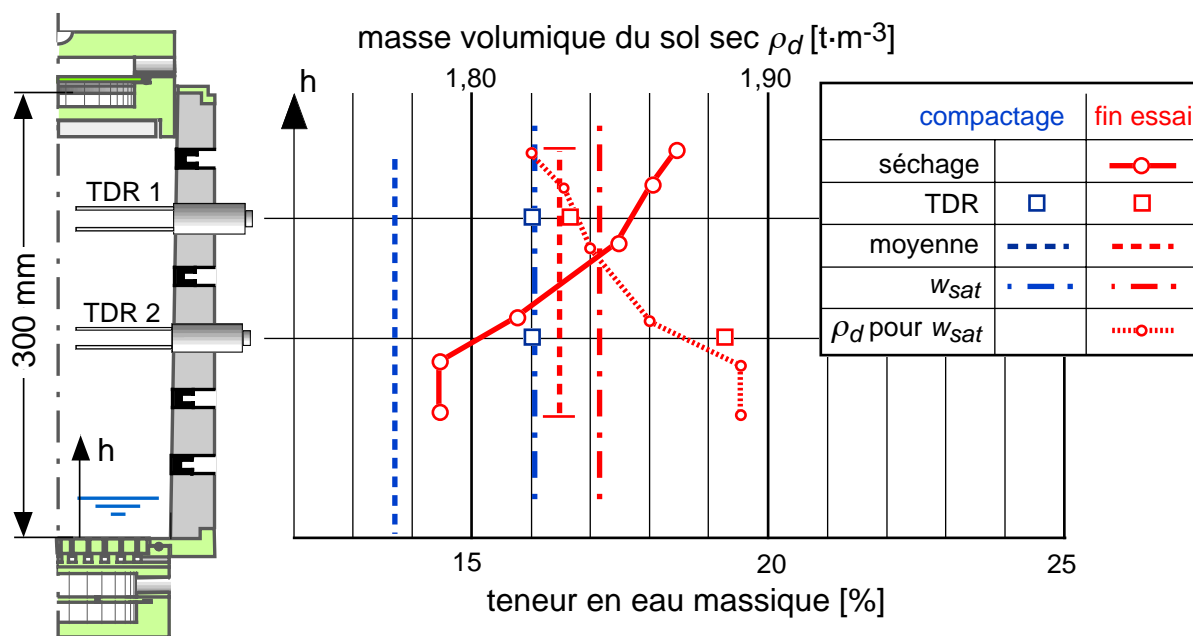
5-51 Essai no 6: Teneurs en eau non gelée mesurées par les capteurs TDR

5.6.4.4 Teneurs en eau en fin d'essai (fig. 5-52)

À la fin de l'essai, 6 teneurs en eau ont été effectuées à différentes profondeurs. La figure 5-52 montre la variation de ces teneurs en eau en fonction de la profondeur et les compare avec celles obtenues au début de l'essai.

Comme pour les essais no 4 et no 5, l'allure des teneurs en eau en fin d'essai en fonction de la profondeur est conforme à la réalité du phénomène du gel et du dégel dans les sols, avec une augmentation importante de la teneur en eau dans la zone des lentilles de glace et une diminution vers le bas de l'éprouvette.

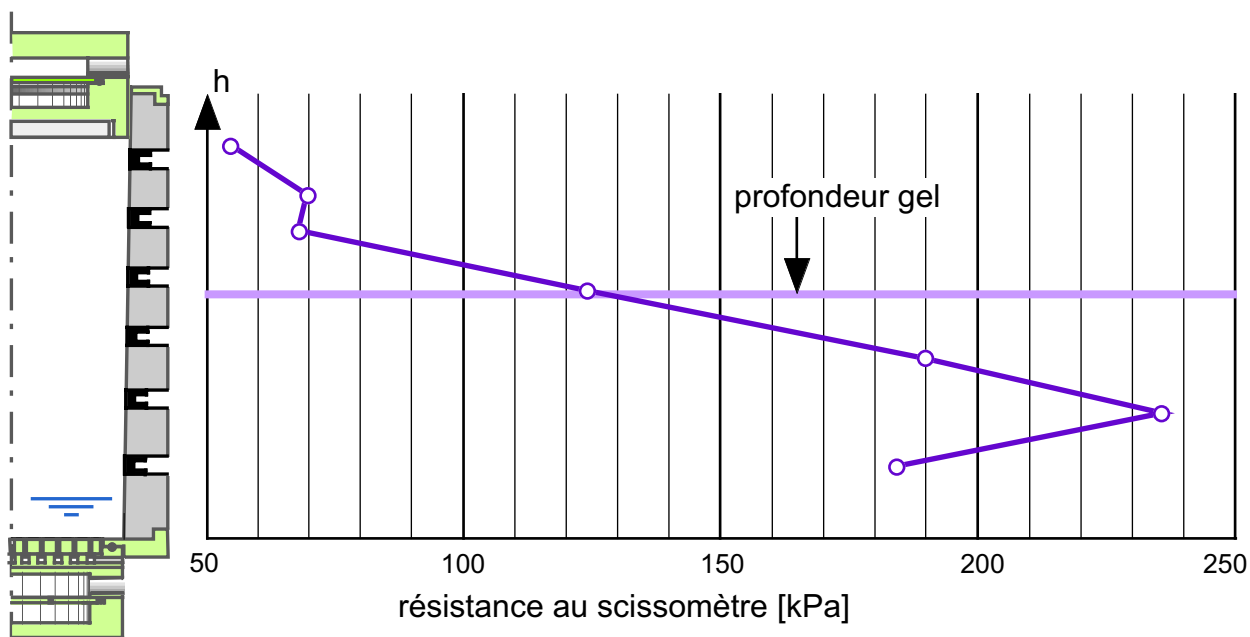
La variation des masses volumiques du sol sec, calculée avec la teneur en eau du sol saturé, est, comme pour les essais no 3 à 5 plausible et montre l'augmentation progressive de l'indice de vide dans la zone des lentilles de glace. La différence entre les teneurs en eau saturées moyennes après le compactage et en fin d'essai est importante. Il en est de même de la teneur en eau, ce qui est logique.



5-52 Essai no 6: Teneurs en eau après compactage et à la fin de l'essai

5.6.4.5 Résistance au cisaillement (fig. 5-53)

A la fin de l'essai, les résistances au cisaillement en fonction de la profondeur ont été mesurées avec un scissomètre Geonor H-60.



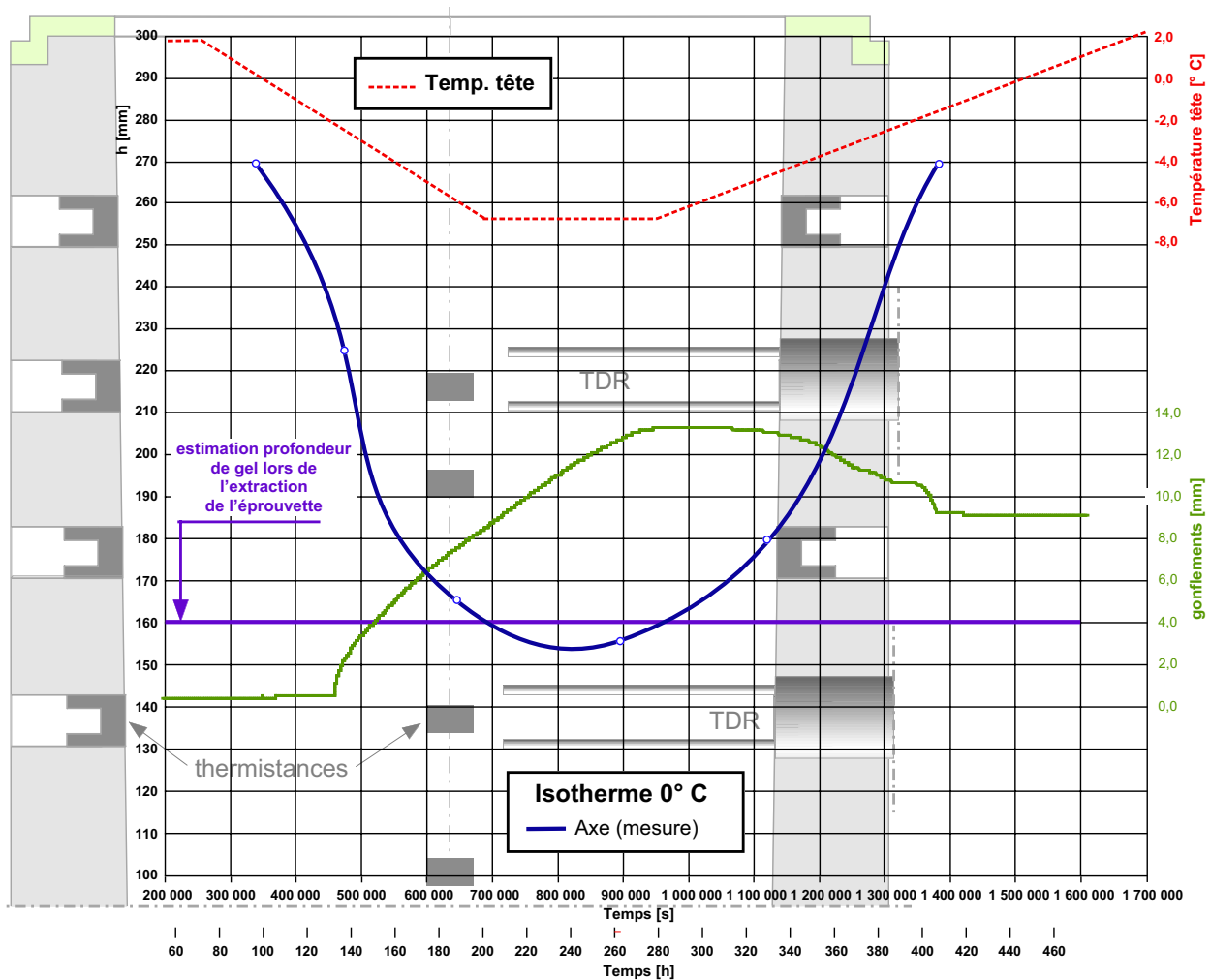
5-53 Essai no 6: Résistance au cisaillement en fin d'essai

Cette mesure, réalisée pour la première fois à l'occasion de cet essai, est intéressante car elle permet une quantification de la résistance au cisaillement dans la zone des lentilles de glace juste après leur fonte et sa comparaison avec les résistances de la zone non gelée. Dans l'éprouvette compactée avec une énergie de 0,6 MJ·m⁻³ et confinée latéralement dans son moule, les valeurs

mesurées sont très élevées et il faut surtout apprécier le rapport de ces résistances entre la zone gelée et celle non gelée.

5.6.5 Propagation du front de gel (fig. 5-54)

À la différence des essais précédents, la figure 5-54 a été réalisée avec les résultats des mesures des températures sur l'axe de l'éprouvette, et non pas avec les résultats d'une simulation numérique. La progression de l'isotherme 0° C est compatible avec la profondeur de la zone gelée mesurée lors de l'extraction du sol de l'éprouvette. Comme l'essai no 6 a été réalisé sans le tube de l'endoscope, des prises de vues de lentilles de glace n'ont pu être faites ; la profondeur des lentilles de glace estimée avec cette méthode n'est ainsi pas reportée sur la figure.



5-54 Essai no 6: Propagation de l'isotherme 0° C

5.7 Essai no 7

5.7.1 But de l'essai

Son seul but, un peu particulier, est la mesure du régime permanent des suctions capillaires dans l'éprouvette avant le gel pendant la phase d'accommodation. L'éprouvette a été préparée pour être utilisée par la suite pour l'essai no 8. En fait, les essais no 7 et 8 auraient dû être réalisés sous la presse et permettre la mesure des déformations de l'éprouvette au moyen des billes de plombs et de photos aux rayons X. Cependant, un retard très important dans la construction des derniers dispositifs nécessaires à ces mesures a conduit à la réalisation de ces deux essais sans la presse. Ce sont donc des essais supplémentaires. Ils ont nonobstant permis de très intéressantes observations.

5.7.2 Caractéristiques de l'éprouvette

Elles sont quasiment les mêmes que celles de l'essai no 6 et sont données dans le tableau 5-55.

5-55 Essai no 7 : Caractéristiques du compactage de l'éprouvette

Essai	7
Diamètre max. des grains [mm]	2
Nombre de couches	11
Coups par couche	23
Hauteur de chute [mm]	305
Masse de la dame [kg]	4,5
Energie de compactage [$\text{MJ}\cdot\text{m}^{-3}$]	0,60
Masse volumique éprouvette ρ_d [$\text{t}\cdot\text{m}^{-3}$]	1,86
Teneur en eau init. de l'éprouvette [%]	14,5
Degré de saturation S_r [-], $\rho_s = 2,70 \text{ t}\cdot\text{m}^{-3}$	0,87

5.7.3 Paramètres donnés

Comme pour les autres essais, la température initiale en tête a été fixée à $1,6^\circ\text{C}$ et celle sur l'embase à $2,6^\circ\text{C}$. Ces températures sont restées constantes pendant tout l'essai. Quant aux températures du local, elles ont été régulières avec une moyenne de $22,8^\circ\text{C}$ et un écart type de $0,5^\circ\text{C}$, ceci excepté un épisode d'environ 24 heures (vers 500 heures) pendant lequel la température du local est montée jusqu'à $26,6^\circ\text{C}$.

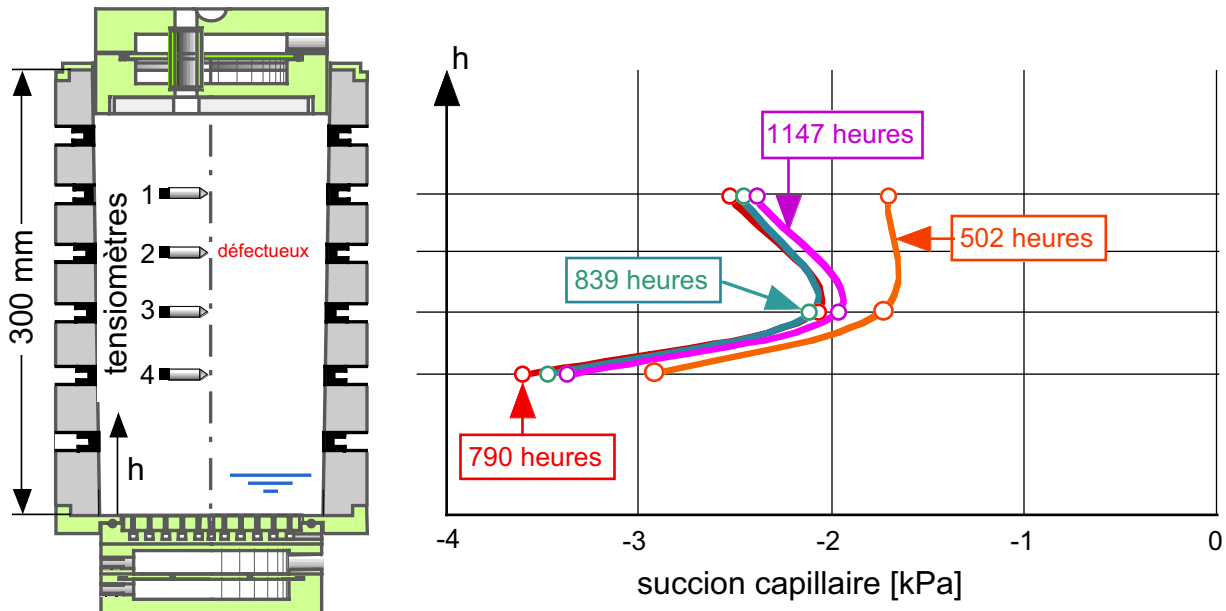
5.7.4 Résultats

5.7.4.1 Succion capillaire (fig. 5-56)

D'une façon générale, si le gradient des tensions capillaires entre les tensiomètres no 1 et 3 est conforme à ce que l'on pouvait attendre, les valeurs données par le tensiomètre no 4 sont, pour une raison incompréhensible (mauvais placement du tensiomètre ?) beaucoup trop faibles.

508 heures (environ 21 jours) après le début de l'essai, le régime permanent des tensions capillaires n'est pas encore atteint. Il commence à s'établir à 790 heures.

Entre les tensiomètres no 1 et 3, le gradient est d'environ $4,5 \text{ kPa}\cdot\text{m}^{-1}$. Lors des essais en vraie grandeur dans la halle fosses d'Écublens (Dysli, 1991), pour un sol très semblable, les gradients correspondants étaient d'environ $10 \text{ kPa}\cdot\text{m}^{-1}$ pour des conditions de température un peu similaire.



5-56 Essai no 7: Succions capillaires en fonction du temps et de la profondeur

5.7.4.2 Teneur en eau non gelée (fig. 5-57)

Seule la teneur en eau mesurée par le capteur TDR no 1 ($h = 217 \text{ mm}$), à savoir le moins profond, est montrée. Les deux autres capteurs TDR ayant été détruits lors de l'essai no 6 et pas encore remplacés, la mesure au niveau du capteur TDR no 2 n'a pu être réalisée. Comme pour les autres mesures de teneur en eau au moyen des capteurs TDR (voir explication au chapitre 4), elle a été calée sur la mesure de la teneur en eau pendant le compactage.

Cette figure montre, comme avec les tensiomètres, que le régime permanent à l'intérieur de l'éprouvette n'est atteint qu'à partir de quelque 500 heures après le début de l'essai.

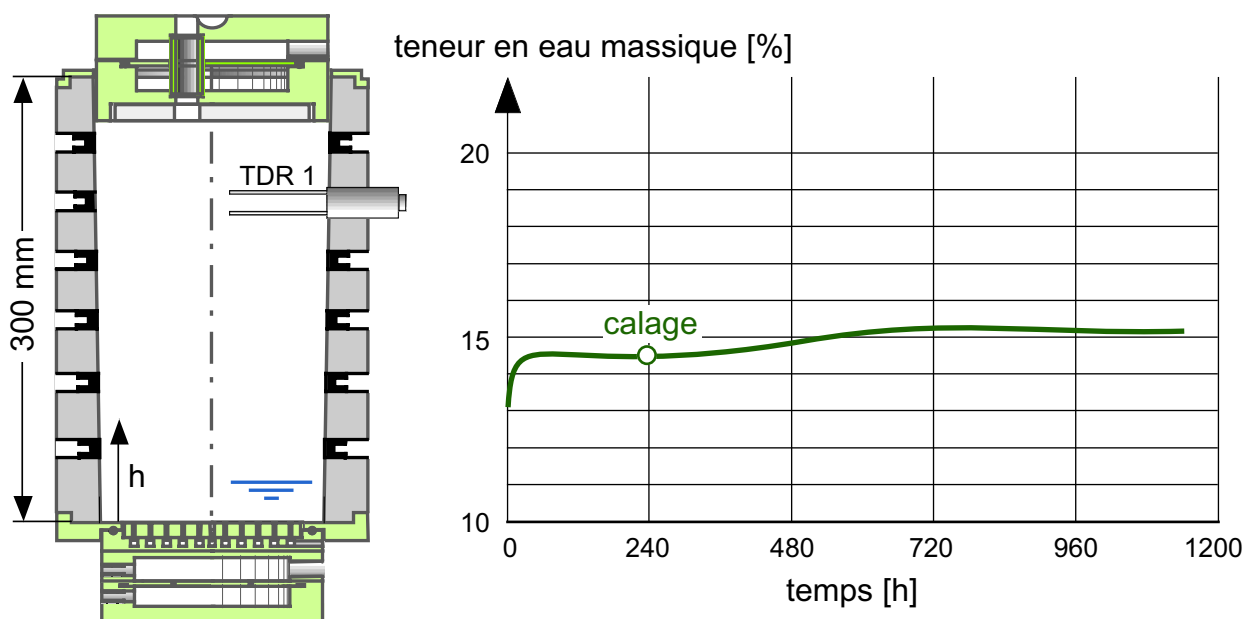
5.7.4.3 Vase de Mariotte

L'essai no 7 a permis de se faire une bonne idée de la variation du volume d'eau dans le vase de Mariotte en régime adiabatique pendant la phase d'accommodation, à savoir pendant l'imbibition de l'éprouvette. Cette mesure sera un des éléments importants du bilan des masses discuté au chapitre 7.

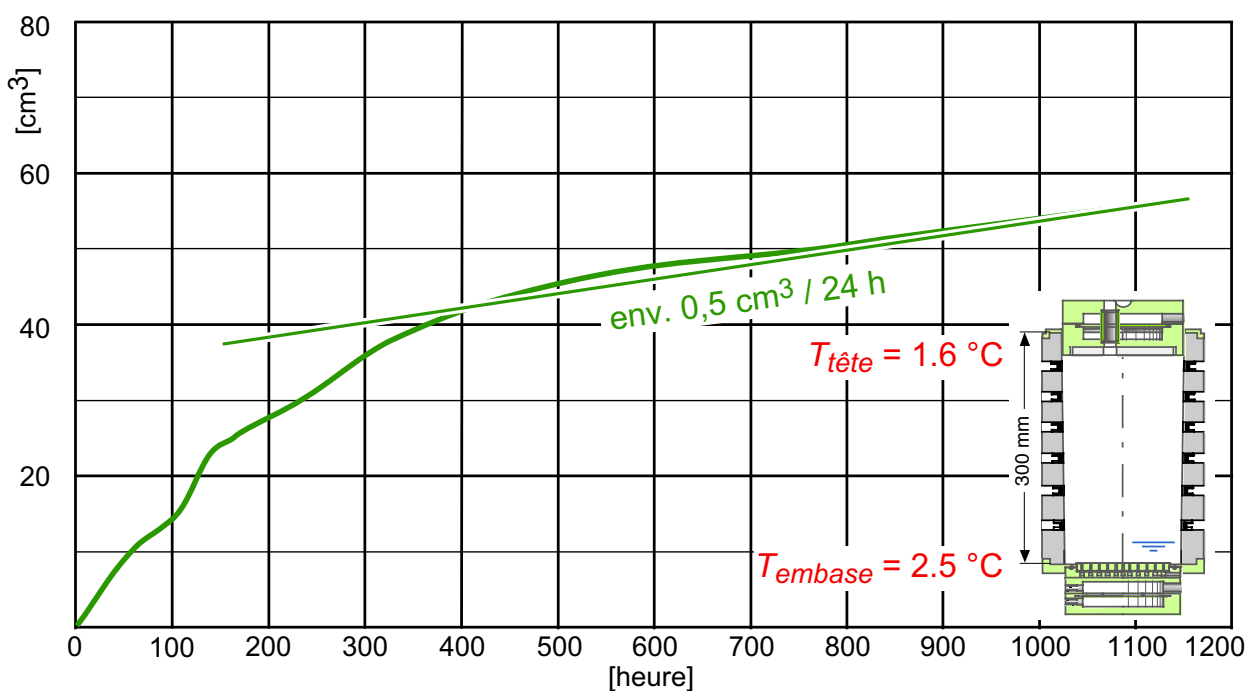
La figure 5-58 montre qu'au début de l'essai, à savoir jusqu'à environ 400 heures (17 jours), de l'eau est aspirée par l'embase pour établir le régime correspondant aux succions permanentes, décrit par la figure 5-56, qui n'est pas obtenu lors du compactage de l'éprouvette. Ensuite, le

débit, presque constant, est d'environ $0,5 \text{ cm}^3 / 24 \text{ heures}$. Il correspond à l'évaporation en tête de l'éprouvette et, éventuellement, à des pertes non définies.

La figure 5-57 montre, qu'au niveau du capteur TDR 1, l'augmentation de la teneur en eau, devant correspondre au volume d'eau aspiré déduction faite du volume évaporé, est d'environ 0,5 % massique (0,9 volumique). En admettant que cette augmentation est constante sur une demi-hauteur de l'éprouvette et qu'elle ne concerne que cette dernière, elle détermine un volume d'eau de quelque 24 cm^3 à comparer aux quelque 30 cm^3 mesurés.



5-57 Essai no 7: Teneur en eau en fonction du temps à $h = 137 \text{ mm}$.



5-58 Essai no 7: Variation volume d'eau dans vase de Mariotte pendant l'imbibition.

5.8 Essai no 8

5.8.1 But de l'essai

Cet essai avait deux buts :

- Créer des lentilles de glace de grandes épaisseurs de façon à pouvoir étudier leur dégel, notamment par des prises de vues au moyen de l'endoscope.
- Étudier l'effet d'un réchauffement de l'éprouvette suivi d'un refroidissement.

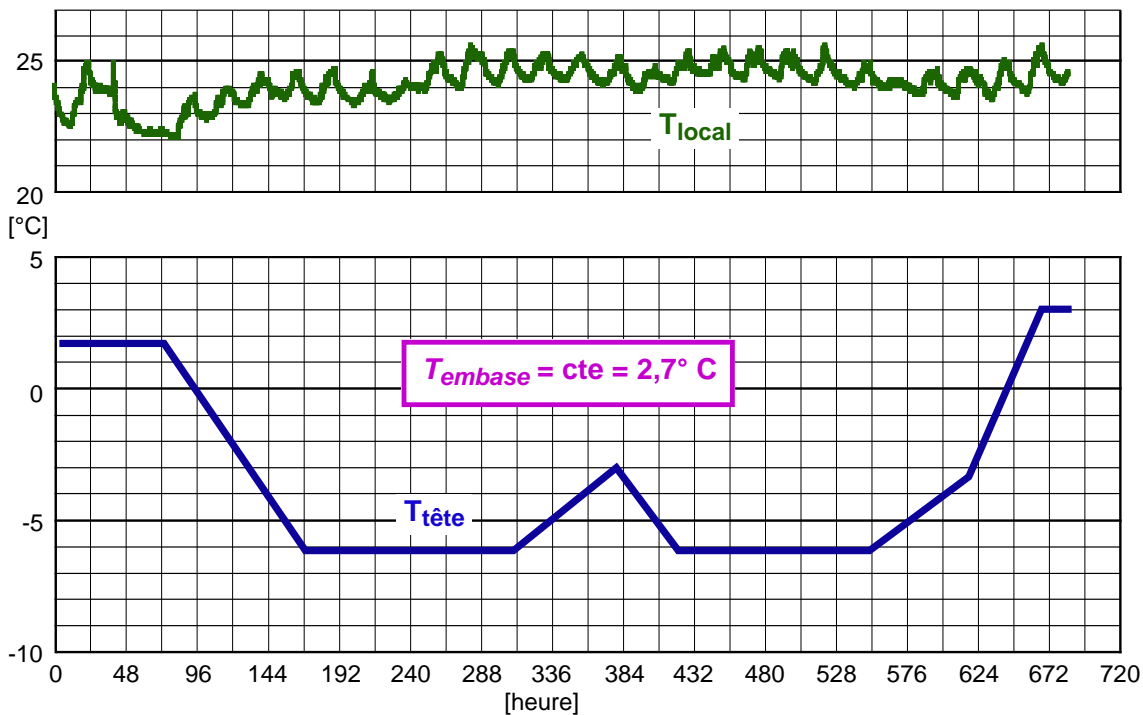
Comme l'essai no 7, cet essai aurait dû être réalisé sous la presse et permettre la mesure des déformations de l'éprouvette au moyen des billes de plombs et de photos aux rayons X. Le retard pris dans la construction des derniers dispositifs nécessaires à ces mesures a conduit à la réalisation de cet essai sans la presse. C'est donc un essai supplémentaire qui a cependant permis de très intéressantes observations.

5.8.2 Caractéristiques de l'éprouvette

L'éprouvette est celle déjà utilisée lors de l'essai no 7 (tableau 5-55).

5.8.3 Paramètres donnés

La température initiale en tête a été fixée à $1,6^{\circ}\text{C}$ et celle sur l'embase à $2,7^{\circ}\text{C}$. Comme pour les autres essais, cette dernière est restée constante pendant tout l'essai. La rampe de gel a été un peu plus rapide que pour les essais no 4 à 6. Les paramètres de température sont donnés sur la figure 5-59. Quant aux températures du local, elles ont varié fortement au début de l'essai puis sont restées approximativement constantes. Dès 144 heures, leur moyenne est de $24,3^{\circ}\text{C}$ avec un écart type de $0,47^{\circ}\text{C}$.



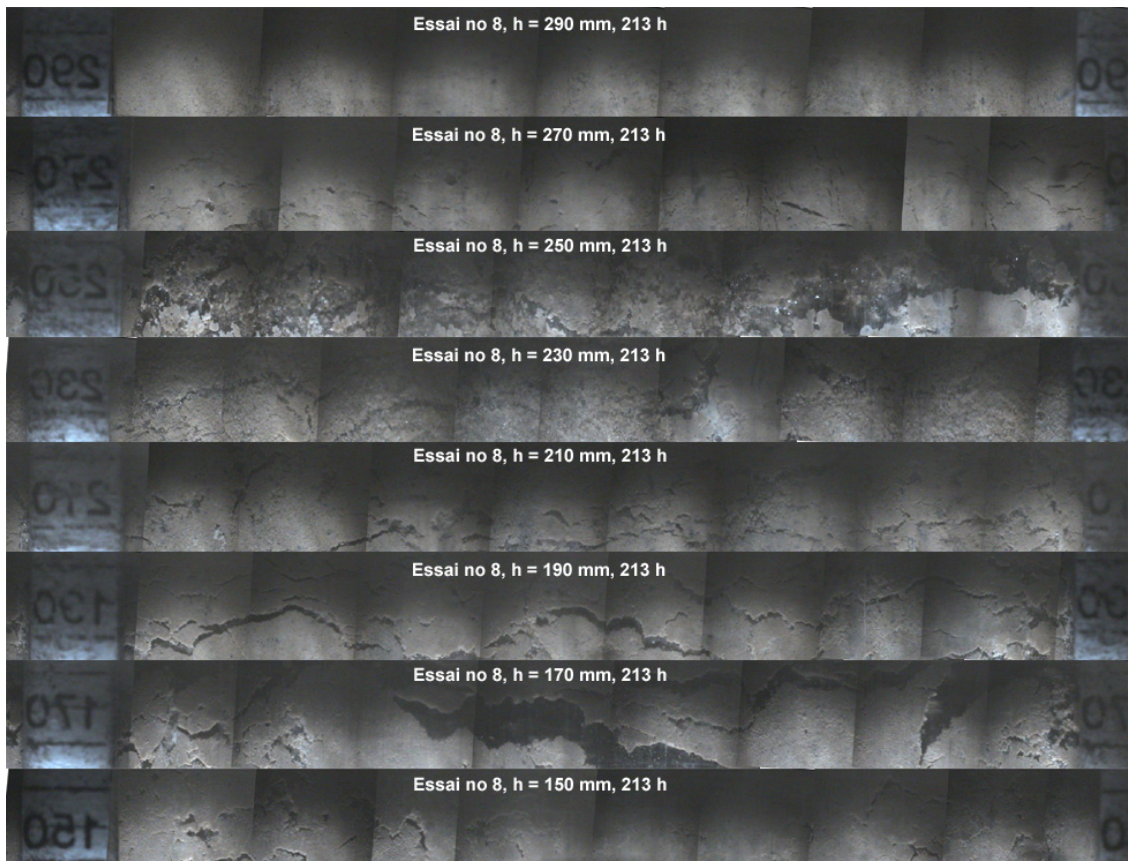
5-59 Essai no 8: Paramètres

5.8.4 Prises de vues à l'endoscope

Les panoramiques à 360° à 213 heures après le début de l'essai (90 heures après le début du gel au sommet de l'éprouvette), ainsi que leurs positions dans l'éprouvette font l'objet de la figure 5-60. Pour plus de détails sur leurs positions, on peut se référer à la figure 5-25 par exemple.

Les panoramas de la figure 5-60 montrent :

- Qu'au-dessus de 270 mm, aucune lentille ne s'est formée car la vitesse de propagation du front de gel dépassait la vitesse critique (voir chap. 4).
- Une zone à 250 mm où le compactage a été un peu défectueux et dans laquelle des lentilles se sont formées avec une grosse sur la droite.
- De 190 à 230 mm, une zone où sont visibles de petites lentilles ; la vitesse de propagation du front de gel est encore trop importante pour que des lentilles de grande épaisseur puissent se former.
- À 170 mm, une grosse lentille ; la progression du front de gel ralentit et des lentilles importantes peuvent se former.
- Aucune lentille ne s'est encore formée à 150 mm ; sur la gauche et la droite du panorama, les discontinuités visibles sont très probablement des grumeaux de compactage.



5-60 Essai no 8: Panoramas à 360° à différentes profondeurs, 213 heures après début essai.

L'essai no 8 étant un essai supplémentaire, le temps disponible a permis la réalisation de 3 très intéressants panoramas complets (sans coupure sur la hauteur) à 360° (fig. 5-61) :

- Le premier à environ 280 heures après le début de l'essai, à savoir un peu avant la fin du premier gel, ceci entre 159 et 197 mm. Environ, car il a fallu plus d'un jour pour effectuer les quelque 160 photos à l'endoscopes nécessaires au montage photographique qui fait l'objet de la partie gauche de la figure 5-61 et, pendant ce temps, des gonflements se produisaient.
- Le second à environ 380 heures après le début de l'essai, à savoir à la fin du premier dégel, ceci entre 162 et 199 mm ; il fait l'objet de la partie centrale de la figure 5-61.
- Le troisième à environ 520 heures après le début de l'essai, à savoir pendant la deuxième période de gel, ceci entre 164 et 224 mm ; il fait l'objet de la partie de droite de la figure 5-61.
- Enfin, le quatrième à environ 565 heures après le début de l'essai, à savoir à la fin du dégel lorsque toutes les lentilles ont fondu, ceci entre 160 et 222 mm ; il fait l'objet de la figure 5-62.

Sur chacun de ces panoramas, les lentilles de glace ont été détourées et noircies. Lorsqu'une lentille est en fin de dégel, il est parfois difficile de délimiter, sur les photos, les zones en glace et une certaine imprécision est inéluctable. Pour chaque bande de 2 mm de hauteur, leurs surfaces ont été ensuite calculées avec le logiciel de traitement d'image « IMAQ Vision builder » et ont permis de déterminer le gonflement et donc l'accroissement de l'indice de vide correspondant à cette bande, accroissement qui a été ajouté à l'indice de vide initial (voir chapitre 4 pour plus de détails sur ces opérations). La somme des gonflements de chaque bande de 2 mm de hauteur comparée au gonflement mesuré en tête de l'éprouvette semble montrer que nous avons été un peu pessimiste dans le choix, sur les photos, des lentilles de glace. Cependant comme les panoramas sont limités en hauteur, cette impression n'est pas garantie car toutes les lentilles de glace ne sont pas visibles sur les panoramas.

Les températures sur l'axe de l'éprouvette n'ayant pas été mesurées pendant l'essai no 8, elles ont été évaluées, non pas par une simulation numérique trop imprécise (voir chapitre 8), mais par comparaison avec les mesures effectuées sur les parois du moule et sur l'axe de l'éprouvette pendant l'essai no 6. Il ne faut donc pas les considérer en fonction de la position précise des lentilles de glace. Sur le panorama à 520 heures, la figure montre en outre la position des animations de dégel **8-d-188-585** et **8-d-209-624**.

L'information contenue sur la figure 5-61 est très dense et il vaut la peine de s'y attarder un peu. À 280 heures, à la fin de la première période de gel, le front de gel se trouve à quelque 165 mm de profondeur ; cette dernière est cependant approximative car les températures n'ont pas été mesurées, pendant l'essai no 8, sur l'axe de l'éprouvette et cette remarque est valable aussi pour les deux autres montages photographiques de la figure 5-61. Une grosse lentille s'est formée vers 175 mm de profondeur à un moment où la vitesse du front de gel s'était probablement stabilisée. Cette grosse lentille a aussi pu se former sur la surface d'une discontinuité de l'éprouvette due au compactage. La courbe donnant l'indice de vide en fonction de la profondeur montre bien la présence de la grosse lentille. Au-dessous de cette dernière, d'autres, plus petites sont en formation.

À 380 heures, à savoir après un premier dégel, toutes les lentilles ont fondu au-dessus de 175 mm. La grosse lentille n'a pas totalement fondu et il en reste quelques résidus. Au-dessous,

seules une ou deux très petites lentilles sont visibles. L'indice de vide en fonction de la profondeur est devenu très plat.

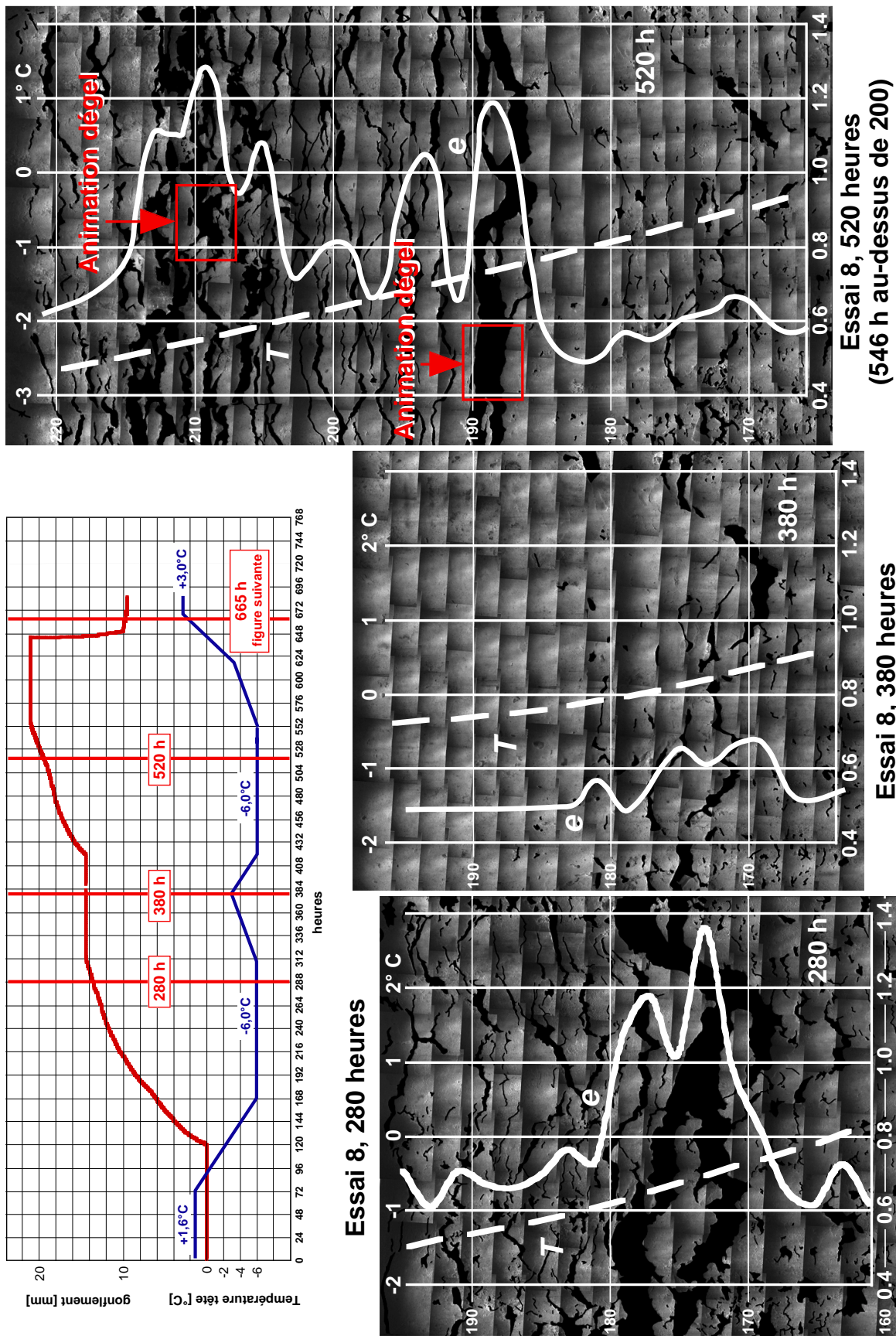
À 520 heures, à savoir vers la fin du regel de l'éprouvette, deux zones de lentilles de forte épaisseur se sont formées : une vers 210 mm de profondeur et l'autre vers 188 mm. La courbe de l'indice de vide en fonction de la profondeur le montre clairement. La zone à 210 mm s'est formée à un moment où la vitesse du front de gel s'était probablement stabilisée ou sur une discontinuité horizontale due au compactage de l'éprouvette. La zone à 188 mm est due très certainement à une stabilisation du front de gel car aucune discontinuité n'est visible sur le montage photographique correspondant à 380 heures. La ou les raisons de ces stabilisations de la vitesse du front de gel sont inconnues, notamment parce qu'aucune mesure de température n'a pu être réalisée sur l'axe de l'éprouvette durant l'essai no 8. À 520 heures, le front de gel se trouve à environ 170 mm de profondeur et il semble, qu'à ce niveau, des lentilles sont en cours de formation ou de reformation. La lentille vers la droite du montage photographique, vers 170 mm de profondeur, correspond en effet à une lentille visible sur le montage à 280 heures et sur celui à 380 heures.

Enfin, la figure 5-62 qui décrit l'état de l'éprouvette, entre 160 et 222 mm, à la fin du dégel lorsque toutes les lentilles ont fondu montre que certaines discontinuités persistent.

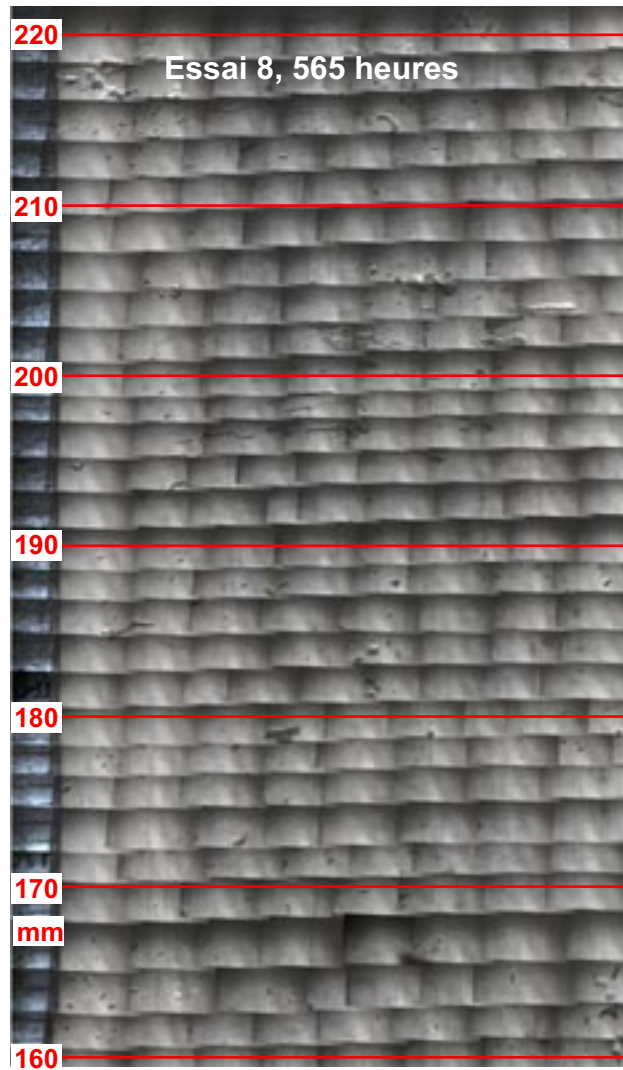
5.8.5 Résultats

5.8.5.1 Températures (fig. 5-63)

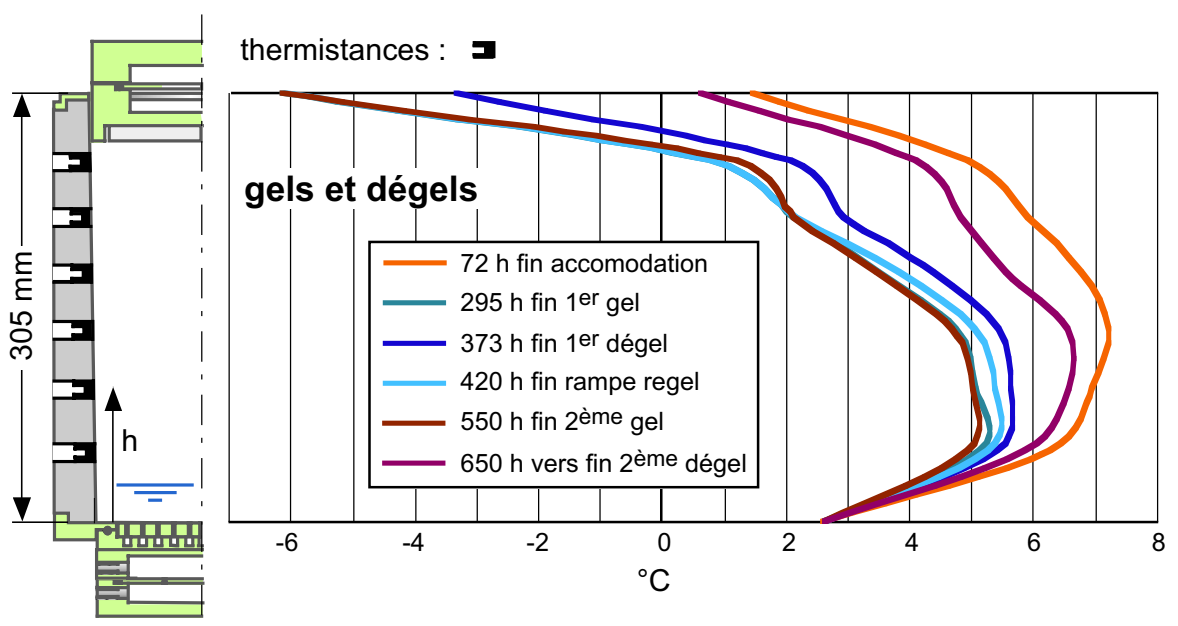
Les températures sont mesurées sur le moule et ne correspondent donc pas à celles sur l'axe de ce dernier (voir à ce propos les résultats de l'essai no 6 et notamment la figure 5-49).



5-61 Essai no 8: Comparaison des panoramas complets à 280, 380 et 520 heures après le début de l'essai



5-62 Essai no 8: Panorama complet à 565 heures après le début de l'essai (après dégel).

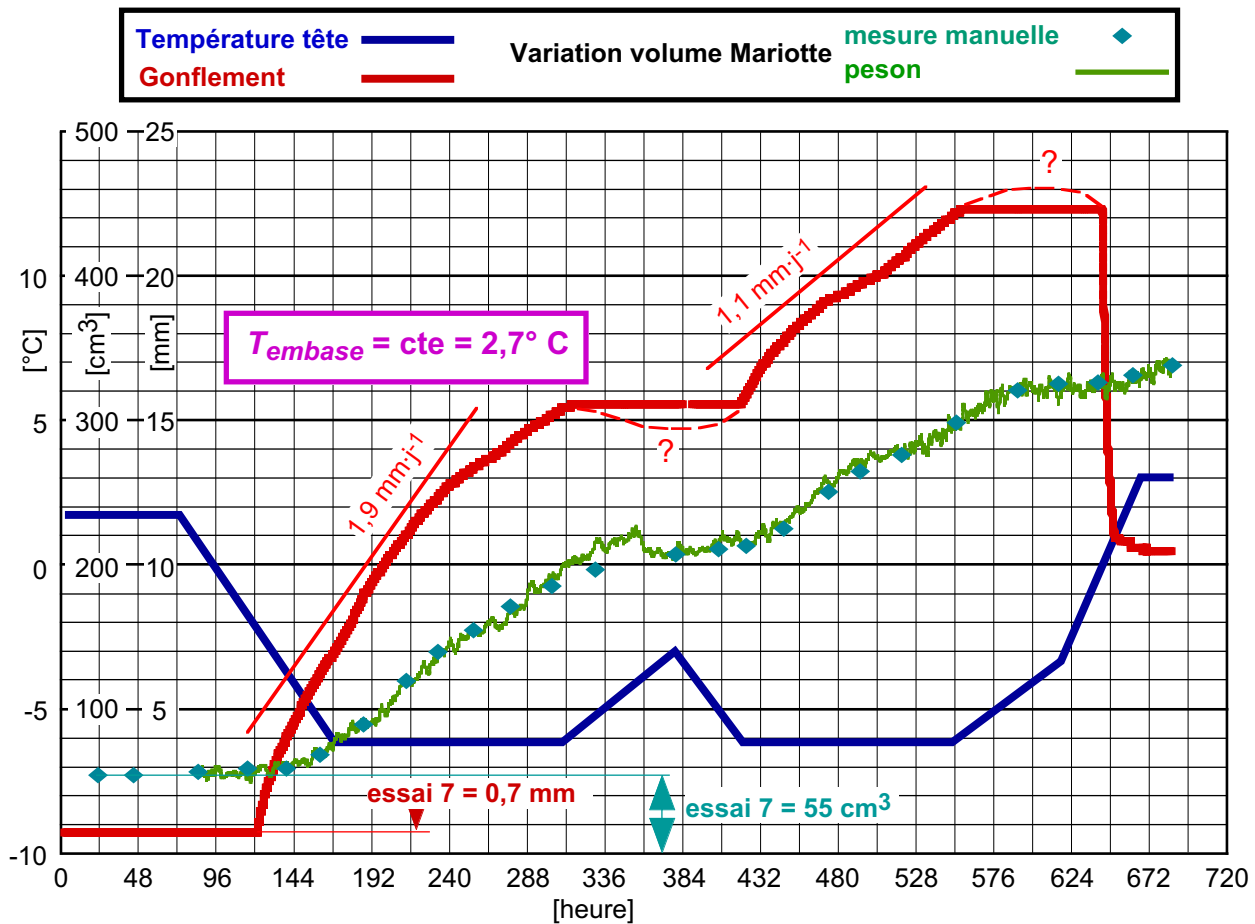


5-63 Essai no 8: Température en fonction de la profondeur pendant les gels et dégels

5.8.5.2 Gonflement et vase de Mariotte (fig. 5-64)

Les valeurs obtenues à la fin de l'essai no 7 sont indiquées au bas de la figure. Entre 312 et 400 heures environ, le gonflement mesuré est constant. Il s'agit probablement d'un artefact produit par le blocage de la tête. Lors du réchauffement, sous la tête de l'éprouvette, des lentilles ont très probablement fondu en partie ou en totalité et un léger tassement a dû se produire. Il en est de même pour le gonflement maximum entre 552 et 640 heures environ.

Quant à l'allure de la variation du volume d'eau dans le vase de Mariotte, elle est parfaitement compatible avec la mesure des gonflements. Le réchauffement de l'éprouvette doit provoquer un ralentissement du flux d'eau vers le front de gel et ce ralentissement est bien décrit par les mesures manuelles ou avec le peson.



5-64 Essai no 8: Gonflement et variation du volume du vase de Mariotte

5.8.5.3 Succions capillaires (haut fig. 5-65)

Seule la mesure avec le tensiomètre le plus profond présente un intérêt car les autres (1, 2 et 3) ont gelé pendant le gel de l'éprouvette !

5.8.5.4 Teneurs en eau non gelées (partie centrale fig. 5-65)

Un problème d'étalonnage des capteurs TDR a nécessité un calage des mesures sur les valeurs de la teneur en eau mesurées par prélèvement d'échantillons en fin d'essai. En admettant la pertinence de ce calage, les courbes de variation de la teneur en eau non gelée pendant l'essai sont très plausibles. On remarque notamment l'effet marqué du réchauffement sur ces teneurs en eau non gelée.

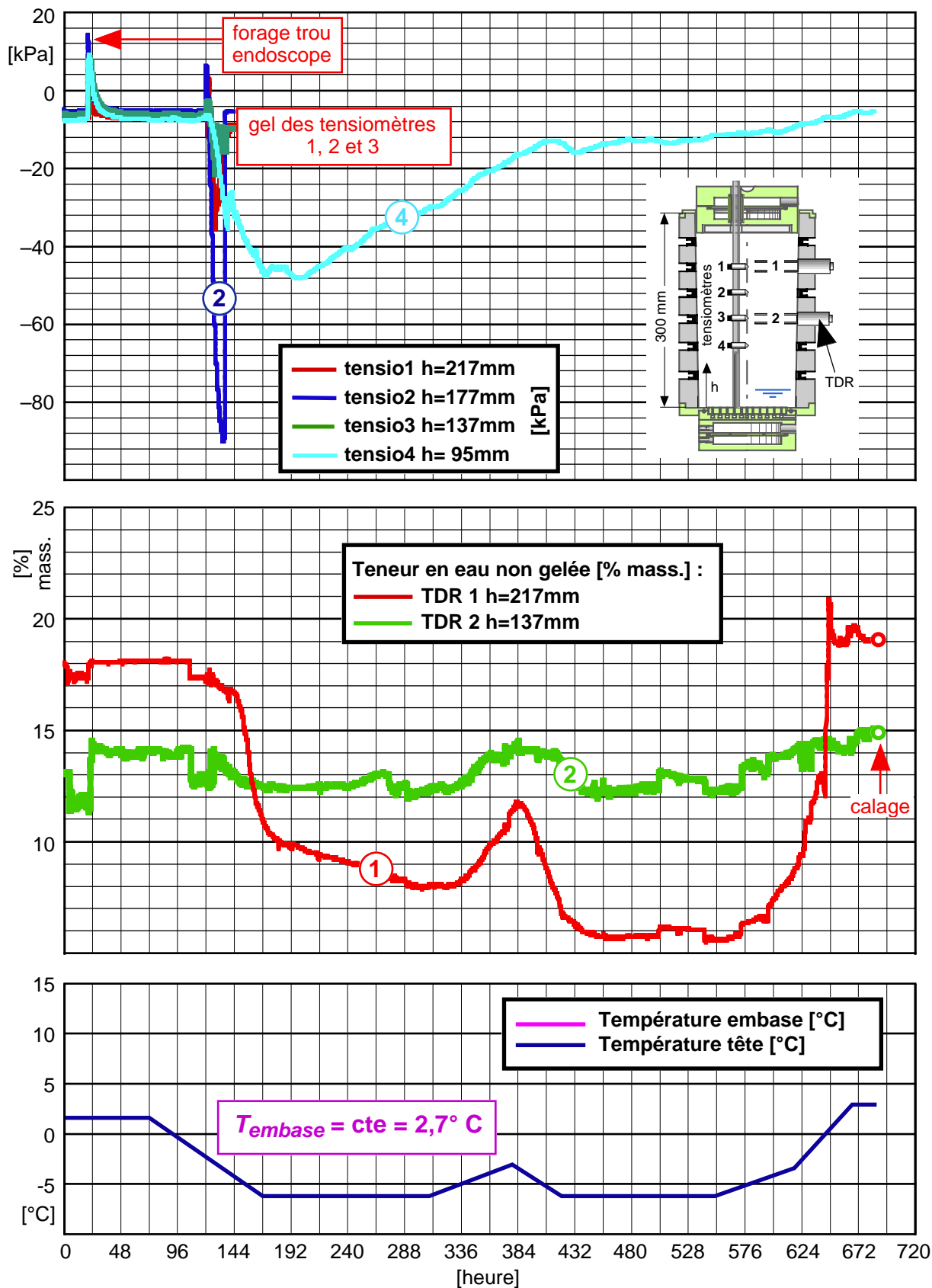
5.8.5.5 Teneurs en eau en fin d'essai (fig. 5-66)

Les teneurs en eau en fonction de la profondeur mesurées en fin d'essai sur des prélèvements d'échantillons pendant l'extraction du sol de l'éprouvette, a permis le calage des mesures des capteurs TDR.

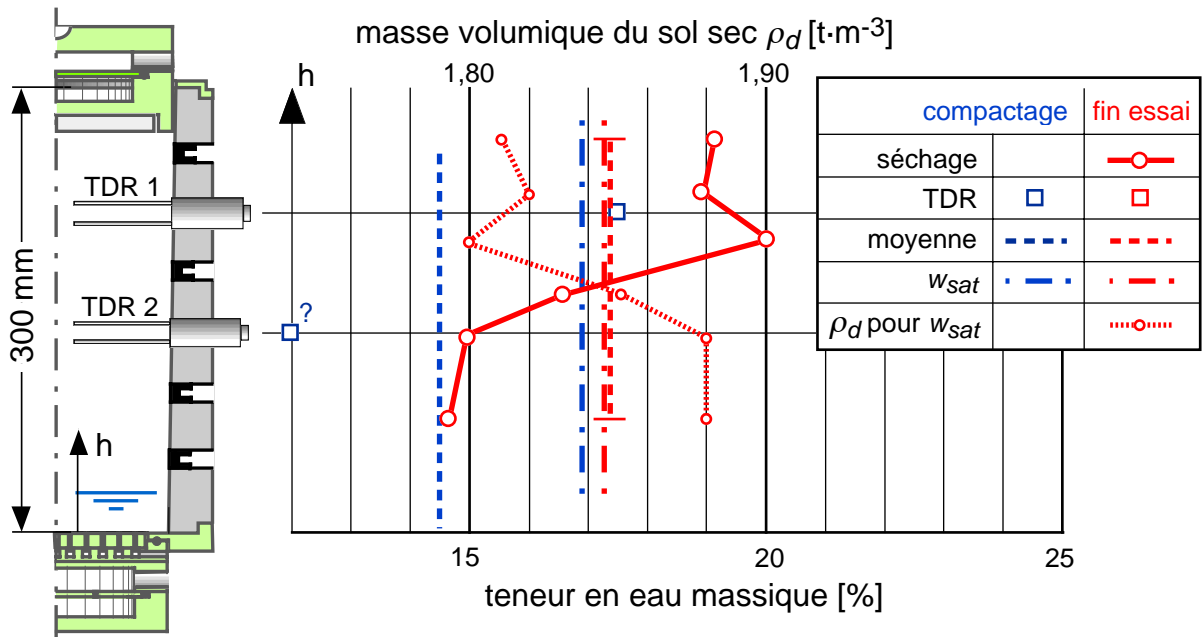
La variation des masses volumiques du sol sec, calculée avec la teneur en eau du sol saturé, est, comme pour les essais no 3 à 6, plausible et montre l'augmentation progressive de l'indice de vide dans la zone des lentilles de glace. Un point à $1,80 \text{ t}\cdot\text{m}^{-3}$ est cependant curieux : les aléas des mesures !

5.8.5.6 Résistance au cisaillement (fig. 5-67)

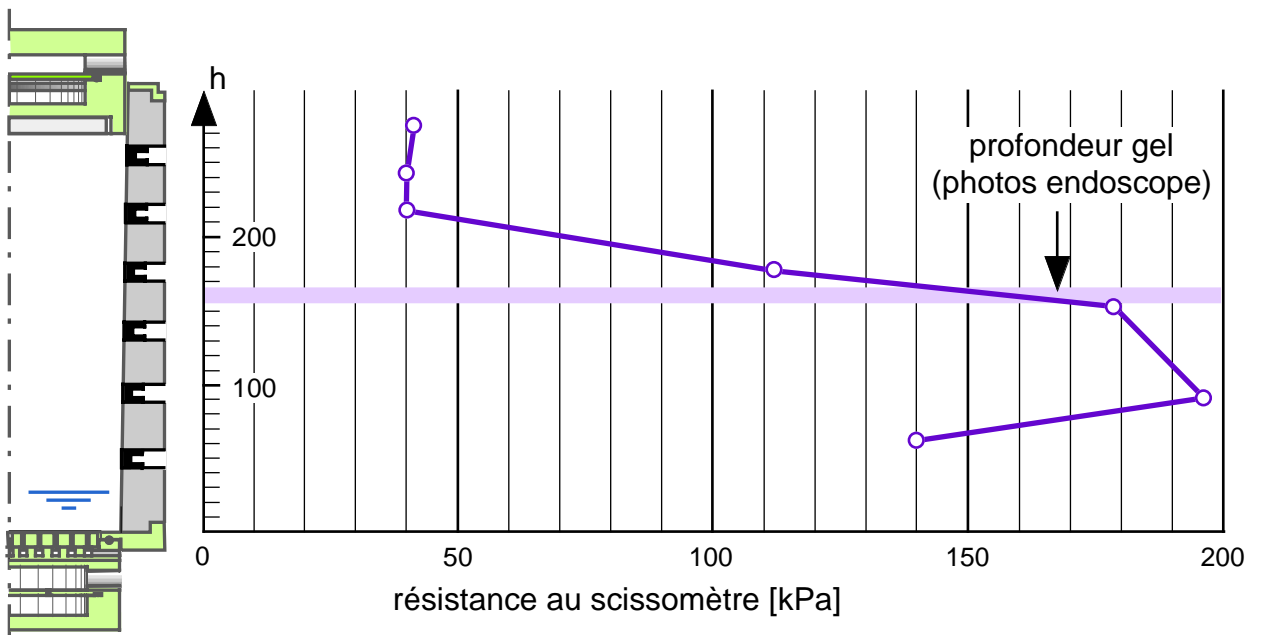
La variation de la résistance au cisaillement mesurée, en fin d'essai, avec le scissomètre Geonor, correspond bien à la profondeur maximale du gel déterminée au moyen des photos prises avec l'endoscope (position des lentilles de glace les plus profondes).



5-65 Essai no 8: Succions capillaires et teneurs en eau non gelée en fonction de temps



5-66 Essai no 8: Teneurs en eau après compactage et à la fin de l'essai



5-67 Essai no 8: Résistance au cisaillement en fin d'essai

5.8.6 Propagation du front de gel

Pendant l'essai no 8, aucune mesure de la température sur l'axe de l'éprouvette ni simulations numériques n'ont été réalisées. La propagation du front de gel n'a donc pas pu être analysée.

6

Résultats des essais avec presse et rayons X

6.1 Introduction

Les essais avec la presse appliquant une force verticale variable sur la tête de l'éprouvette et avec la mesure des déformations à l'intérieur de l'éprouvette au moyen de photographies par rayons X ont pour buts généraux :

- l'étude de la répartition des déformations à l'intérieur de l'éprouvette pendant le gel et le dégel,
- l'évaluation des modules de déformation à différents niveaux de l'éprouvette sous des charges verticales variables, ceci essentiellement pendant le dégel.

Pendant ces essais, certaines mesures tensiométriques et de teneurs en eau non gelée ont dû être abandonnées car leurs capteurs gênaient les photographies par rayons X.

6.2 Essai no 9

6.2.1 Buts de l'essai

Cet essai avait trois buts :

- Étudier la répartition des déformations pendant le gel et le dégel avec la charge statique sur la tête utilisée pendant les essais précédents, ceci au moyen des radiographies.
- Étudier l'effet d'un compactage plus faible de l'éprouvette.
- En fin d'essai, essayer d'évaluer les pertes d'eau par évaporation ou par d'autres causes.

Trois thermistances ont été placées au centre de l'éprouvette sur l'axe de l'endoscope.

6.2.2 Remarque sur le déroulement de l'essai no 9

L'essai a dû être interrompu après la première tentative de radiographie. Des problèmes ont été rencontrés et ont dû être résolus, ce qui a pris beaucoup de temps. Pendant cet arrêt, les cryostats réglant les températures de l'enceinte et de l'embase ont été arrêtés. Celui contrôlant la température de la tête a, par erreur, été laissé en action et cette température a été ainsi maintenue à +1,5 °C.

Le niveau de l'eau dans l'éprouvette a continué à être contrôlé par le vase de Mariotte et la variation du volume de ce dernier a été mesurée. À part cette variation de volume, les mesures réalisées pendant la première phase de l'essai, avant son interruption, ne sont pas traitées dans cette section car elles n'ont aucun intérêt.

Lors de la deuxième partie de l'essai, qui a débuté lorsque la radiographie initiale a pu être réalisée, la tête s'est bloquée après le début des gonflements (fig. 6-5). Elle a été ensuite débloquée, mais pendant ce blocage, les déformations à l'intérieur de l'éprouvette n'ont pas été ce qu'elles auraient dû être. Ce défaut temporaire a cependant permis certaines observations très intéressantes qui seront discutées plus loin.

6.2.3 Caractéristiques de l'éprouvette

Elles sont différentes des essais précédents car l'énergie de compactage de cet essai est plus faible et la teneur en eau initiale plus élevée (tableau 6-1).

6-1 Essai no 9: Caractéristiques du compactage de l'éprouvette

Essai	9
Diamètre max. des grains [mm]	2
Nombre de couches	11
Coups par couche	14
Hauteur de chute [mm]	305
Masse de la dame [kg]	4,5
Energie de compactage [$\text{MJ}\cdot\text{m}^{-3}$]	0,37
Masse volumique éprouvette ρ_d [$\text{t}\cdot\text{m}^{-3}$]	1,67
Teneur en eau init. de l'éprouvette [%]	18,6
Degré de saturation S_r [-], $\rho_s = 2,70 \text{ t}\cdot\text{m}^{-3}$	0,81

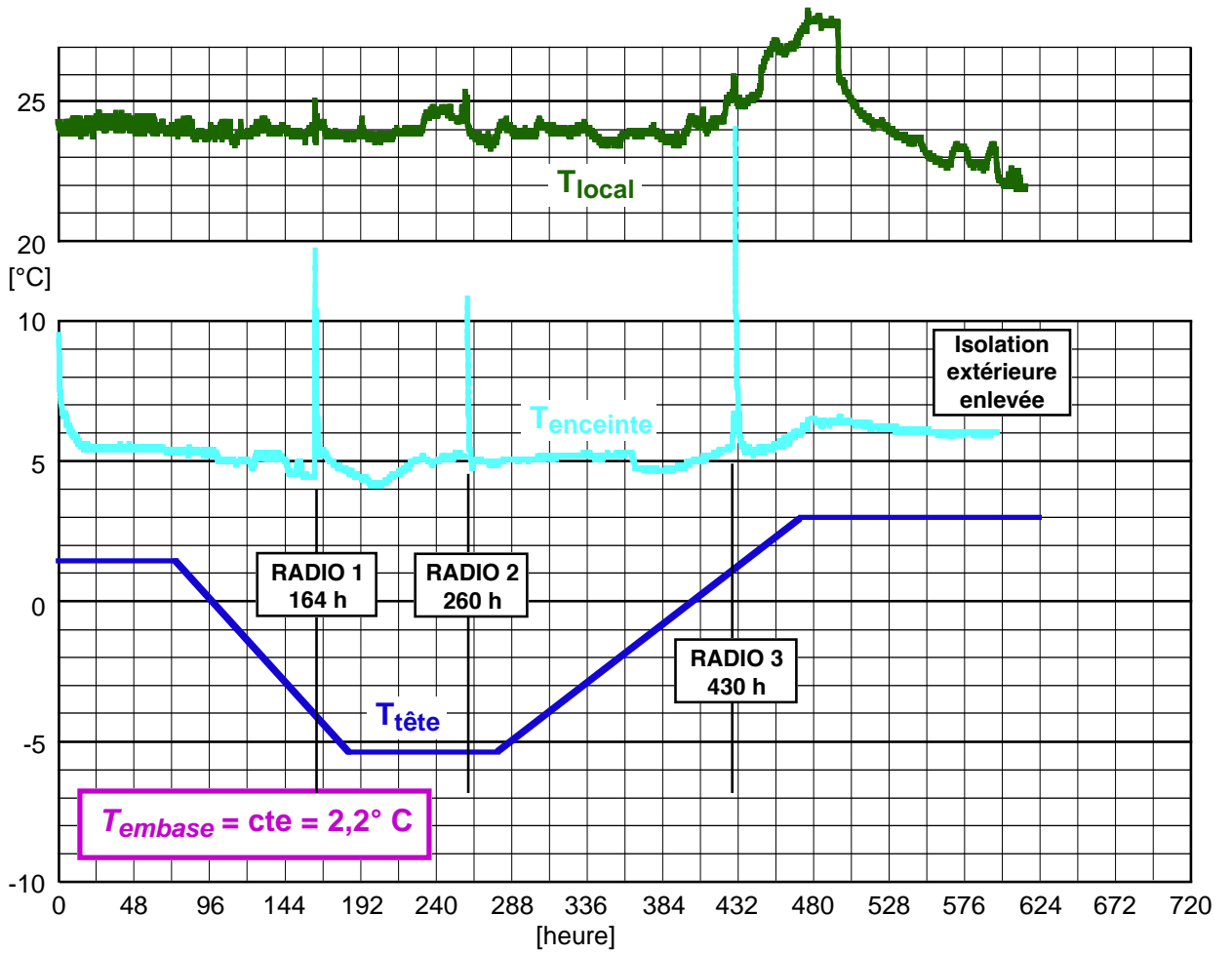
6.2.4 Paramètres donnés

Pour la deuxième (9_2) et la troisième partie (9_3) de l'essai, les températures en tête, sur l'embase, de l'enceinte entre les deux isolations et du local sont données sur la figure 6-2. On trouvera en plus sur cette figure, les temps des radiographies prises après la radiographie initiale. Pour la première partie de l'essai, on trouve ces données sur la figure 6-3. Dès 432 heures environ, la température du local a fortement augmenté à cause des problèmes habituels avec l'installation de climatisation. Bien heureusement, cette augmentation s'est produite après la fin du dégel de toutes les lentilles de glace et n'a pas affecté l'essai. À ce même moment, l'augmentation de la température de l'enceinte n'est due qu'en partie à celle du local. Elle est surtout due à l'enlèvement temporaire de la partie supérieure de l'isolation pour étancher avec de la graisse silicone tous les interstices de l'éprouvette en contact avec l'air.

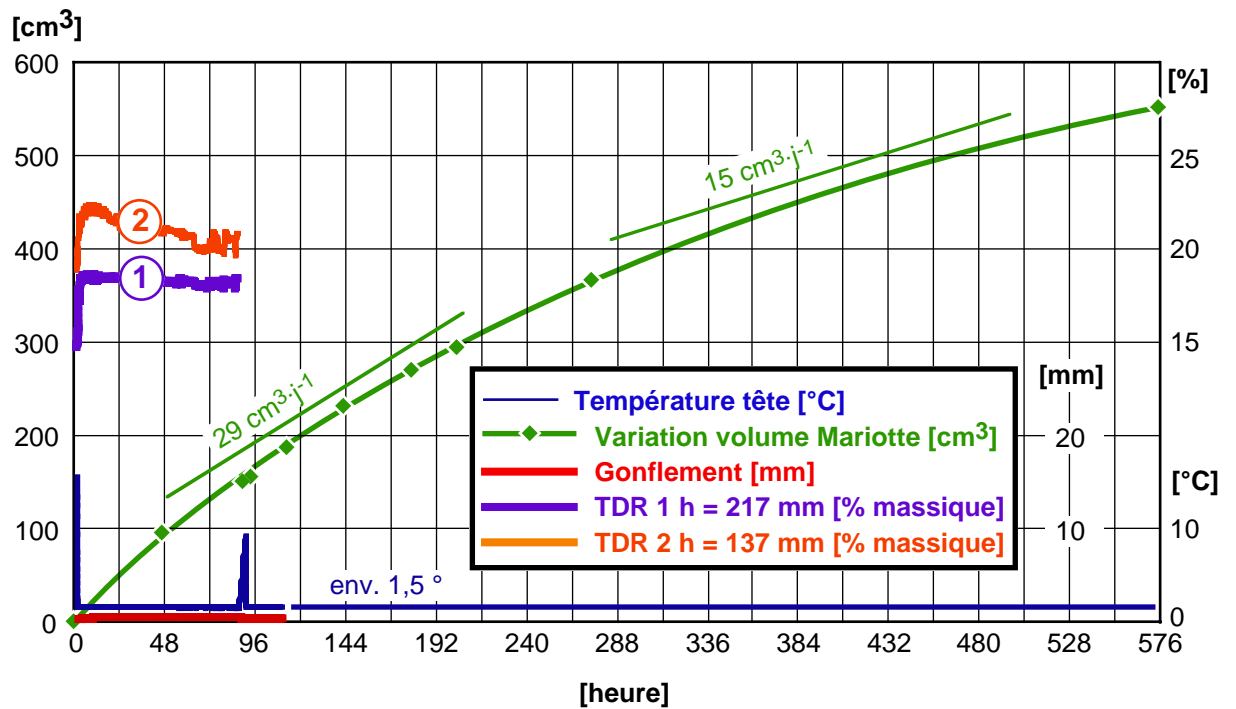
6.2.5 Résultats

6.2.5.1 Vase de Mariotte pendant la première phase de l'essai (9_1) (fig. 6-3)

Pendant la partie de l'essai pendant laquelle le programme d'acquisition des données a fonctionné, la variation du volume d'eau dans le vase de Mariotte a été mesurée. Après l'arrêt de la chaîne d'acquisition, cette mesure s'est poursuivie, ceci pendant 24 jours, ceci cependant à des intervalles d'une durée plus importante. Sur la figure 6-3 sont en plus représentés : le gonflement qui est approximativement nul, et les teneurs en eau mesurées avec les deux capteurs TDR (calées sur la teneur en eau initiale).



6-2 Essai no 9_2 et 9_3: Températures tête, embase, enceinte et extérieur



6-3 Essai no 9: Variation du volume du vase de Mariotte pendant la première partie de l'essai

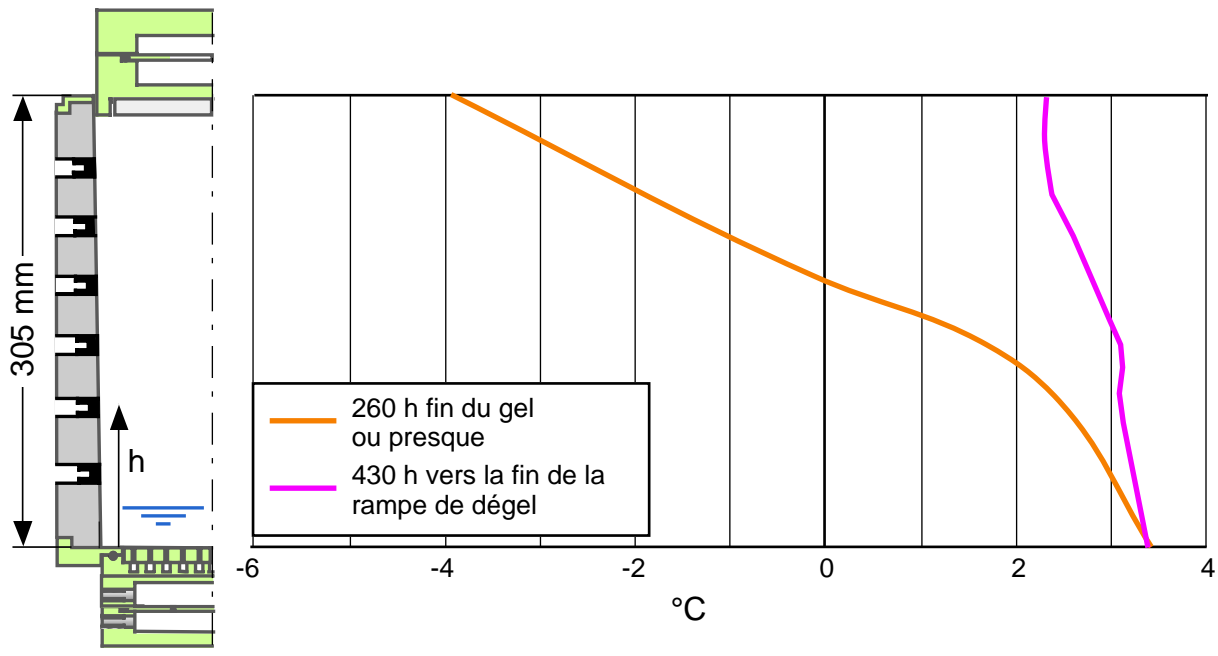
Où va l'eau prélevée dans le vase ? Comme aucune teneur en eau n'a pu être réalisée à la fin de la première partie de l'essai, on ne peut que tirer certaines conclusions sur la base des pertes d'eau enregistrées lors des essais précédents, la mesure de l'évaporation de l'eau dans le local en fin d'essai et sa conséquence sur l'éprouvette en fonction des interstices du moule en contact avec l'air. En outre, il faut tenir compte du fait que l'éprouvette est non saturée et qu'il y a ainsi un léger transport d'eau provenant du bas de cette dernière. Le paragraphe 6.2.5.4 est consacré aux mesures d'évaporation en fin d'essai.

6.2.5.2 Températures (fig. 6-4)

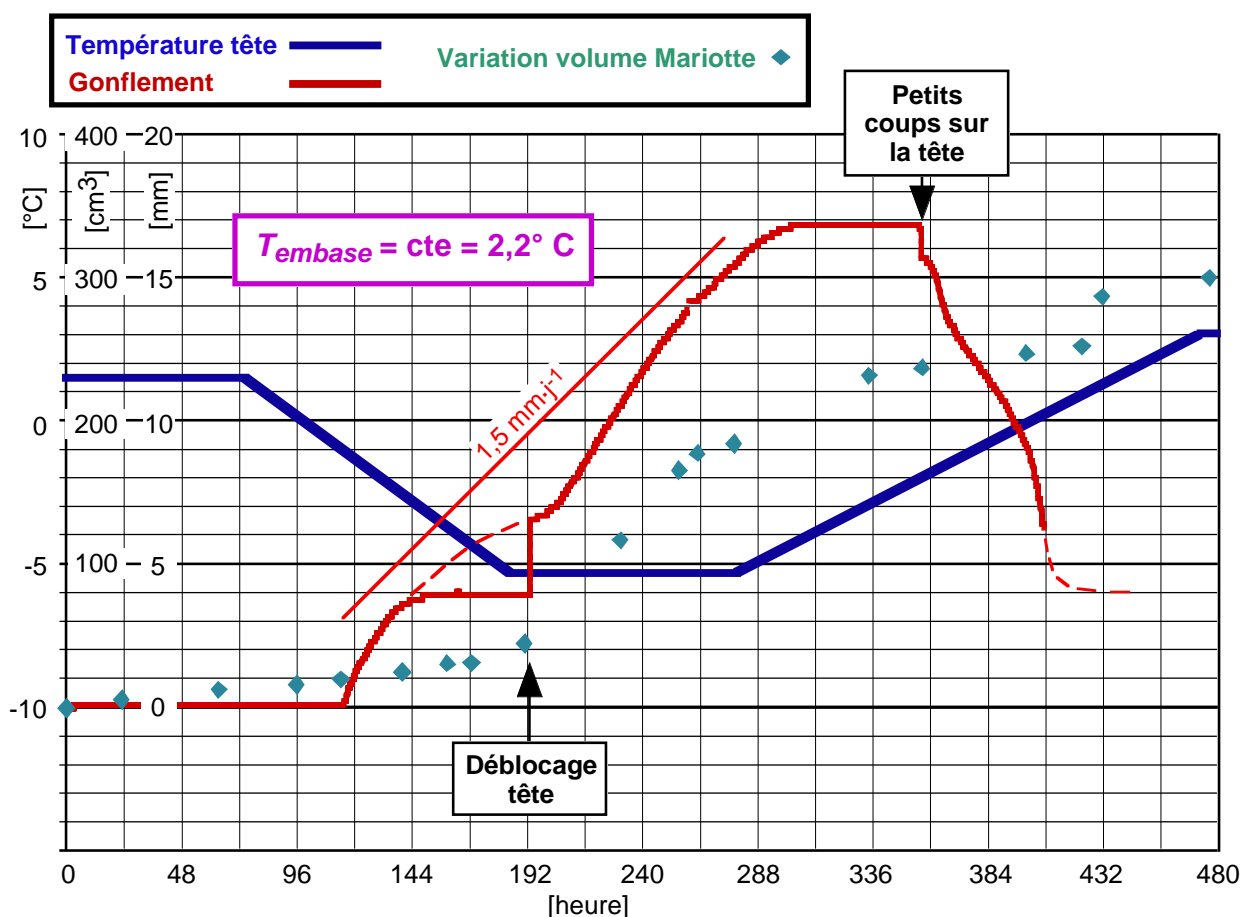
Les températures n'étant mesurées, pendant cet essai, que sur les parois du moule, celles sur l'axe de l'éprouvette ont été évaluées sur la base de la simulation numérique de l'essai no 6 et le calage sur les températures du moule. La figure 6-4 montre le résultat de cette simulation. Elle sera utilisée au paragraphe 6.2.5.8.

6.2.5.3 Gonflement et vase de Mariotte (fig. 6-5)

La figure 6-5 est dévolue à la deuxième partie de l'essai (9_2) et la figure 6-6 à la troisième (9_3) qui devait tenter d'évaluer les pertes d'eau par évaporation ou par d'autres causes. Pendant la deuxième partie de l'essai, lors des radiographies, le peson du vase de Mariotte a été plusieurs fois brusquement déplacé accidentellement et les valeurs mesurées s'en sont ressenties. Pour cette raison, elles ne sont pas représentées sur la figure 6-5.



6-4 Essai no 9: Isothermes à différents moments (axe = simulation numérique)



6-5 Essai no 9: Gonflement et variation volume vase de Mariotte pendant la 2^{ème} partie de l'essai

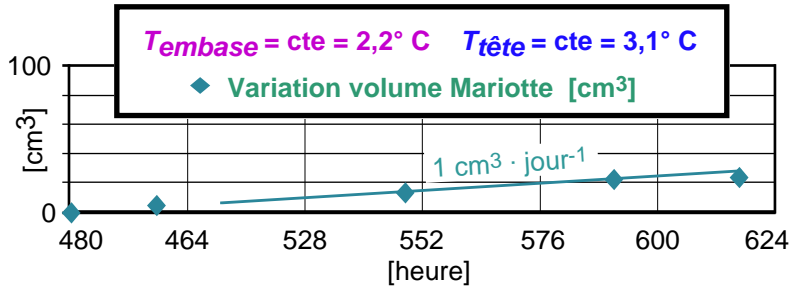
Lors du dégel, le capteur de gonflement a donné des valeurs aberrantes. La cause en est probablement un excentrement et une rotation de l'éprouvette mal tenue par son dispositif de serrage. Les radiographies ainsi que les mesures de teneur en eau et de la masse volumique en fin d'essai ont permis d'évaluer une courbe de dégonflement plausible (traitillés).

6.2.5.4 Mesure des pertes d'eau par évaporation

En fin d'essai (troisième partie : 9_3), nous avons tenté d'évaluer les pertes d'eau dans l'éprouvette par évaporation au travers des interstices du moule en contact avec l'air. En outre, dans le local où se trouve l'installation d'essai, une mesure de l'évaporation à la surface de l'eau d'une éprouvette graduée et une mesure de l'évaporation à la surface d'un cylindre rempli du limon utilisé pour les essais ont été réalisées.

Avant le début de la troisième partie de l'essai, tous les interstices ont été colmatés avec de la graisse silicone, ceci à l'exception du petit tube du vase de Mariotte obligatoirement en contact avec l'air. La mesure des pertes résiduelles fait l'objet de la figure 6-6 et les surfaces des interstices du moule en contact avec l'air (en principe colmatés lors de l'essai no 9_3), celui du tableau 6-7. Dans cette dernière, l'évaporation dans le petit tube du vase de Mariotte (contact eau-air) et l'évaporation sol-air sont évaluées sur la base des mesures citées plus haut.

Ces mesures des pertes d'eau seront exploitées dans le chapitre 7, lorsqu'il s'agira de faire le bilan de toutes les circulations de l'eau.



6-6 Essai no 9: Variation volume vase de Mariotte pendant la 3^{ème} partie de l’essai

6-7 Essai no 9: Surfaces des interstices du moule en contact avec l’air et évaporation correspondante.

Interstices du moule	Surface [mm ²]	Evaporation [cm ³ ·jour ⁻¹]
1. Entre la tête et le moule, avec, en plus, la surface du tube plexiglas central (1)	1000	2,0
2. Entre la tête et le moule, sans, la surface du tube plexiglas central (1)	850	1,7
3. Trous des tensiomètres dans le moule sans les tensiomètres (1)	150	0,3
4. Trous des tensiomètres dans le moule avec les tensiomètres (1)	40	0,1
5. Trous des capteurs TDR dans le moule, avec leur membrane étanche	env. 0	0
6. Petit tube (Ø 8,5 mm) sortant du vase de Mariotte (2)	57	0,15
Total 1 + 3 + 6		2,45
Total 2 + 4 + 6		1,95

Résultats essais d’évaporation

(1) évaporation sol – air $2,0 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^3 \cdot \text{jour}^{-1} \cdot \text{mm}^{-2}$

(2) évaporation eau - air $2,3 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^3 \cdot \text{jour}^{-1} \cdot \text{mm}^{-2}$

Evaluations par mesures dans le local d’essai (30% d’hygrométrie, 22°C env.)

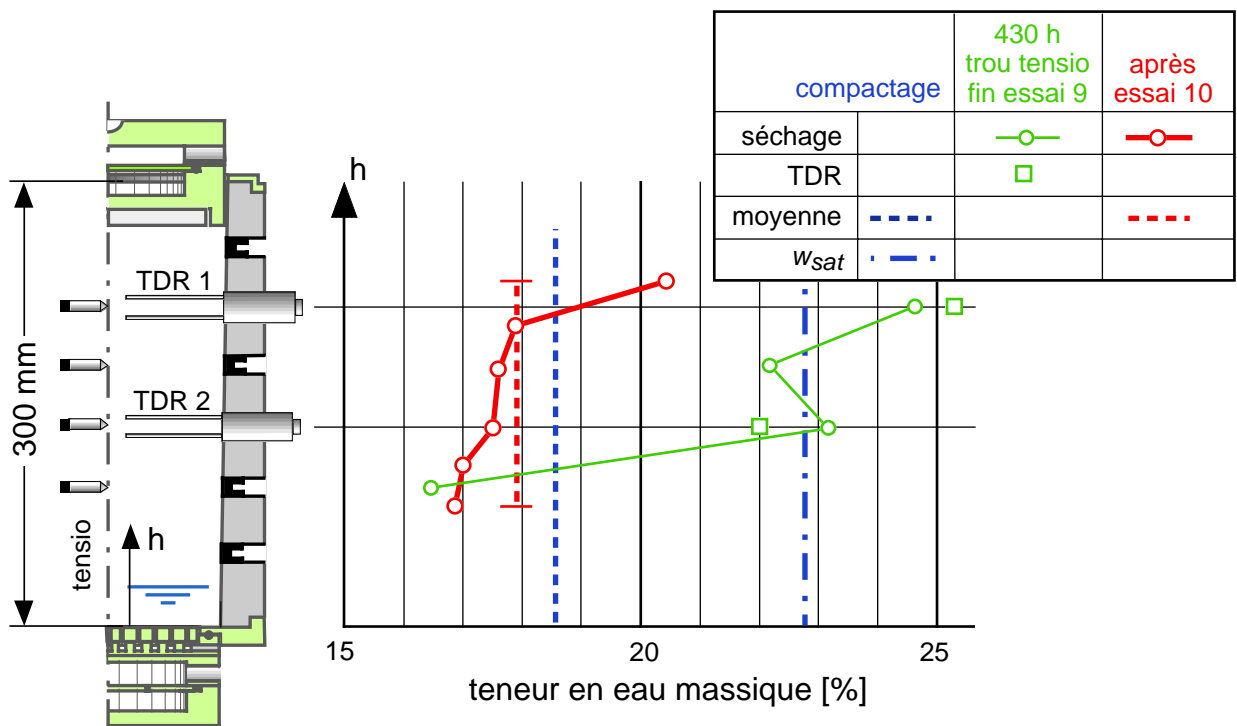
6.2.5.5 Teneurs en eau pendant le gonflement

Pour ne pas gêner les photographies par rayons X, les capteurs TDR n’ont pu être installés. Aucune mesure des teneurs en eau n’a donc pu être réalisée pendant l’essai, ceci à l’exception d’une teneur en eau effectuée sur un prélèvement sous la tête, de très faible volume, pendant le déblocage de la tête (194 heures après le début de l’essai). La teneur en eau de ce prélèvement était de 20,3 %, ce qui est élevé si on la compare à la teneur en eau initiale. Cette différence sera discutée au paragraphe suivant.

6.2.5.6 Teneurs en eau en fin d'essai (fig. 6-8.)

Tout d'abord, pendant les opérations de la radiographie no 3 (430 heures), des teneurs en eau ont été effectuées sur des prélèvements par les orifices des tensiomètres qui n'ont pas été utilisés pendant cet essai. Ces teneurs en eau ont été réalisées sur des éprouvettes de moins d'un gramme de matière sèche et leurs résultats n'ont ainsi qu'une faible précision. Nous les montrons cependant sur la figure 6-8.

L'éprouvette a été utilisée pour l'essai no 10 qui avait pour but de tester, au moyen de radiographies, la mesure des déformations dans l'éprouvette soumise à des charges verticales produites par le vérin de la cellule Bishop. Ainsi, les teneurs en eau à la fin de l'essai n'ont pu être réalisées qu'à la fin de l'essai no 10. Comme l'éprouvette a subi des déformations importantes pendant ce dernier essai, ces teneurs en eau sont à considérer avec précaution.

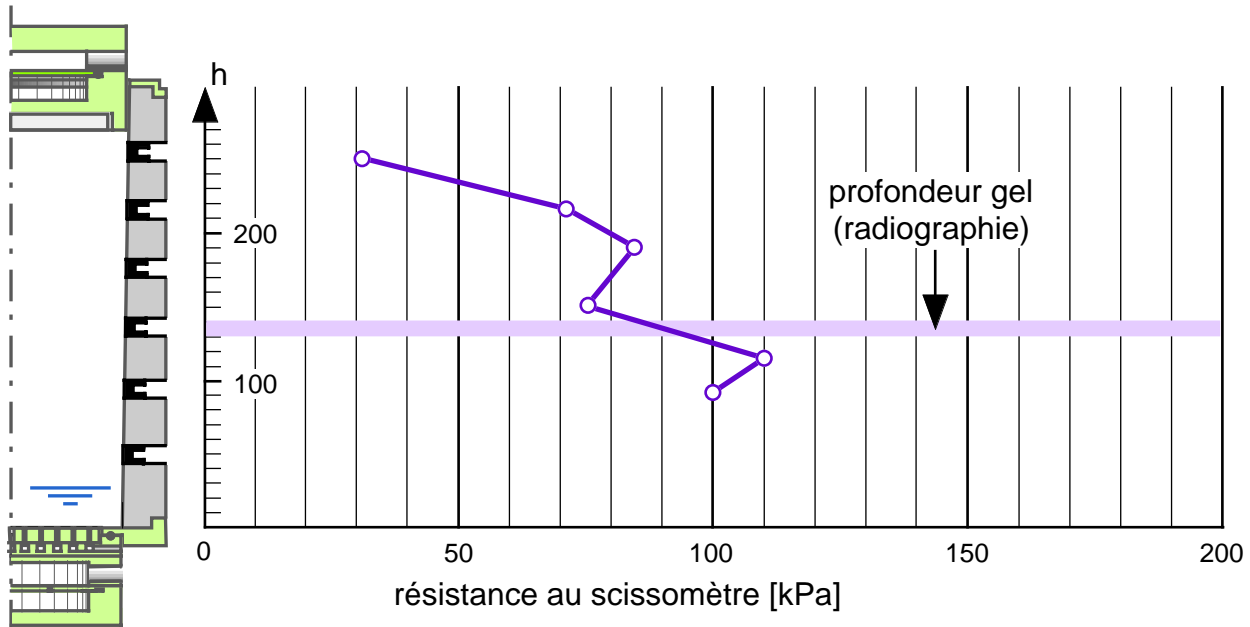


6-8 Essais no 9 et 10: Teneurs en eau après compactage, à 430 heures et à la fin de l'essai no 10

Pendant les essais avec la cellule Bishop, l'éprouvette s'est compactée de 15 mm. Ce compactage provient de l'expulsion de l'eau par les orifices du moule et par le fond lié au vase de Mariotte. Aucune mesure de cette eau n'a pu être faite. Le volume de l'eau contenue dans l'éprouvette au début de l'essai était de 1583 cm^3 ($w = 18,6 \%$). À la fin de l'essai no 10, si on le calcule avec la teneur en eau finale moyenne de $17,9 \%$, il n'est plus que de 1523 cm^3 . 60 cm^3 d'eau auraient été ainsi expulsés, ce qui paraît beaucoup. L'éprouvette n'est cependant de loin pas saturée et un volume d'air non négligeable a certainement aussi été expulsé.

6.2.5.7 Résistance au cisaillement (fig. 6-9)

La résistance au cisaillement mesurée avec le scissomètre Geonor est beaucoup plus faible que celle mesurée sur les éprouvettes des essais précédents compactées à $0,60 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-3}$ (l'éprouvette de l'essai no 9 a été compactée à $0,37 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-3}$) ce qui est normal. Pour bien montrer cette différence, l'échelle de la figure 6-9 est la même que celles des essais précédents. Le passage de la zone gelée à celle non gelée est beaucoup moins marqué que lors des essais à fort compactage.



6-9 Essai no 9: Résistance au cisaillement en fin d'essai

6.2.5.8 Déformations dans l'éprouvette pendant le gel et le dégel (rayons X)

En plus de la radiographie initiale, trois radiographies ont été réalisées pendant l'essai no 9, ceci aux temps décrits sur la figure 6-2. Sur les figures présentant ces radiographies, les billes de plomb ont été renforcées en noir ou en blanc.

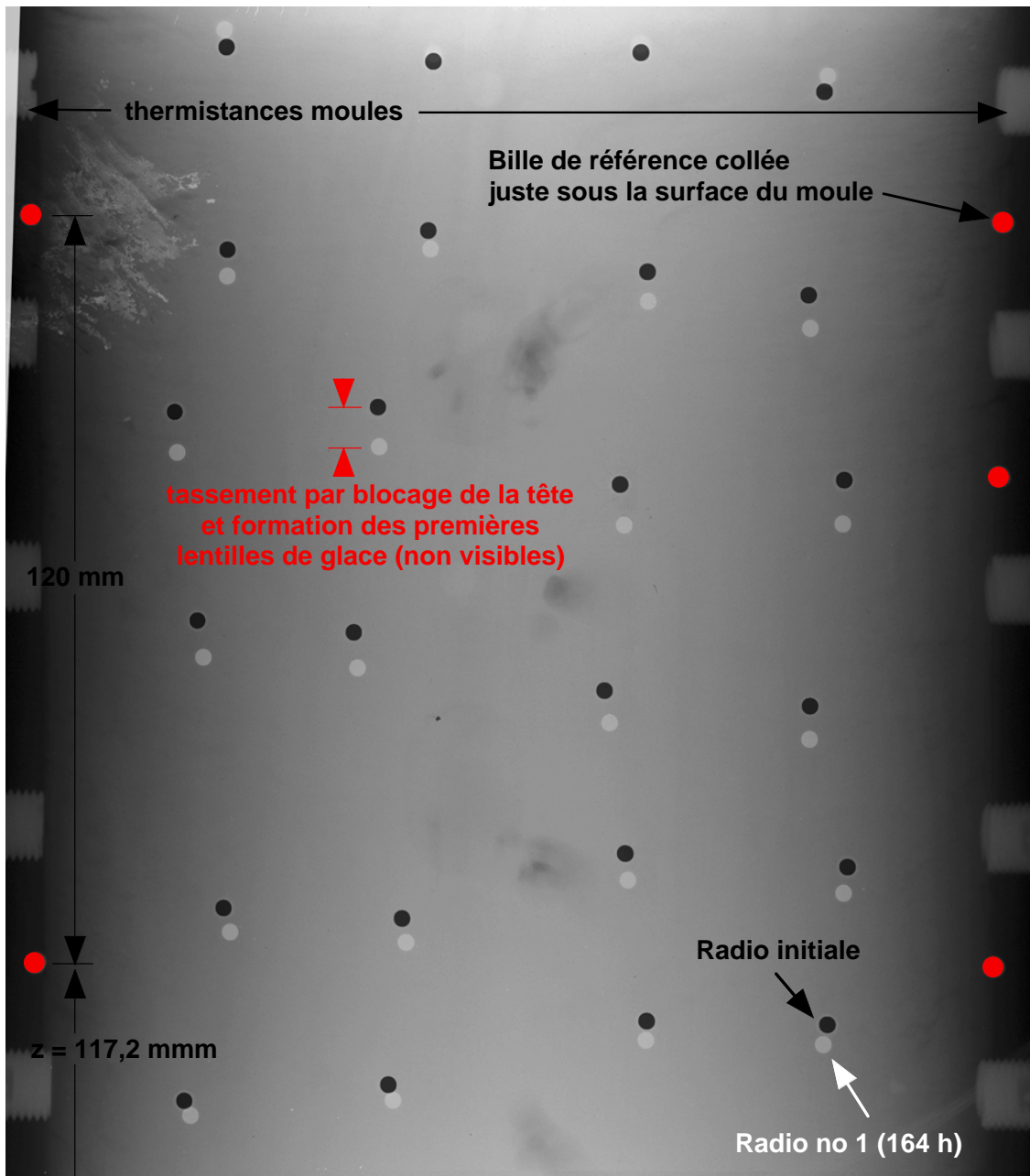
Le blocage de la tête de refroidissement pendant la formation des premières lentilles de glace (non visibles sur la figure) a comprimé le sol de l'éprouvette au-dessous de ces lentilles, ceci surtout dans sa zone intermédiaire (fig. 6-10). Pour cette raison, les radiographies no 2 et no 3 seront comparées avec la radiographie no 1 et non pas avec la radiographie initiale.

La figure 6-11 montre les déplacements des billes de plomb lors des radiographies no 1, 2 et 3. Au niveau des lentilles les plus profondes, lentilles qui sont parfaitement visibles sur la radiographie, les déplacements sont faibles. En dessous de la profondeur de gel, on constate une contraction du sol qui est due à l'accroissement de la succion capillaire sous ce front. Ce phénomène est connu. Il a été décrit pour la première fois par Chamberlain (1980) et par Dysli et Pfister (1980 et 1982). Il est cependant important car les cycles de gel et dégel consolide le sol sous la profondeur maximale du front de gel ce qui n'est pas sans intérêt !

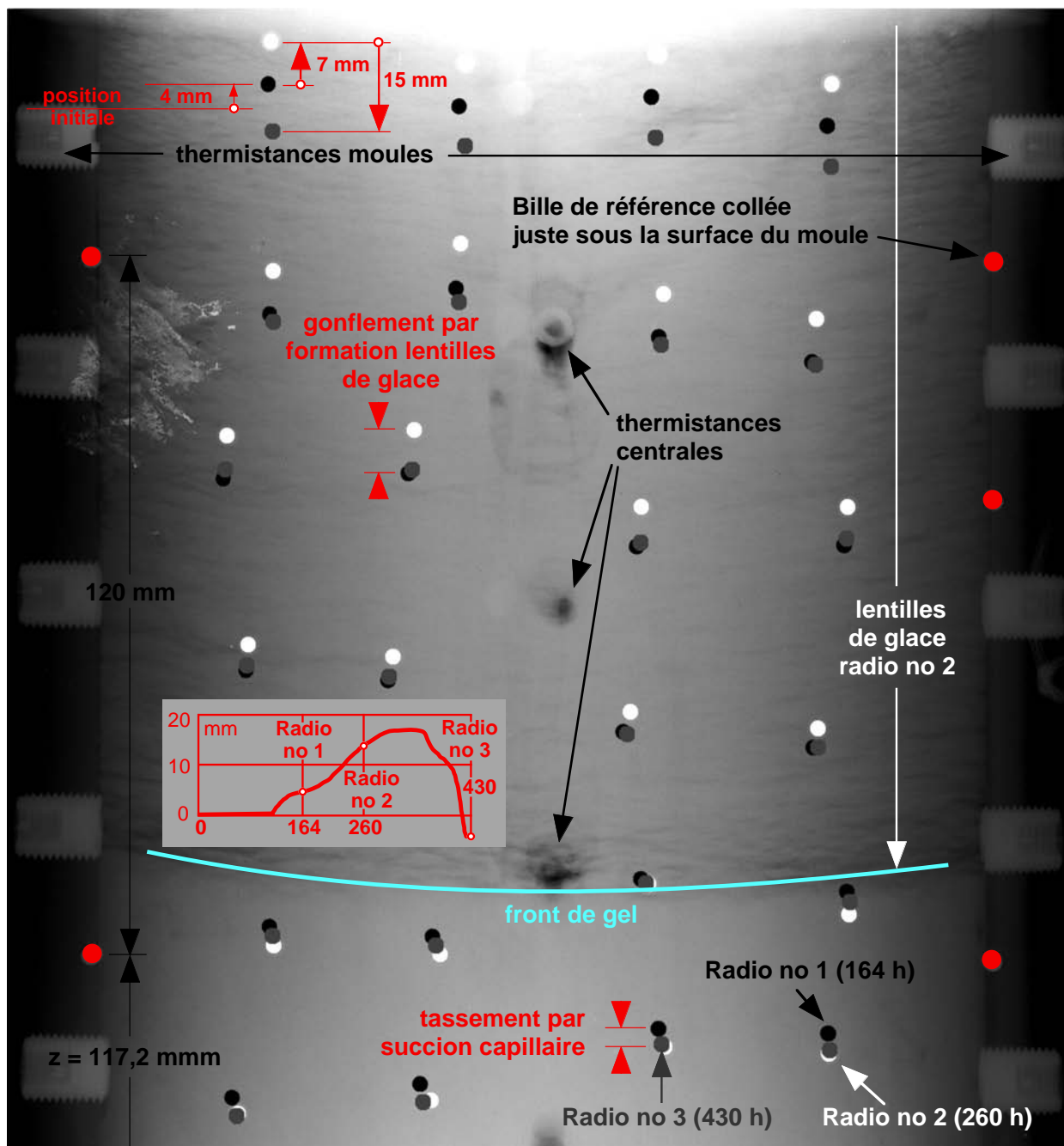
Sur la figure 6-11, le front de gel a pu être dessiné car les lentilles de glace sont bien visibles sur la radiographie no 2. Sa forme est à comparer avec l'isotherme 0°C déterminée par la simulation

numérique calée sur les mesures de températures au moyen des thermistances du moule ; les résultats de cette simulation se trouvent dans le chapitre 8 et l'isotherme correspondant est dessiné sur la figure 6-11.

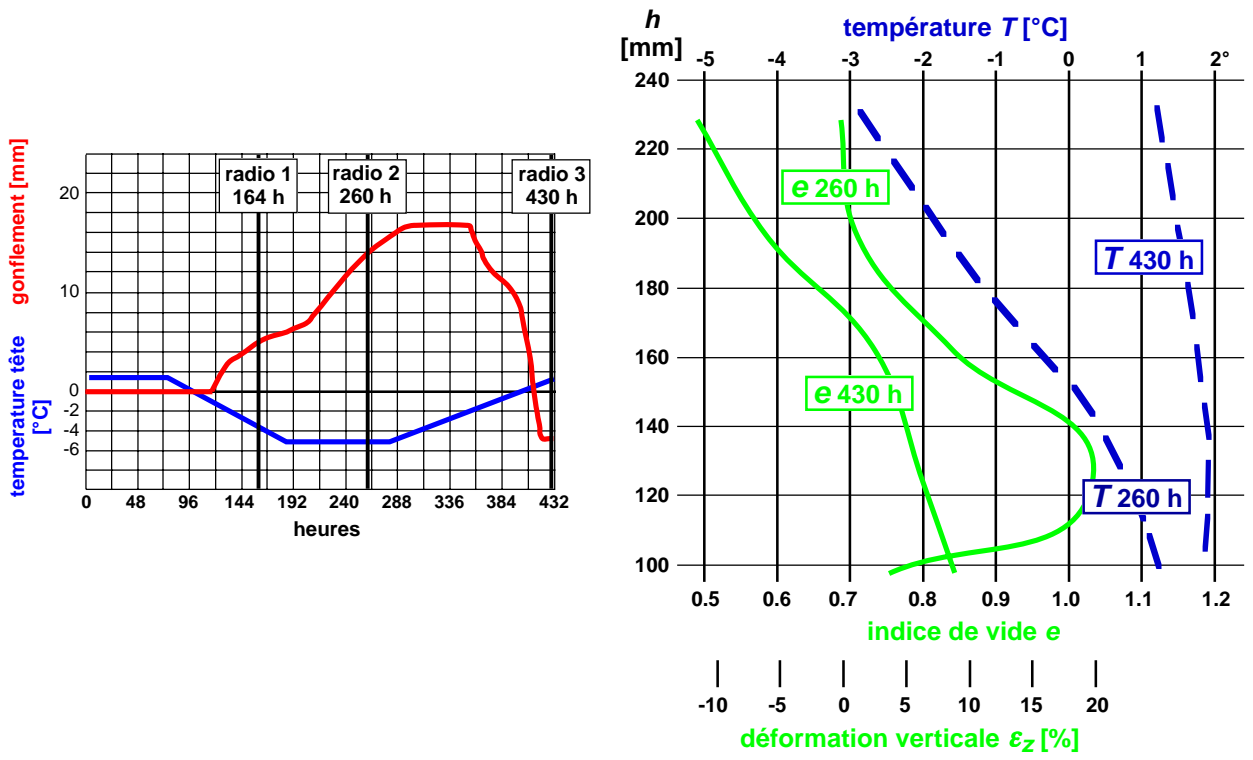
Dans la partie supérieure de l'éprouvette, les gonflements déterminés par les billes de plomb sont tout à fait compatibles avec ceux mesurés en tête avec le capteur de gonflement. Les billes de plomb se déplacent relativement bien verticalement. Les faibles déplacements horizontaux sont probablement dus à des lentilles de glace proches des billes.



6-10 Essai no 9: Déformations dans l'éprouvette dans l'intervalle entre la radiographie initiale et la première



6-11 Essai no 9: Déformations dans l'éprouvette lors des radios no 1, 2 et 3



6-12 Essai no 9: Indices de vide et déformations dérivés des radiographies et températures

6.3 Essai no 10

6.3.1 Buts de l'essai

Les deux buts de l'essai no 10 étaient de :

- Tester, au moyen de radiographies, la mesure des déformations dans l'éprouvette soumise à des charges verticales produites par le vérin de la cellule Bishop.
 - Faire une dernière mise au point de la cellule Bishop et de la mesure de la contrainte verticale.
- Pendant cet essai, seuls les capteurs suivants étaient en fonction : gonflement de la tête et force en tête.

6.3.2 Caractéristiques de l'éprouvette

L'éprouvette est celle de l'essai no 9 et ses caractéristiques sont données par la figure 6-1.

6.3.3 Paramètres donnés

L'isolation extérieure a été enlevée et tous les cryostats arrêtés. L'éprouvette est donc à la température du local.

6.3.4 Résultats

Après quelques tâtonnements, le dispositif est prêt pour les essais avec force verticale.

6.4 Essai no 11

6.4.1 Buts de l'essai

C'est le premier essai complet pour la détermination des modules de déformation résilients au dégel. Une charge verticale constante est, tout d'abord, produite par le vérin Bishop ; elle correspond à celle que l'on rencontre sous la fondation d'une route, à quelque 1,0 m sous la surface de la chaussée. Elle a été fixée à 20 kPa.

Lors du dégel, des cycles de charge-décharge sont appliqués pour évaluer les modules résilients à différents niveaux de l'éprouvette. Ils correspondent à l'effet d'un essieu de camion roulant sur la surface de la chaussée. L'accroissement de la contrainte verticale due à cet essieu a été fixé à 40 kPa ($\sigma_{total} = 20$ à 60 kPa).

Pour l'essai no 11, l'énergie de compactage est de $0,6 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-3}$.

L'essai avait aussi pour but la comparaison des résultats des essais 3 à 8 (même degré de compactage), soumis à une charge verticale statique de 4 kPa, avec ceux obtenus avec la charge verticale de 20 kPa.

6.4.2 Capteurs en place

Pour cet essai, le placement des capteurs dans l'éprouvette et le moule des essais 3 à 8 a été modifié :

- Les thermistances d'un des deux axes du moule sont démontées et remplacées par des thermistances placées lors du compactage sur l'axe de l'éprouvette.
- Seul le tensiomètre inférieur est installé. Son principal but est de tenter de mesurer les surpressions engendrées par les accroissements de charge simulant le passage d'un essieu de camions. Les 3 autres tensiomètres ne sont pas installés pour ne pas altérer la qualité des radiographies.
- Les capteurs TDR ne sont pas installés en permanence car ils altèrent la qualité des radiographies. Ils sont retirés puis remis en place lors de chaque radiographie.
- Pour éviter des conflits avec les thermistances forées sur l'axe de l'éprouvette, le tube central de l'endoscope n'est pas installé dans l'éprouvette. Aucune photographie ne sera ainsi prise pendant cet essai.

6.4.3 Caractéristiques de l'éprouvette

Elles sont approximativement les mêmes que celles des essais no 3 à 8 et sont données sur le tableau 6-13.

6-13 Essai no 11: Caractéristiques du compactage de l'éprouvette

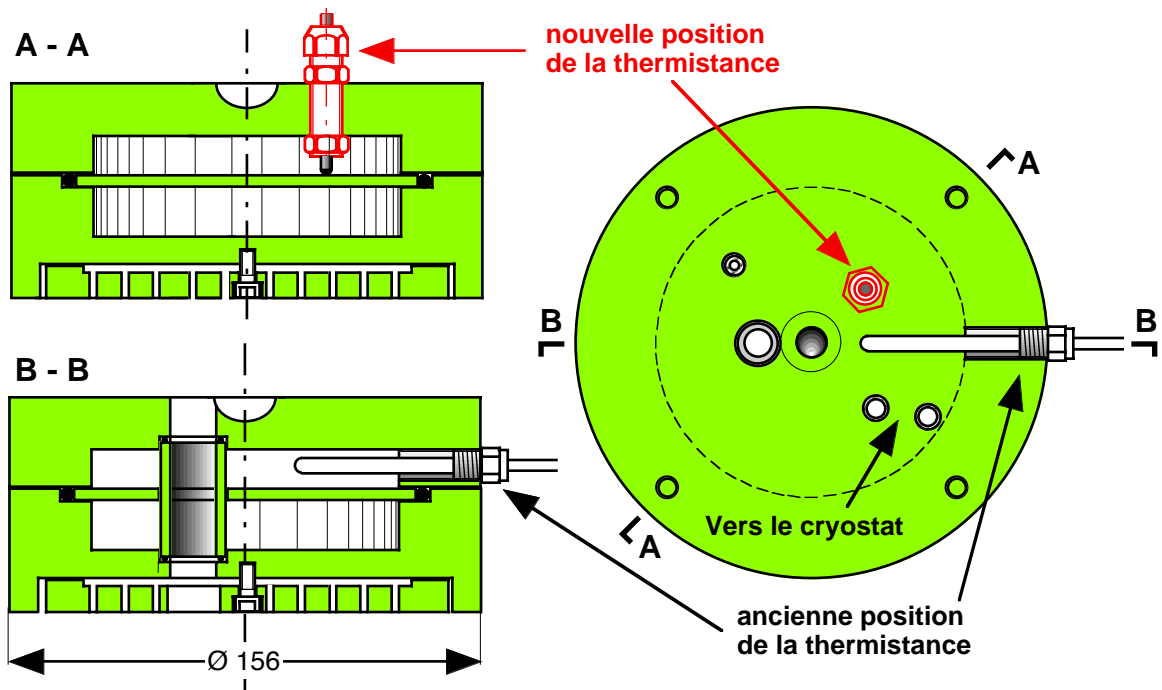
Essai	11
Diamètre max. des grains [mm]	2
Nombre de couches	11
Coups par couche	23
Hauteur de chute [mm]	305
Masse de la dame [kg]	4,5
Energie de compactage [$\text{MJ}\cdot\text{m}^{-3}$]	0,60
Masse volumique éprouvette ρ_d [$\text{t}\cdot\text{m}^{-3}$]	1,88
Teneur en eau init. de l'éprouvette [%]	13,8
Degré de saturation S_r [-], $\rho_s = 2,70 \text{ t}\cdot\text{m}^{-3}$	0,85

6.4.4 Paramètres donnés

Rappelons que l'enceinte d'isolation extérieure est maintenant pourvue de serpentins de refroidissement dont la température du glycol (consigne sur le cryostat) est maintenue à -1°C , ce qui a déterminé une température moyenne de l'air à mi-hauteur entre les deux isolations de $4,0^\circ\text{C}$ avec un écart type de $0,9^\circ\text{C}$. Les températures du local ont été régulières avec une moyenne de $27,4^\circ\text{C}$ et un écart type de $0,3^\circ\text{C}$.

La position de la thermistance de la tête a dû être modifiée car le risque d'arrachement de son câble était trop important avec les déplacements de la tête induits par les contraintes verticales. Il a donc fallu modifier la tête de refroidissement. La figure 6-14 décrit cette modification. La nouvelle position de la thermistance fait que les températures mesurées ne sont pas exactement les mêmes que celles mesurées précédemment. Cette température est d'environ $1,3^\circ\text{C}$ plus élevée que la consigne donnée au cryostat alors que lors des essais précédents elle n'était que d'environ $0,3^\circ\text{C}$ plus élevée. Pour que l'essai no 11 puisse être comparé avec les précédents, dans les figures qui suivent, les mesures de la température de la tête ont été décalées de $1,0^\circ\text{C}$ vers le bas. Ce décalage des températures de la tête de refroidissement provient très probablement de l'éloignement de la nouvelle thermistance par rapport à l'entrée et à la sortie des deux tubes du cryostat.

Les paramètres donnés de l'essai no 11 font l'objet de la figure 6-15.



6-14 Modification de la position de la thermistance de la tête de refroidissement

6.4.5 Résultats

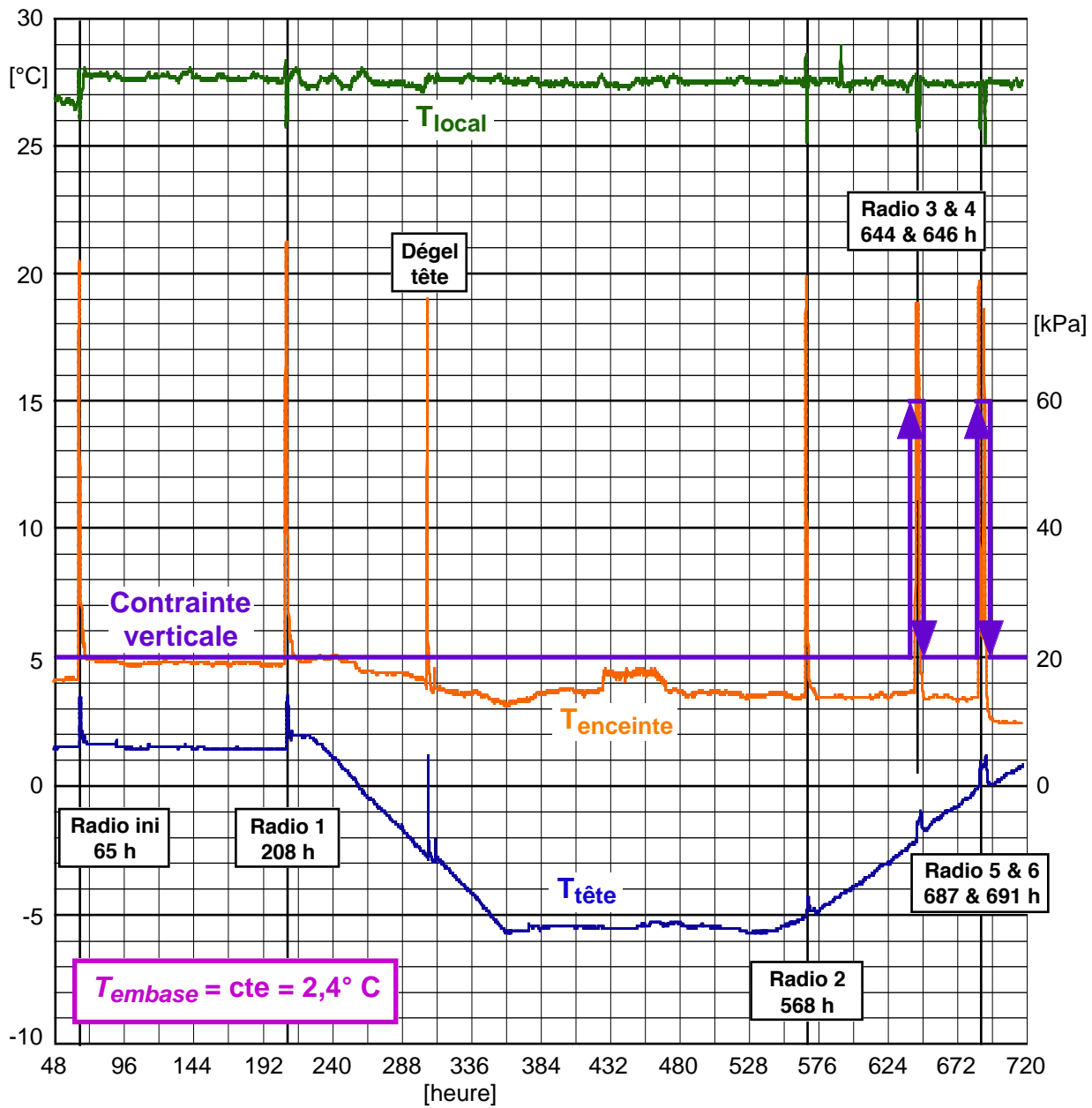
6.4.5.1 Températures (fig. 6-16)

Pendant l'essai no 11, les températures ont été mesurées, en quatre points, sur l'axe de l'éprouvette, ceci en plus des mesures dans la paroi du moule. En outre, les lentilles de glace visibles sur les radiographies ont montré que les isothermes étaient proches de l'horizontal. Les aléas du compactage ont conduit à des positions des thermistances sur l'axe un peu irrégulières.

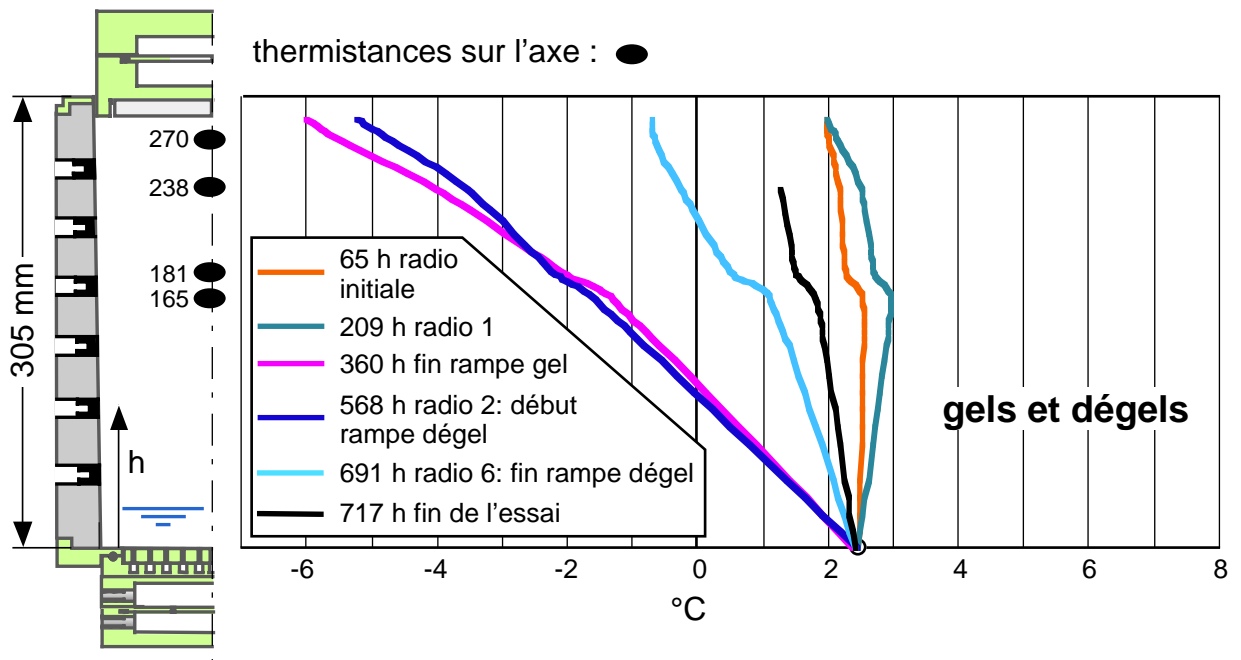
6.4.5.2 Gonflements (fig. 6-17.)

Seuls les gonflements sont montrés et discutés dans ce paragraphe. Le circuit du vase de Mariotte a présenté de telles pertes qu'il est inutile d'en discuter. Le capteur de gonflement a, en outre, subi quelques avatars pendant l'essai ; cependant, grâce aux radiographies, la courbe de gonflement – tassement a pu être « récupérée ».

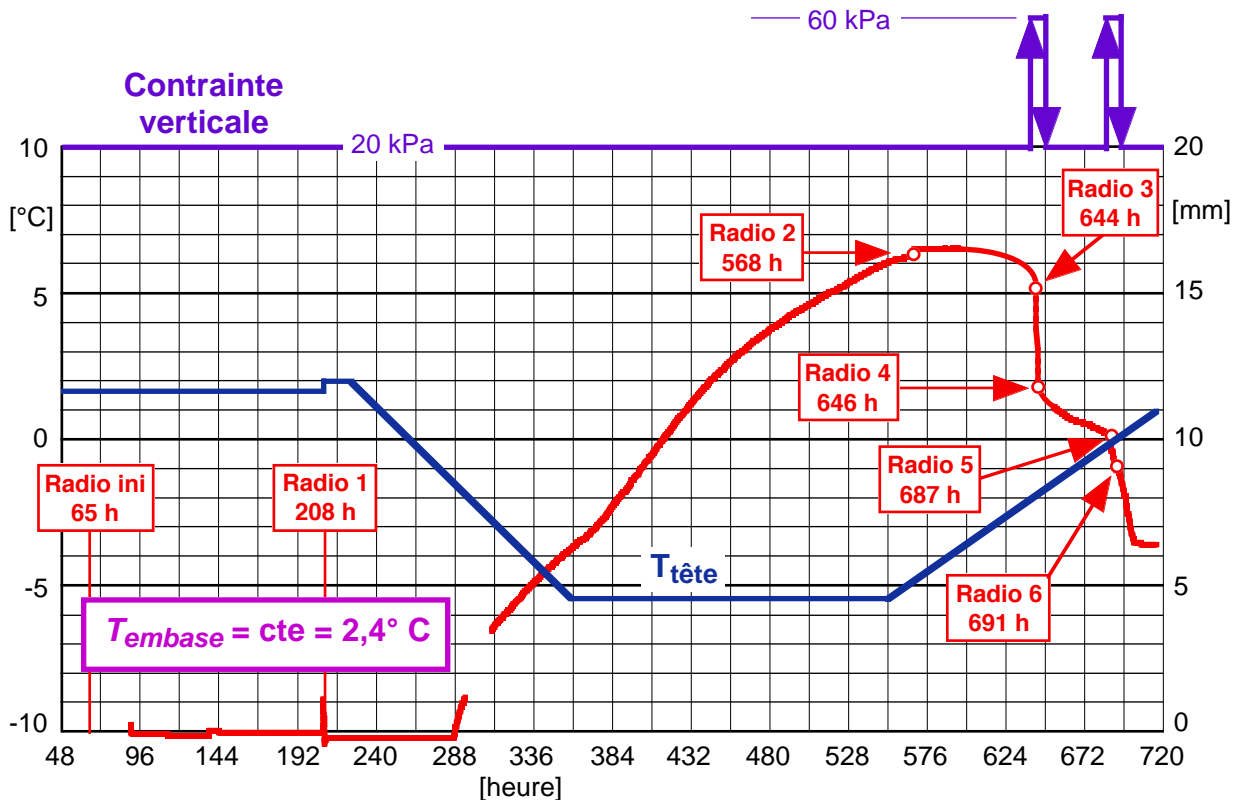
En fin d'essai, après arrêt des cryostats, une charge à 60 kPa a été provoquée pour déterminer le module de déformation hors-gel de l'éprouvette. Ce cycle n'est pas montré sur la figure 6-17. Il sera discuté au paragraphe 6.4.5.7.



6-15 Essai no 11: Températures tête, embase, enceinte et extérieur, et contrainte verticale



6-16 Essai no 11: Températures sur l'axe de l'éprouvette

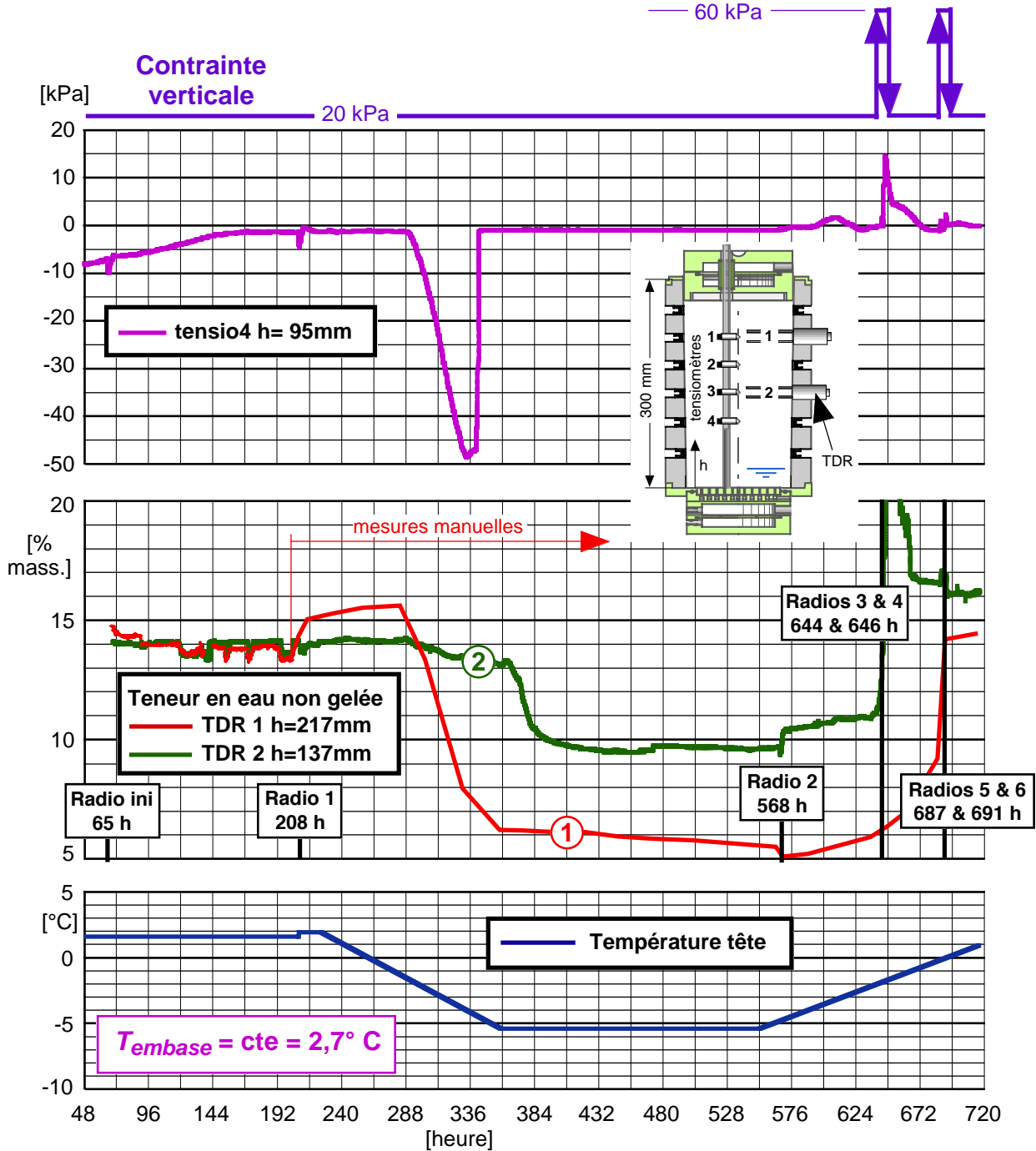


6-17 Essai no 11: Gonflements et tassements

6.4.5.3 Succion capillaire (haut fig. 6-18)

Seul le tensiomètre le plus profond (no 4) était installé pendant l'essai no 11. Son rôle était surtout de tenter de mesurer l'augmentation de la pression interstitielle lors du passage de la contrainte verticale de 20 à 60 kPa. Pendant le gel et comme cela a été, malheureusement,

souvent le cas, il s'est désamorcé sous une succion de quelque 50 kPa et de l'air a pénétré dans son tube. Les valeurs de la mesure de la pression interstitielle lors du passage de la contrainte verticale de 20 à 60 kPa ne sont ainsi pas garanties. Elles sont cependant plausibles. Cette surpression atteint un maximum de 15 kPa.



6-18 Essai no 11: Succion capillaire et teneur en eau non gelée

6.4.5.4 Teneur en eau non gelée (centre fig. 6-18)

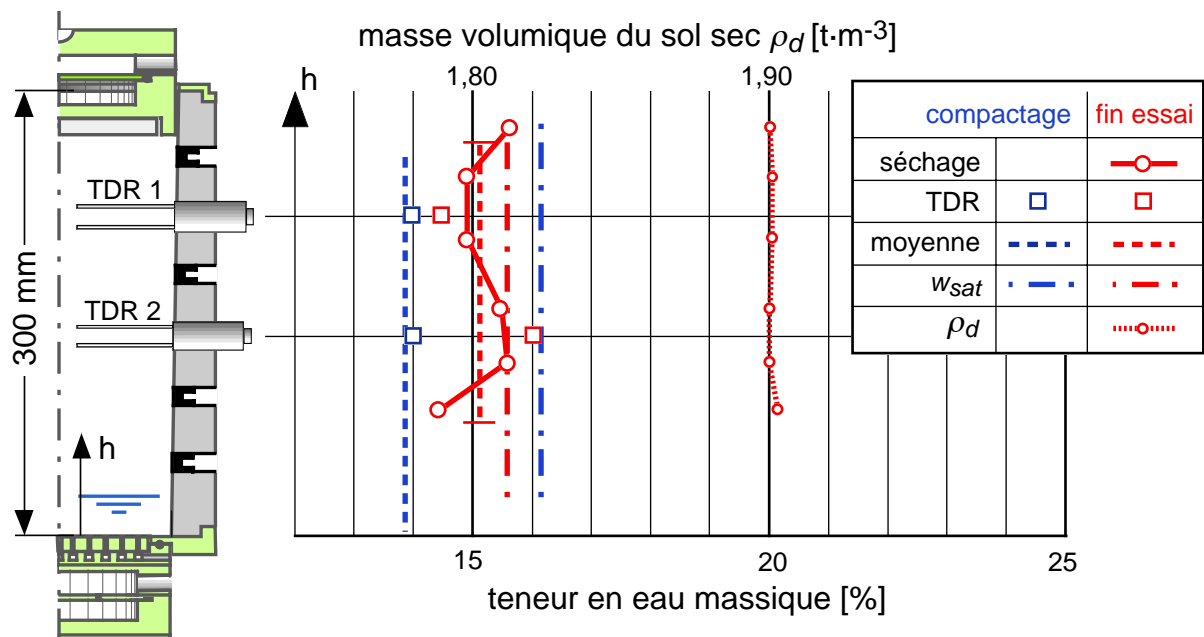
Une antenne du capteur TDR no 1 s'est cassée lors de son extraction pour la radiographie no 1. Ce capteur avec mesure continue a été remplacé par un capteur TDR avec mesure manuelle qui a

très bien fonctionné pendant tout l'essai et a subi sans dommage toutes les extractions nécessaires aux radiographies.

Le capteur no 2 (à mesure automatique continue) était laissé dans l'éprouvette pendant les radiographies. Il a bien fonctionné jusqu'aux radios no 3 et 4 (644 et 646 heures après le début de l'essai). Il a alors donné des valeurs aberrantes inexplicables.

6.4.5.5 Teneurs en eau en fin d'essai (fig. 6-19)

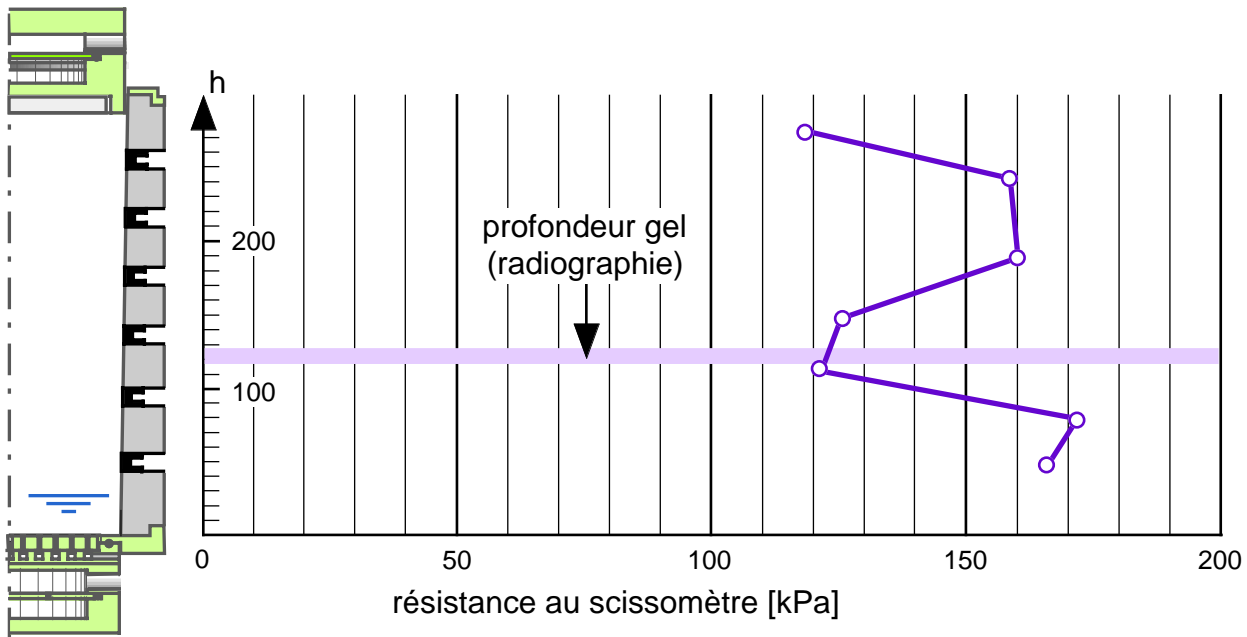
Ces mesures sont différentes de celles des essais précédents. Cela s'explique très bien par le fait que l'éprouvette a été recompactée par les cycles de charge et décharge. Les valeurs mesurées s'approchent de celles obtenues après le compactage de l'éprouvette.



6-19 Essai no 11: Teneurs en eau après compactage et à la fin de l'essai

6.4.5.6 Résistance au cisaillement (fig. 6-20)

Ces résistances au cisaillement mesurées en fin d'essai avec le scissomètre Geonor correspondent à l'éprouvette recompactée par les cycles de charge – décharge. Cependant l'effet de la formation de la grosse lentille sur le front de gel est encore visible.



6-20 Essai no 11: Résistances au cisaillement en fin d'essai

6.4.5.7 Détermination des modules résilients

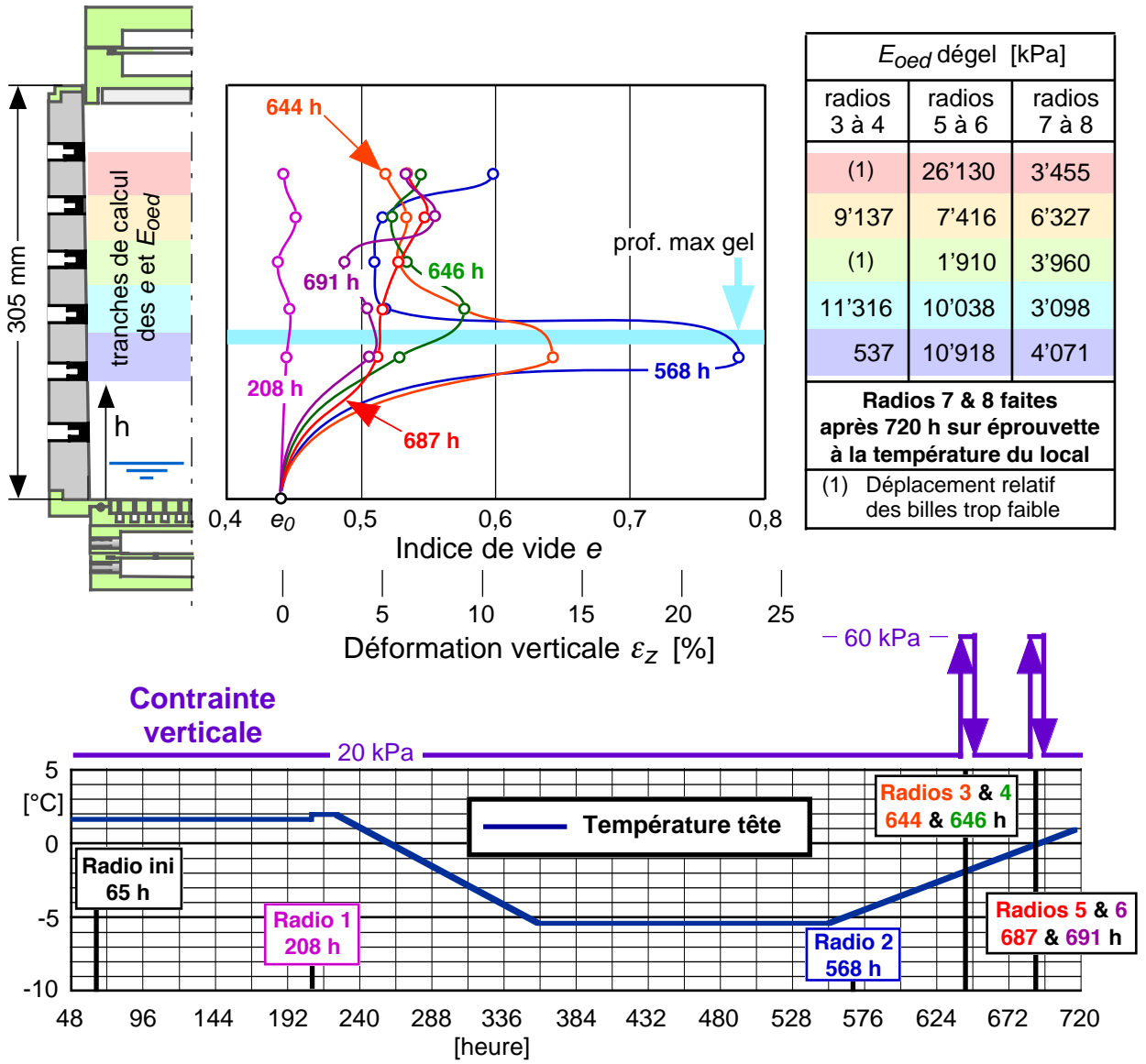
C'est le but principal de l'essai no 11. Ces modules ont été déterminés par tranches sur la base des radiographies. Les temps des radiographies ont été choisis de façon à déterminer les modules de déformation à des moments caractéristiques, à savoir lors de la fonte de la grosse lentille du front de gel (radios no 3 et 4) et lors de la fonte des lentilles supérieures (radios no 5 et 6). Il est, bien entendu, que ces temps sont un peu arbitraires et que les modules correspondants sont des approximations.

La position des tranches et leurs épaisseurs sont fonction de la position des billes de plomb à l'intérieur de l'éprouvette. La figure 6-21 donne les valeurs des indices de vide et des modules obtenus en fonction des zones de l'éprouvette et de l'état des lentilles de glace. Parmi toutes les valeurs obtenues, il est intéressant de noter le très faible module de quelque 500 kPa obtenu lors de la fonte de la grosse lentille du front de gel. Au-dessus de cette lentille, le module le plus faible est de quelque 2000 kPa. Ces modules dépendent aussi de l'intervalle de temps entre les deux radiographies permettant de les déterminer. Cet intervalle a été déterminé pour obtenir approximativement la fin de la consolidation primaire, comme dans un essai oedométrique. La figure 6-23 est un exemple d'une de ces courbes de consolidation.

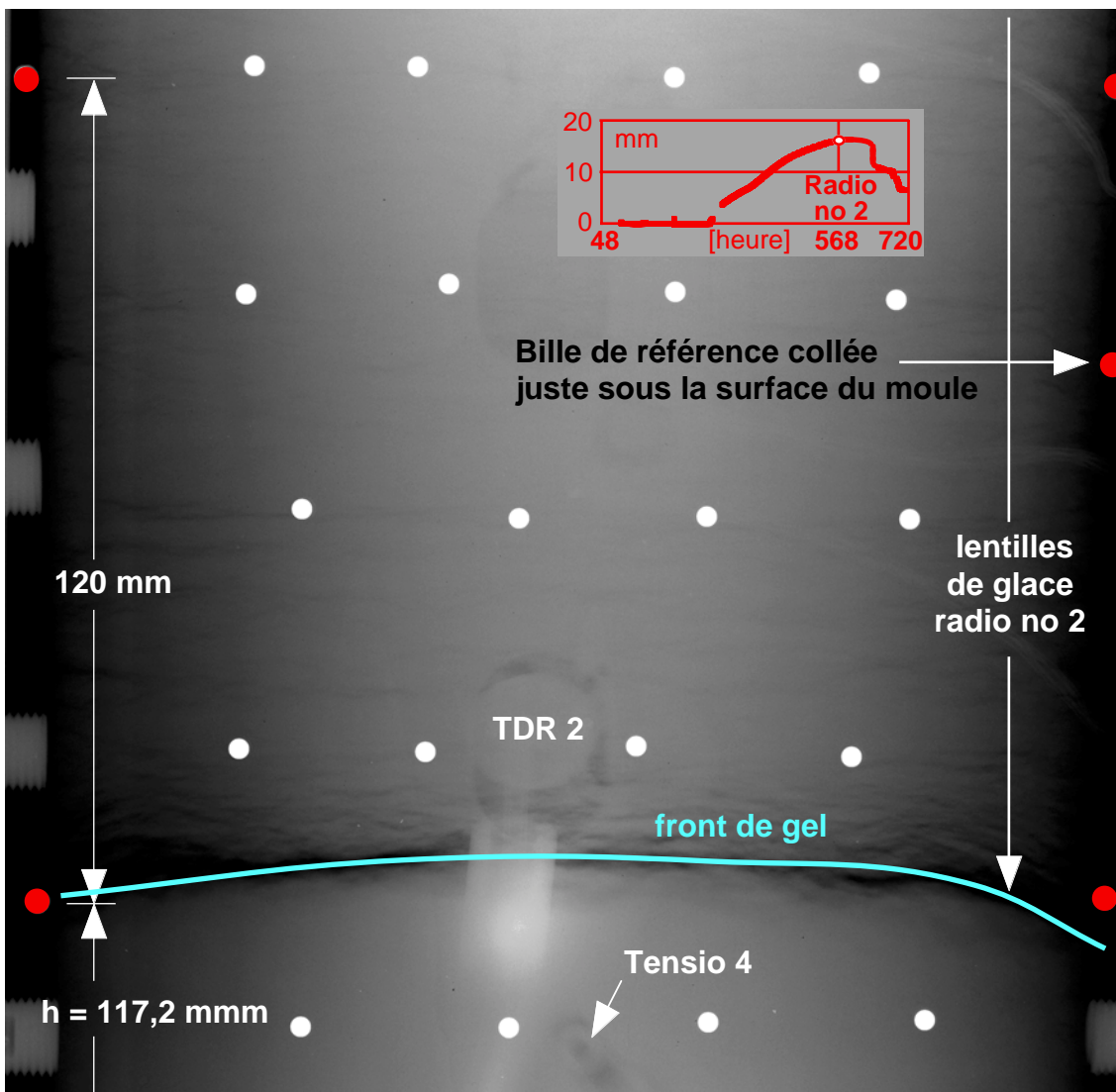
Les radiographies 7 et 8, dont les modules oedométriques sont donnés sur la figure 6-21, ont été réalisées en fin d'essai, après l'arrêt des cryostats, lorsque les températures à l'intérieur de l'éprouvette étaient largement positives et presque constantes. La figure 6-23 décrit la courbe de consolidation correspondante.

La radiographie no 2 (fig. 6-22) prise 568 heures après le début de l'essai, à savoir juste avant le début du réchauffement de l'éprouvette lorsque que les gonflements avaient approximativement atteint leur maximum est intéressante. Elle montre l'importante lentille qui s'est formée sur le

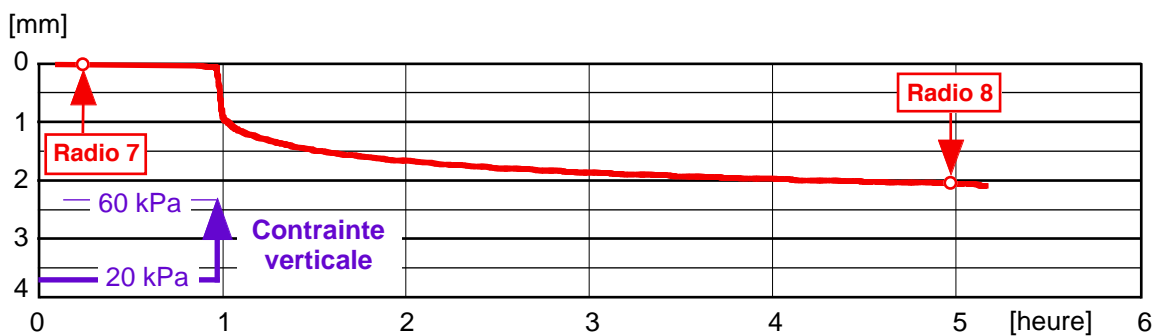
front de gel, lentille qui est presque horizontale, ce qui démontre la presque horizontalité des isothermes.



6-21 Essai no 11: Indices de vide et modules résilients



6-22 Essai no 11: Radiographie no 2 (568 heures)



6-23 Essai no 11: Charge hors-gel en fin d'essai

6.5 Essai no 12

6.5.1 Buts de l'essai

C'est le deuxième essai complet pour la détermination des modules de déformation résilients au dégel. Ces caractéristiques sont quasiment les mêmes que celles de l'essai no 11. La seule différence importante est l'énergie de compactage de l'éprouvette qui est, pour cet essai, de quelque $0,4 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-3}$.

C'est le dernier essai de la recherche

6.5.2 Capteurs en place

Pour cet essai, le placement des capteurs dans l'éprouvette et le moule est un peu le même que celui de l'essai no 11 :

- 4 thermistances placées sur l'axe de l'éprouvette.
- Seul le tensiomètre inférieur est installé. Son principal but est de tenter de mesurer les surpressions engendrées par les accroissements de charge simulant le passage d'un essieu de camions. Les 3 autres tensiomètres ne sont pas installés pour ne pas altérer la qualité des radiographies.
- Les capteurs TDR ne sont pas installés. L'essai no 11 a en effet montré la difficulté du retraitement et de la réinsertion de ces capteurs dans l'éprouvette. Les antennes de deux de ces capteurs ont été cassées !
- Pour éviter des conflits avec les thermistances placées sur l'axe de l'éprouvette, le tube central de l'endoscope n'est pas installé dans l'éprouvette. Aucune photographie ne sera ainsi prise pendant cet essai.

6.5.3 Déroulement de l'essai

L'essai no 12 est le dernier essai de cette recherche et il aurait dû se dérouler sans problème. En fait, c'est celui qui s'est le moins bien déroulé ! Il y a eu, tout d'abord, une panne d'un des cryostats. Ensuite, l'essai s'étant déroulé pendant un mois de juillet assez humide et comme le local n'est climatisé qu'en température mais pas en humidité de l'air, la tête s'est fortement englacée ce qui a provoqué son blocage en début de l'essai. Il y a eu encore des pertes dans le circuit du vérin, ce qui a demandé son fréquent recalage. Enfin, le système d'acquisition de données est tombé en panne.

Une grande partie de l'essai a pu cependant être « récupéré » grâce aux radiographies et à la mesure du volume d'eau actionnant le vérin. Pour ces raisons, seule la deuxième partie de l'essai est exploitée, à savoir à partir de 264 heures qui correspondent à la reprise de la rampe de dégel.

6.5.4 Caractéristiques de l'éprouvette

Elles sont données sur le tableau 6-24.

6-24 Essai no 12: Essai no 11 : Caractéristiques du compactage de l'éprouvette

Essai	12
Diamètre max. des grains [mm]	2
Nombre de couches	11
Coups par couche	14
Hauteur de chute [mm]	305
Masse de la dame [kg]	4,5
Energie de compactage [$\text{MJ}\cdot\text{m}^{-3}$]	0,37
Masse volumique éprouvette ρ_d [$\text{t}\cdot\text{m}^{-3}$]	1,68
Teneur en eau init. de l'éprouvette [%]	18,9
Degré de saturation S_r [-], $\rho_s = 2,70 \text{ t}\cdot\text{m}^{-3}$	0,84

6.5.5 Paramètres donnés

Rappelons que l'enceinte d'isolation extérieure est maintenant pourvue de serpentins de refroidissement dont la température du glycol (consigne sur le cryostat) est maintenue à -1°C , ce qui a déterminé une température moyenne de l'air à mi-hauteur entre les deux isolations de $3,7^\circ \text{C}$ avec un écart type de $0,3^\circ \text{C}$ (périodes des radios déduites). Les températures du local ont été régulières avec une moyenne de $28,3^\circ \text{C}$ et un écart type de $0,5^\circ \text{C}$.

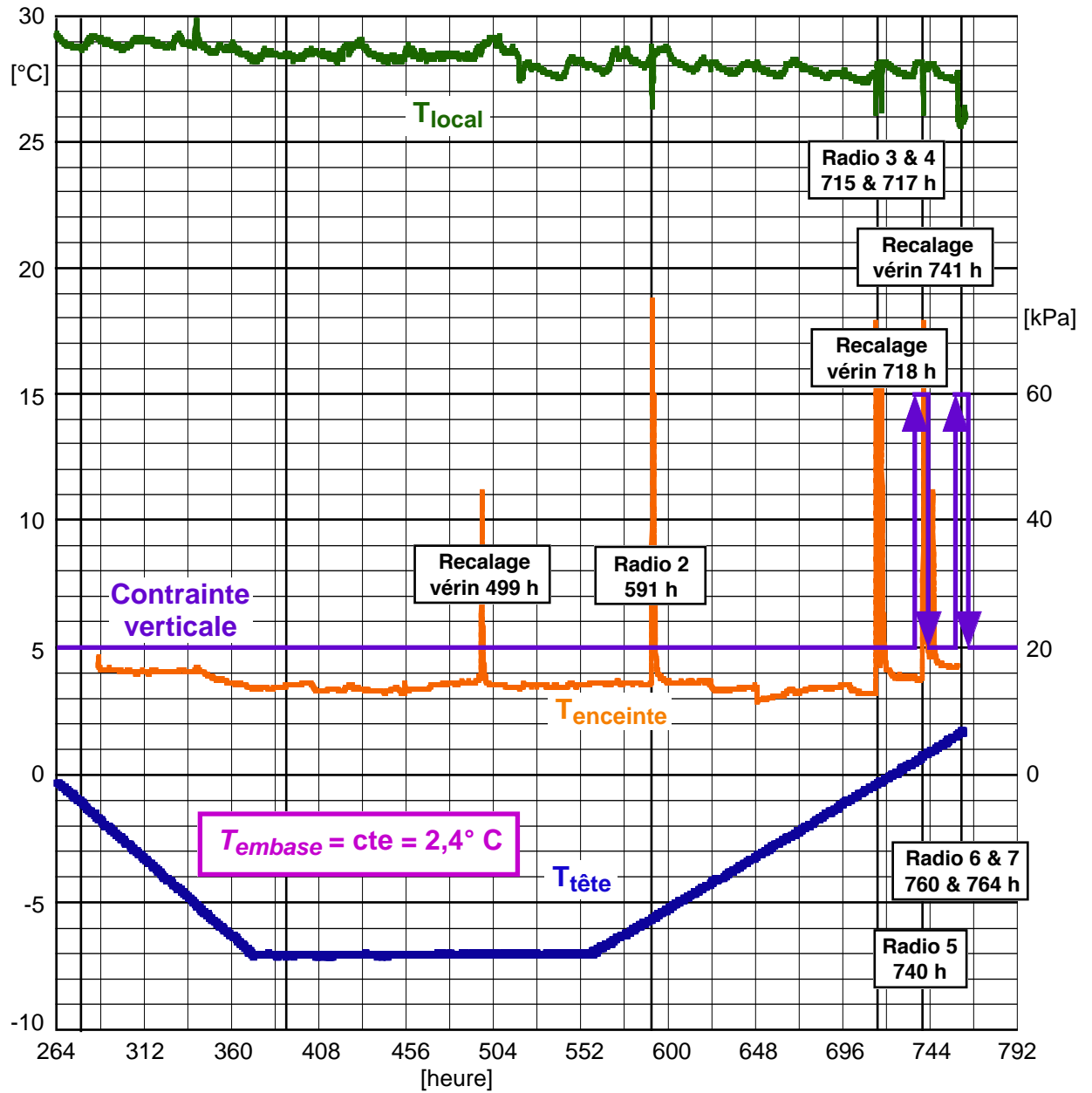
Comme cela a été expliqué, pour l'essai no 11, au paragraphe 6.4.4, la position de la thermistance de la tête a dû être modifiée et sa température est d'environ $1,0^\circ \text{C}$ plus élevée que celle des essais avant modification de la tête. Pour que l'essai no 12 puisse être comparé aux précédents, dans les figures qui suivent, les mesures de la température de la tête ont été ainsi décalées de $1,0^\circ \text{C}$ vers le bas.

Les paramètres donnés de l'essai no 12 font l'objet de la figure 6-25

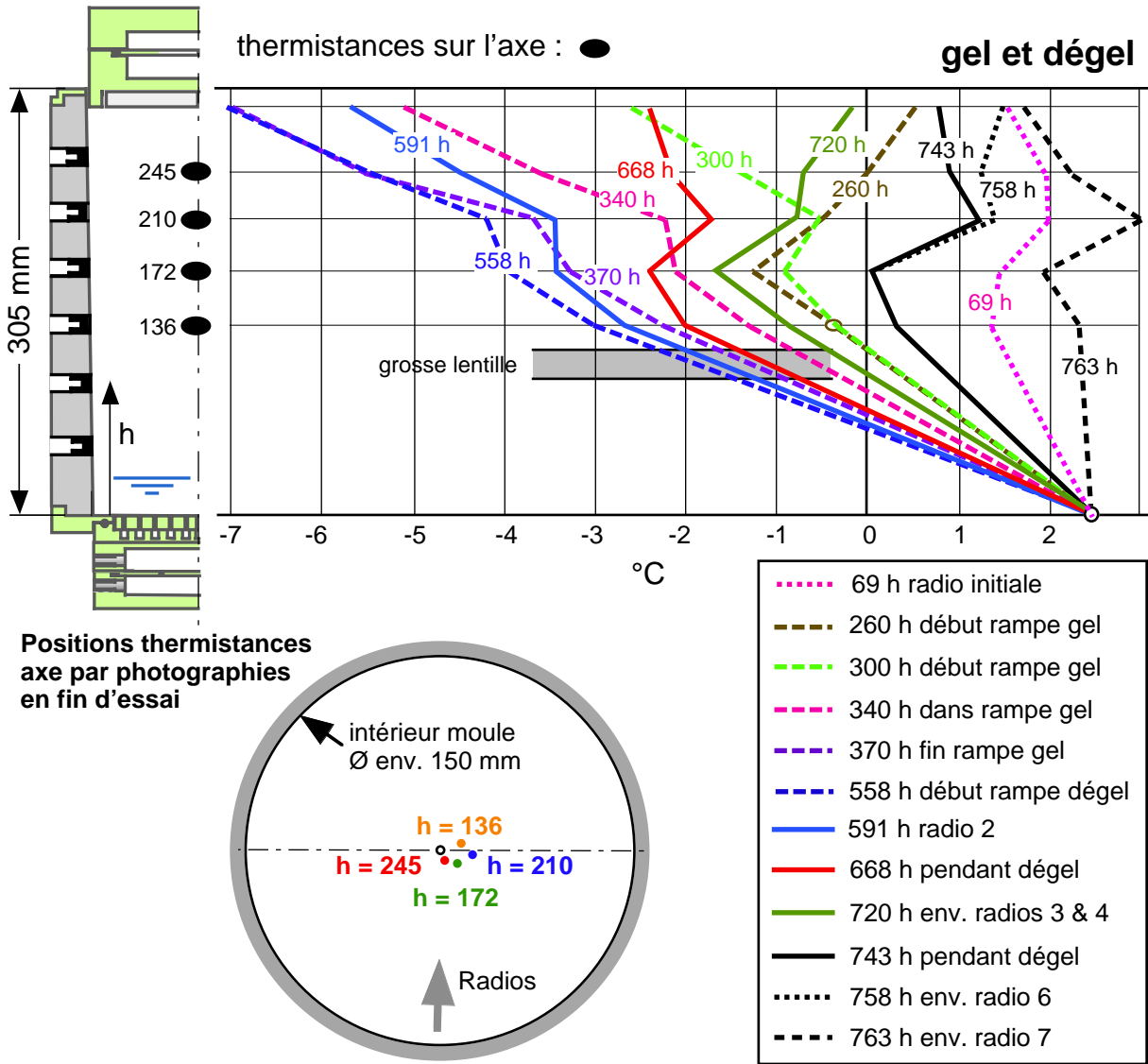
6.5.6 Résultats**6.5.6.1 Températures (fig. 6-26)**

Pendant l'essai no 12, les températures ont été mesurées, en quatre points, sur l'axe de l'éprouvette au moyen de thermistances placées lors du compactage de l'éprouvette.

Toutes les courbes donnant la température en fonction de la profondeur présentent une curieuse bosse marquée à la hauteur de la thermistance placée à $h = 210 \text{ mm}$, ceci déjà pour la première courbe (69 heures). Cette bosse ne peut provenir que d'un artefact, mais lequel ? En fin d'essai, les quatre thermistances ont été électriquement vérifiées et leurs positions dans le moule contrôlées (fig. 6-26). La thermistance à $h = 210 \text{ mm}$ est la plus excentrée par rapport à l'axe du moule mais seulement de 12 mm . En outre, ces positions ont pu aussi être vérifiées sur les radiographies. Un problème électrique est la cause la plus plausible, car, lors du gel, les thermistances sont soumises à des efforts de traction importants. Lors de l'essai no 11, une des perles d'une thermistance a été arrachée.



6-25 Essai no 12: Températures tête, embase, enceinte et extérieur, et contrainte verticale



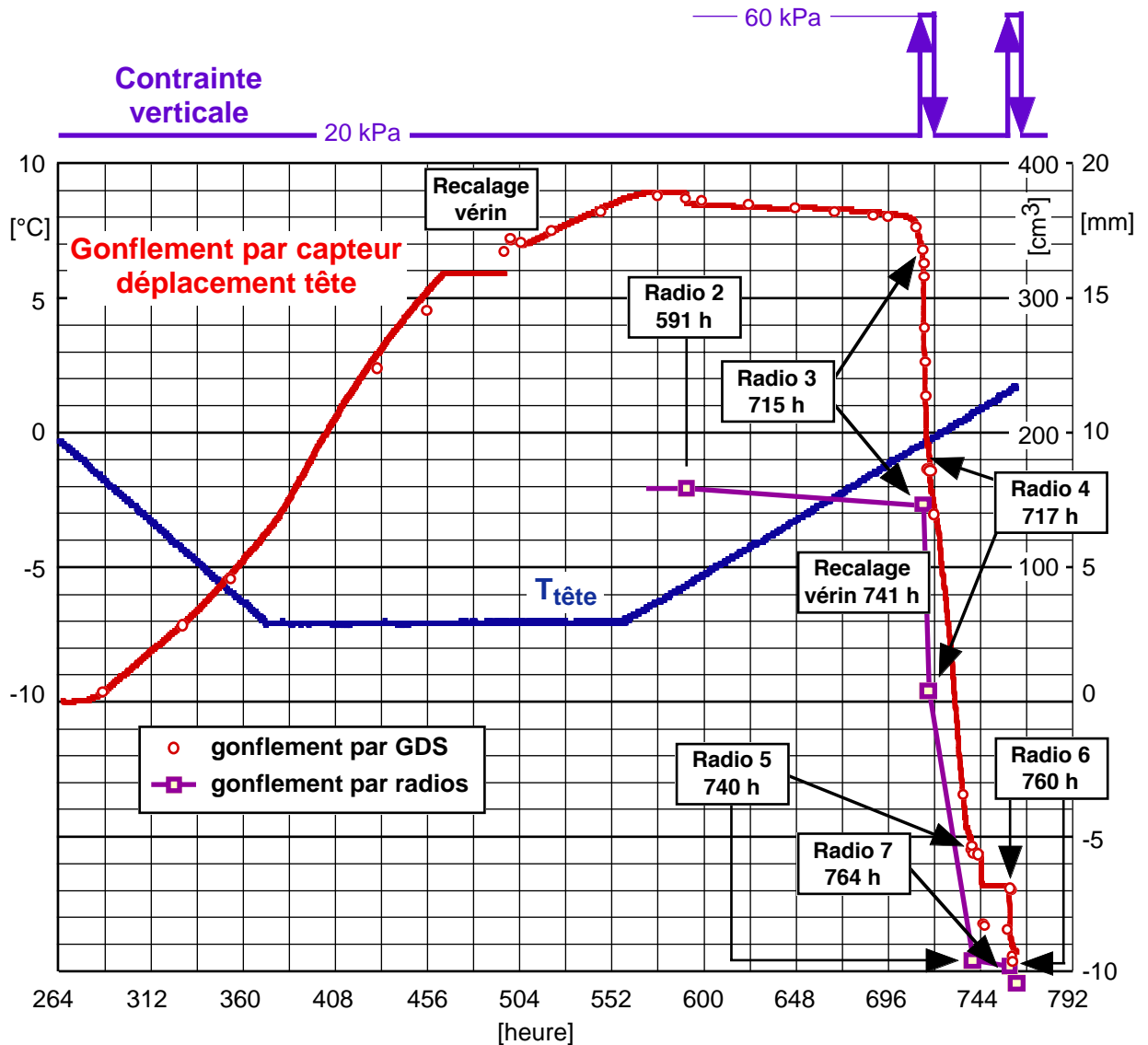
6-26 Essai no 12: Températures sur l'axe de l'éprouvette

6.5.6.2 Gonflements (fig. 6-27)

L'essai no 12 a donc été perturbé par de nombreux problèmes (voir 6.5.3). La figure 6-27 est donc un peu particulière par rapport à celle des autres essais. Elle montre :

- le gonflement mesuré avec le capteur de déplacement placé sur la tête de l'éprouvette,
- le gonflement mesuré par radiographie à la hauteur du premier rang des billes de plomb.

Arbitrairement, le gonflement mesuré avec le capteur de déplacement placé sur la tête de l'éprouvette a été admis nul au début de la période examinée (264 heures après le début de l'essai).



6-27 Essai no 12: Gonflements

On peut constater sur la figure 6-27 que:

- La mesure du gonflement au moyen du capteur de déplacement placé sur la tête de l'éprouvette correspond à celle réalisée par le volume d'eau injecté par le contrôleur GDS dans le vérin.
- L'évaluation du gonflement fait au moyen des radiographies (moyenne des déplacements des deux billes de plomb centrales de leur rangée supérieure) ne correspond pas du tout à celui mesuré sur la tête de l'éprouvette. Au début du dégel (radio no 2), la différence est de quelque 10 mm. Cette rangée se trouve, avant le début du gel, à 12 mm sous la face inférieure de la tête. Ainsi, les gonflements de la zone comprise entre cette face et la première rangée de billes ne sont pas pris en compte. Des gonflements atteignant presque l'épaisseur de cette mince couche de l'éprouvette paraissent cependant trop élevés. Lors des radiographies, les réflexions du rayonnement sur la tête ne permettent malheureusement pas de faire apparaître les lentilles de cette zone. Le capteur de déplacement est placé sur le bord de la tête et subi ainsi fortement

l'effet d'un basculement de celle-ci. Lors de tous les aléas qu'à subi cet essai, il a dû se produire de tels basculements, par exemple à l'occasion des calages du vérin. Cependant cette explication est contredite par la bonne corrélation entre les mesures du capteur et celles du contrôleur GDS.

6.5.6.3 Succion capillaire

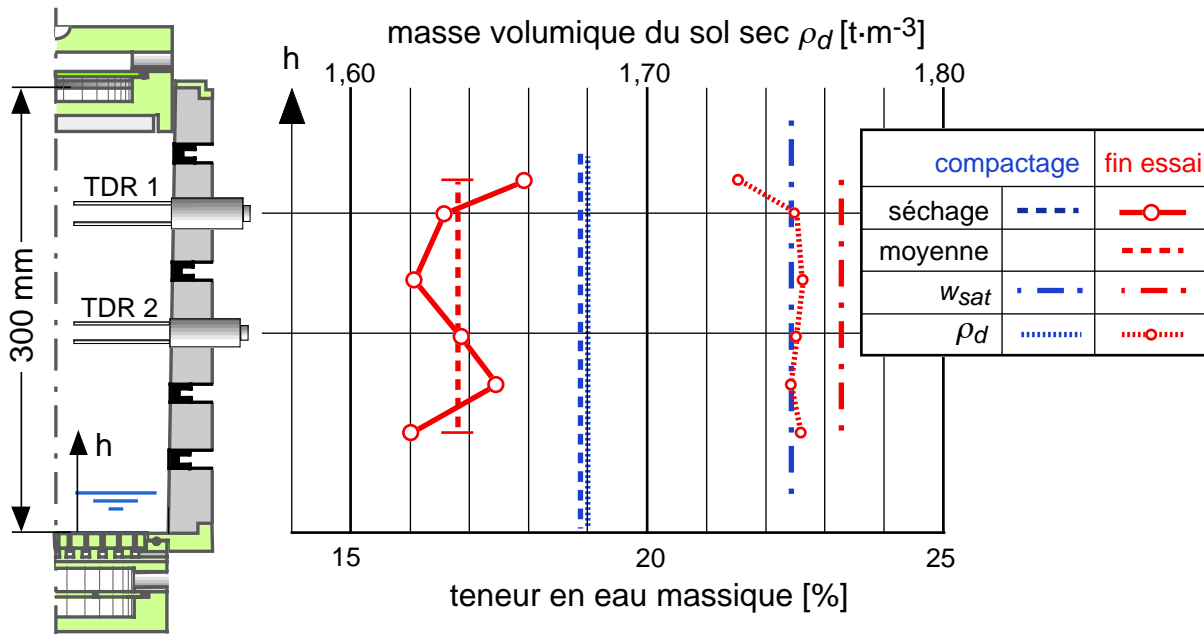
Le tensiomètre inférieur, le seul mis en place, n'a pas fonctionné correctement et les mesures correspondantes n'ont pas d'intérêt.

6.5.6.4 Teneur en eau non gelée

Aucun capteur TDR n'a été placé dans l'éprouvette pendant l'essai no 12.

6.5.6.5 Teneurs en eau en fin d'essai (fig. 6-28)

Comme pour l'essai no 11, ces mesures sont différentes de celles des essais précédents. Cela s'explique très bien par le fait que l'éprouvette a été recompactée par les cycles de charge et décharge. Si, lors de l'essai no 11, les valeurs en fin d'essai s'approchaient de celle du début, ce n'est plus le cas pour l'essai no 12 dont l'éprouvette était faiblement compactée. L'effet du compactage par les deux cycle de charge et décharge se fait encore plus sentir que pour l'essai no 11 : les valeurs des teneurs en eau sont plus faibles en fin d'essai qu'au début et c'est bien évidemment le contraire pour les masses volumiques.

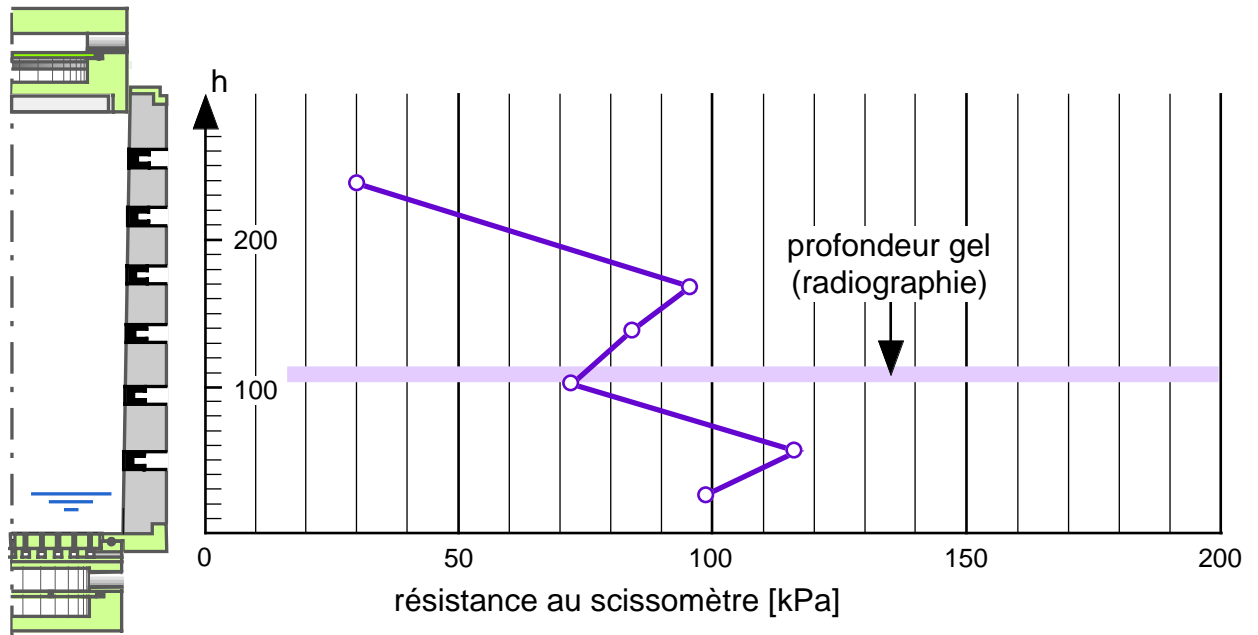


6-28 Essai no 12: Teneurs en eau après compactage et à la fin de l'essai

6.5.6.6 Résistance au cisaillement (fig. 6-29)

Ces résistances au cisaillement mesurées en fin d'essai avec le scissomètre Geonor sont plus faibles que celles obtenues sur l'éprouvette de l'essai no 11, plus fortement compactée. Comme

dans ce dernier essai, l'effet de la grosse lentille de glace correspondant à la profondeur maximale du gel, se fait bien sentir.



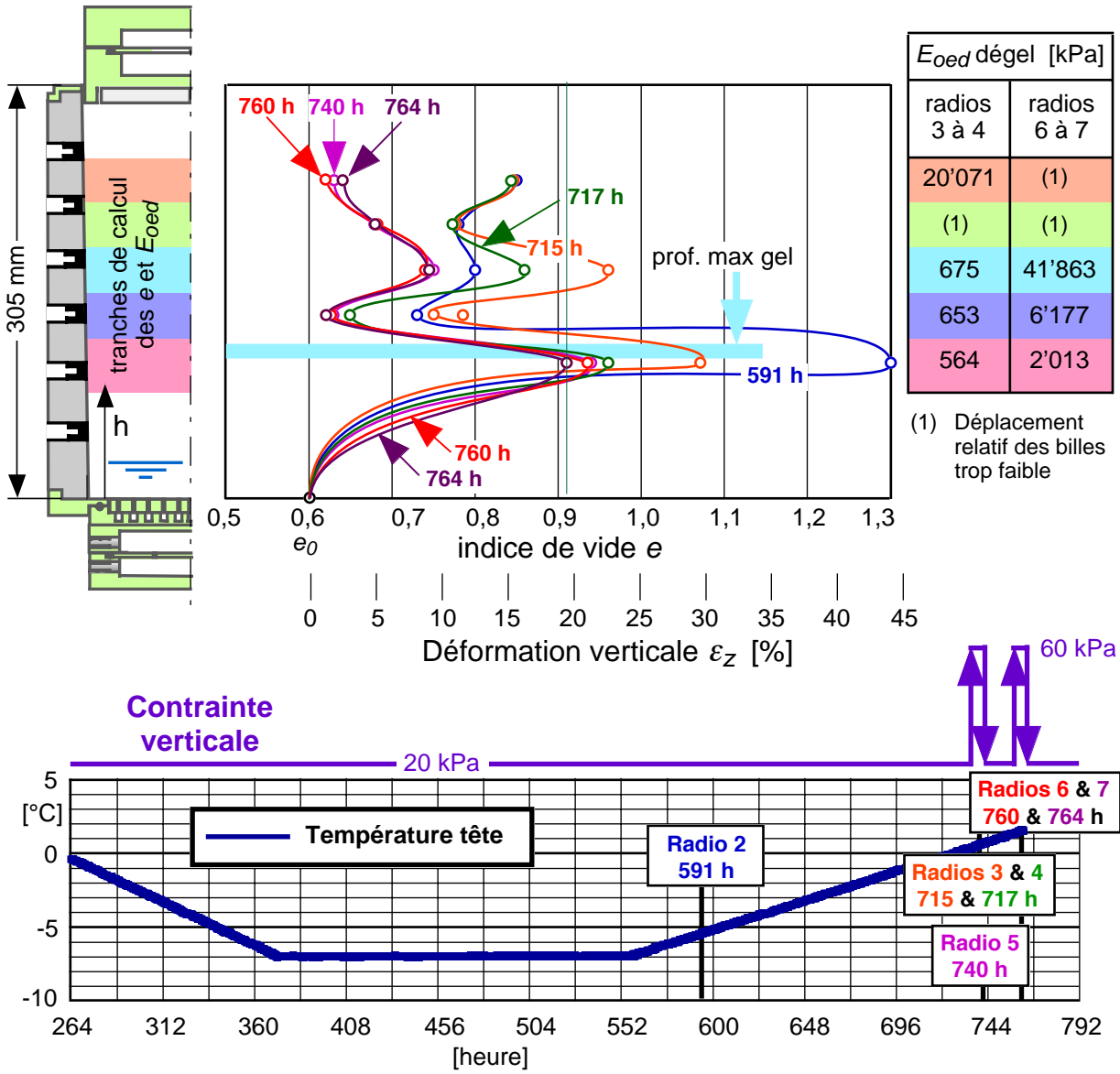
6-29 Essai no 12: Résistance au cisaillement en fin d'essai

6.5.6.7 Détermination des modules résilients (fig 6-30)

C'est, comme pour l'essai no 11, le but principal de l'essai no 12. Ces modules ont été déterminés par tranches sur la base des radiographies (voir chapitre 4).

La figure 6-30 donne les valeurs des modules obtenues en fonction des zones de l'éprouvette et de l'état des lentilles de glace. La position des tranches et leurs épaisseurs sont fonctions de la position des billes de plomb à l'intérieur de l'éprouvette. Comme les lentilles de glace se forment de façon un peu aléatoire, elles ne correspondent ainsi pas à la position des billes. La détermination des indices de vide et des modules oedométriques est ainsi approximative.

Par rapport à l'essai no 11 réalisé sur une éprouvette plus fortement compactée que celle de l'essai no 12, on constatera que les indices de vide sont beaucoup plus élevés et que les modules de déformation en général plus faibles. Cela est tout à fait normal. Il faut cependant se rappeler que l'essai no 11 s'est déroulé dans des conditions difficiles et ainsi utiliser avec prudence les valeurs obtenues.



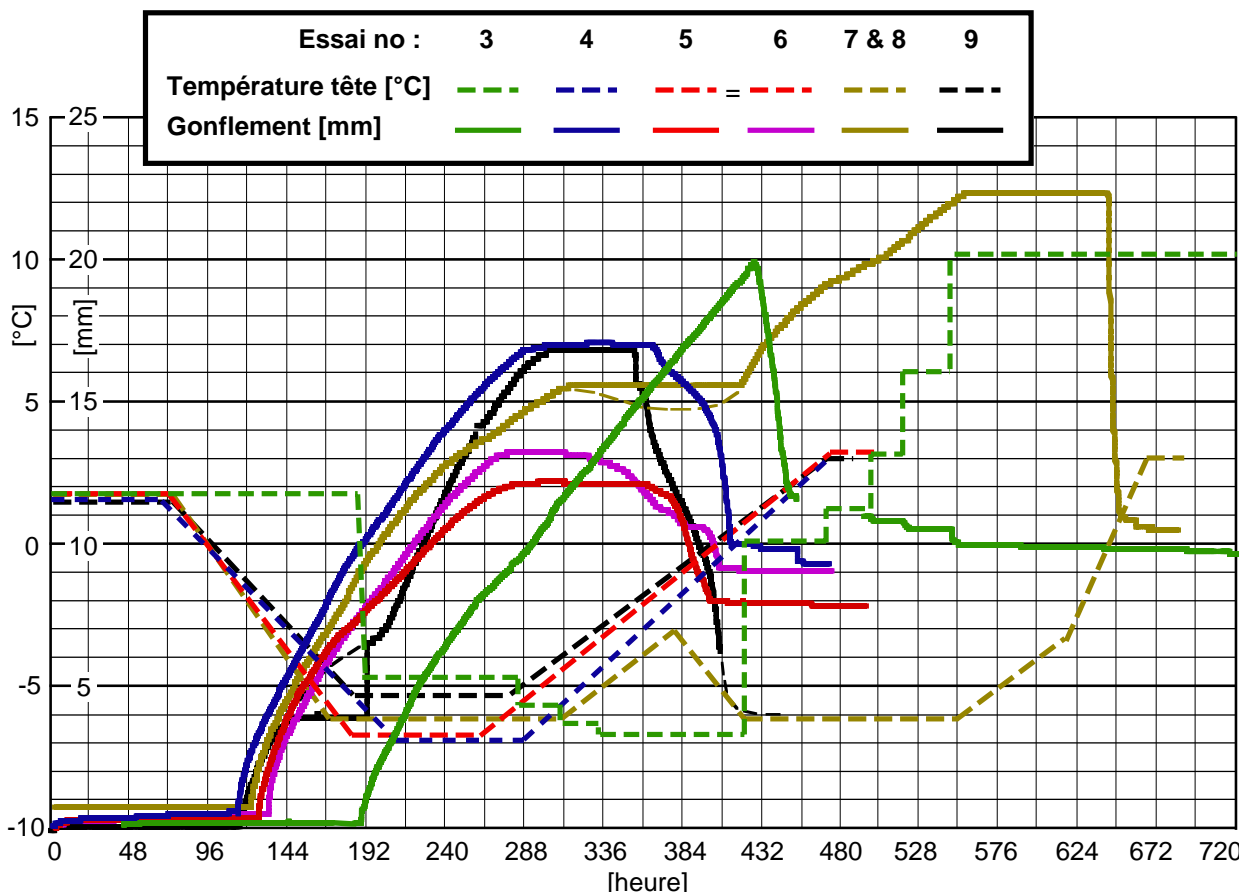
6-30 Essai no 12: Indices de vide et modules résilients

7

Comparaison et discussion des résultats des essais

7.1 Gonflements des essais 3 à 9

La figure 7-1 compare les gonflements mesurés pendant les essais 3 à 9, essais non soumis à une variation de la contrainte verticale. Comme sur toutes les figures de comparaison qui vont suivre, la température de la tête du moule est montrée en parallèle (traitillés).



7-1 Comparaison des gonflements des essais 3 à 9

La vitesse de gonflement, soit la vitesse de formation et de croissance des lentilles de glace, est fonction de nombreux paramètres que l'on peut diviser en trois classes :

- Les paramètres propres à la constitution du sol : granulométrie, minéralogie, indice de vide, teneur en eau, perméabilité, courbe caractéristique sol-eau. Pour les essais 3 à 9, ces paramètres n'ont, pour ainsi dire, pas varié.
- Les paramètres thermiques, à savoir : le gradient thermique et la vitesse d'extraction de la chaleur à la surface du sol (qui détermine en partie le gradient thermique). Ces deux paramètres thermiques sont liés.
- La contrainte verticale appliquée sur la zone des lentilles de glace.

Dysli (1991) a montré que l'on pouvait évaluer simplement la vitesse de gonflement des lentilles de glace au moyen de deux approches : Une très simple approche hydraulique, proposée par Konrad et Morgenstern (1981) qui lie cette vitesse au seul gradient thermique, et une autre, un

peu plus élaborée que l'on doit surtout à Loch (1979) et qui fait intervenir la vitesse d'extraction de la chaleur à la surface du sol.

Parmi les essais réalisés, c'est l'essai no 6 qui permet le mieux d'étudier l'application des relations théoriques à la réalité. En effet, lors de cet essai, les températures sur l'axe de l'éprouvette ont pu être mesurées avec précision au moyen de thermistances placées dans l'éprouvette lors de son compactage. L'essai no 5 peut être aussi utilisé. Cependant, comme la mesure des températures sur l'axe n'a pas donné satisfaction, une simulation numérique (chap. 8), calée sur la mesure des températures du moule, a été utilisée.

Commençons par la simple *approche hydraulique* du phénomène du gonflement et utilisons pour cela la relation de Darcy. Cette approche est décrite au paragraphe 2.3.4 de l'état des connaissances actuelles. Elle conduit à l'équation de Konrad et Morgenstern (1981) :

$$v_w = SP \cdot \text{grad}T \quad (7-1)$$

où : v_w = vitesse de gonflement due à l'eau aspirée vers le front de gel [$\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$]

SP = Potentiel de ségrégation [$\text{mm}^2\cdot\text{s}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$]

$\text{grad}T$ = gradient de la température dans la frange de gel [$^\circ\text{C}\cdot\text{mm}^{-1}$]

Comme l'analyse est unidimensionnelle, $\text{grad}T$ est parfois dénommé G_f qui est alors un scalaire.

Dans les sols très gélifs, le gonflement dû au gel de l'eau interstitielle est faible relativement à celui provenant du gel de l'eau aspirée vers le front de gel ; on peut admettre alors que la vitesse du gonflement total v_{gonfl} est approximativement égale à la vitesse de gonflement due à l'eau aspirée vers le front de gel. Dans ce cas : $v_{\text{gonfl}} \approx v_w$.

En tenant compte du gel de l'eau interstitielle et du rapport des volumes entre l'eau et la glace, la relation (7-1) devient :

$$v_{\text{gonfl}} = \frac{dh}{dt} = 1,1 \cdot SP \cdot \text{grad}T + 0,1 \cdot n \frac{dz_f}{dt} \quad (7-2)$$

où : n = porosité [-]

dz_f/dt = vitesse de propagation du front de gel [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$].

Avec les paramètres mesurés dans la zone des lentilles de glace lors des essais cités plus haut et donnés sur le tableau 7-2, on obtient les potentiels de ségrégations donnés sur cette même figure. Pour des sols semblables à celui utilisé pour les essais qui font l'objet de ce rapport (limon, $d_{50} = 0,01$ mm), Konrad propose un SP variant de 30 à $110 \cdot 10^{-5} \text{ mm}^2\cdot\text{s}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$. Les valeurs données par les essais 5, 6 et 8 sont donc plausibles. Pour un même sol, leur variabilité est cependant grande. Elle provient surtout des conditions thermiques différentes lors des périodes retenues pour le calcul des SP . Dans le tableau 7-2, les gradients thermiques moyens sont ceux mesurés aux alentours de la frange de gel.

7-2 Paramètres de l'équation de Konrad et Morgenstern (1981)

Essai	Gradient thermique moyen pendant le gel	Vitesse moyenne de gonflement pendant le gel		SP calculé	Observations
		[mm·s ⁻¹]	[mm·j ⁻¹]		
	[°C·mm ⁻¹]	[mm·s ⁻¹]	[mm·j ⁻¹]	[10 ⁻⁵ mm ² ·s ⁻¹ ·°C ⁻¹]	
5	0,058	1,62·10 ⁻⁵	1,4	28	gradient par simulation numérique calée sur les températures du moule
6	0,057	1,85·10 ⁻⁵	1,6	32	gradient par mesure précise des températures sur l'axe
8 295h	0,033	2,20·10 ⁻⁵	1,9	67	gradient par simulation numérique calée sur les températures du moule
8 420h	0,036	1,27·10 ⁻⁵	1,1	35	gradient par simulation numérique calée sur les températures du moule
9 260h	0,032	1,74·10 ⁻⁵	1,5	54	gradient par évaluation approximative basée sur l'essai 6

Avec l'approche énergétique, elle aussi décrite au paragraphe 2.3.4 de l'état des connaissances actuelles, en négligeant le gonflement par gel de l'eau interstitielle qui est très faible, on détermine la relation :

$$v_{\text{gonfl}} = 1,1 \left(\frac{k_F}{L} \cdot \text{grad}T - \theta \cdot dz_f / dt \right) \quad (7-3)$$

où : k_F = conductivité thermique [W·m⁻¹·°C⁻¹]
 $\text{grad}T$ = gradient thermique dans la frange de gel [°C·m⁻¹]
 L = chaleur latente volumique de fusion de l'eau [W·s·m⁻³]
 θ = teneur en eau volumique initiale [-]
 dz_f/dt = vitesse de propagation ou de retrait (dégel) du front de gel [m·s⁻¹].

Cette dernière relation utilise des paramètres qui peuvent être déterminés en pratique : k_F , L , θ voire dz_f/dt , et elle permet de démontrer l'importance de la vitesse de propagation du front de gel dz_f/dt sur la vitesse de gonflement v_{gonfl} . Pour que le gonflement s'annule, il faut que $(k_F / L)\text{grad}T = dz_f/dt$.

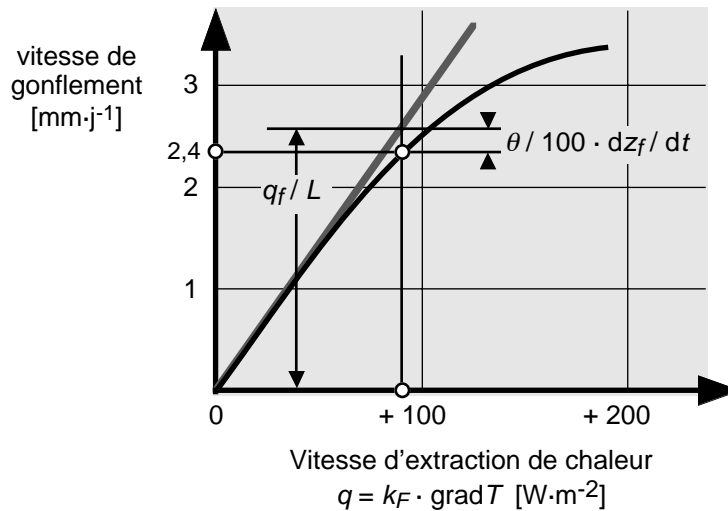
En comparant l'équation (7-3) à la relation de Konrad et Morgenstern (7-1), en négligeant donc le rapport entre les volumes de glace et d'eau (1,1), le paramètre SP devrait être égal à :

$$SP = \left(\frac{\Delta s}{T_s} \cdot k_D \right) = \left(\frac{k_F}{L} - \theta \cdot \frac{dz_f / dt}{\text{grad}T} \right) \quad (7-4)$$

Pour un limon, k_F/L est approximativement égal à $480 \cdot 10^{-5} \text{ mm}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$ et θ à 30% (Dysli, 1991a). Les valeurs de SP variant approximativement, selon le type de sol, de 10 à 300 [10⁻⁵ mm²·s⁻¹·°C⁻¹], on voit que la part prise par le terme $(\theta/100) \cdot (dz_f/dt)/\text{grad}T$, qui représente la puissance nécessaire au gel de l'eau interstitielle, est importante.

Avec $dz_f/dt = 0$ (front de gel stationnaire), on obtient l'asymptote de la figure 7-3. Cette figure a déjà été montrée dans l'état des connaissances actuelles ; elle est reproduite dans ce chapitre avec les valeurs numériques correspondant aux essais et sans la part du gonflement due au gel de

l'eau interstitielle. On y constate que plus la vitesse d'extraction de la chaleur q augmente, plus la puissance utilisée par la pénétration du front de gel augmente et, par conséquent, plus celle utilisée pour la croissance des lentilles diminue. C'est exactement ce que l'on observe dans les essais au gel en laboratoire ainsi que lors de mesures en place. Les valeurs de la figure 7-3 sont celles du tableau 7-4.



7-3 Influence de la vitesse d'extraction de chaleur sur la vitesse de gonflement

On peut tenter d'utiliser les paramètres mesurés dans la zone des lentilles de glace lors de l'essai no 6, à savoir celui dont les mesures de températures dans l'éprouvette sont les plus précises. Les vitesses de gonflement et de déplacement du front de gel peuvent être déduites des mesures avec une bonne précision. Ce n'est cependant pas le cas pour la vitesse d'extraction de la chaleur car le gradient thermique n'est pas constant dans l'éprouvette. Nous l'avons estimé juste sous la tête de refroidissement. Un fluxmètre, dans la tête de refroidissement, aurait été nécessaire pour obtenir une mesure précise de la vitesse d'extraction de la chaleur en tête de l'éprouvette.

Sur ces bases, le tableau 7-4 compare les vitesses de gonflement mesurées pendant le gel avec celles qui sont calculées par la relation (7-3). Malgré l'estimation grossière de la vitesse d'extraction de la chaleur, le résultat de cette comparaison est très bon. Quant au dégel, toujours malgré l'estimation grossière de la vitesse d'extraction de la chaleur, qui est dans ce cas négative, le calcul donne des valeurs qui correspondent bien avec les mesures.

7-4 Usage de l'équation (7-3) pour l'essai no 6

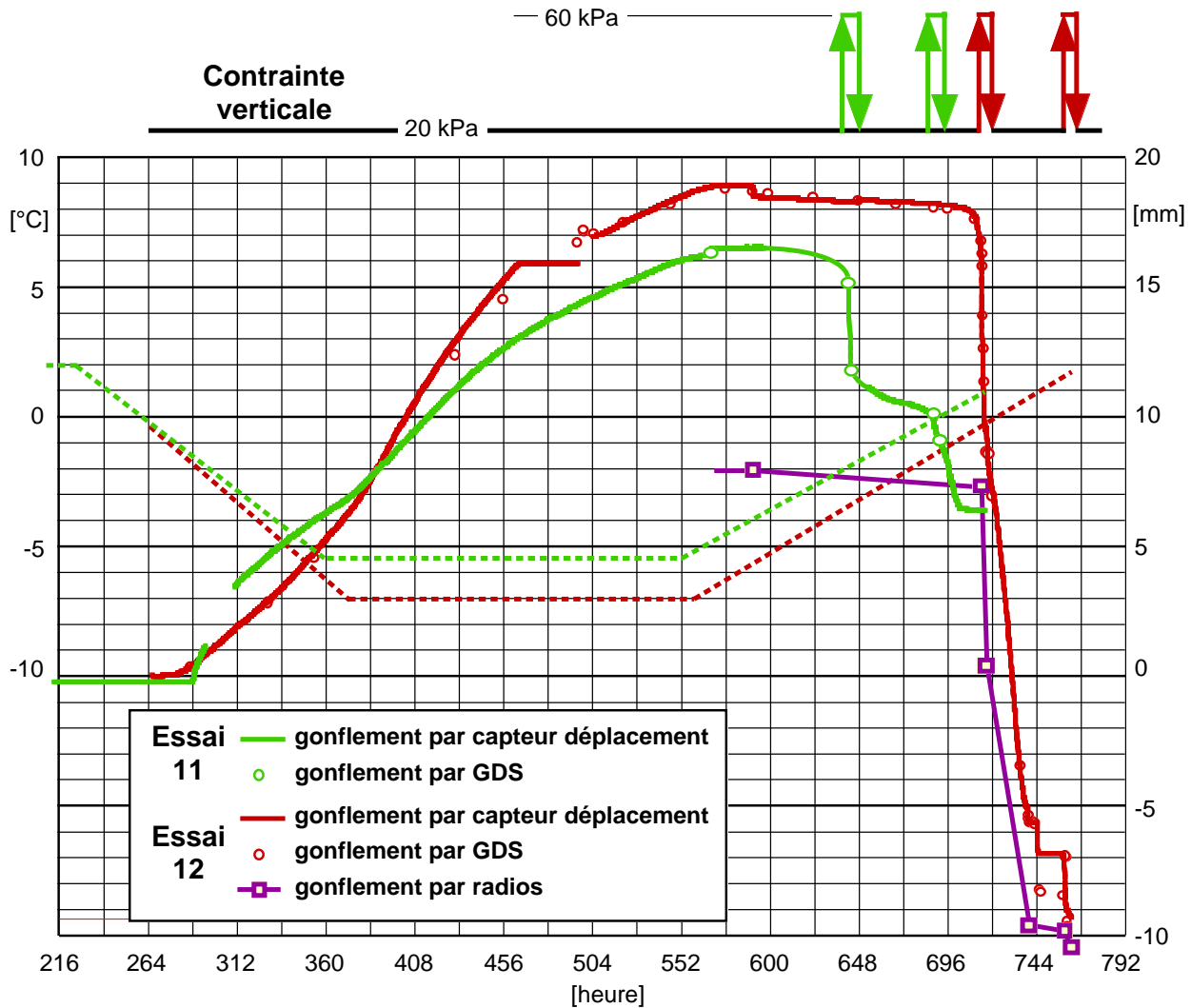
	Temps depuis le début de l'essai	Vitesse moyenne du front de gel pendant le gel dz_f/dt Mesure		Vitesse moyenne de gonflement pendant le gel v_{gonfl} Mesure		Vitesse moyenne de gonflement pendant le gel v_{gonfl} Calcul par (7-3)	
		[h]	[m·s ⁻¹]	[mm·j ⁻¹]	[m·s ⁻¹]	[mm·j ⁻¹]	[m·s ⁻¹]
GEL	133 – 144	$3,79 \cdot 10^{-7}$	32,75	$5,883 \cdot 10^{-8}$	5,08	$1,72 \cdot 10^{-7}$	1,49
	144 – 168	$3,47 \cdot 10^{-7}$	29,98	$2,997 \cdot 10^{-8}$	2,59	$1,83 \cdot 10^{-7}$	1,58
	168 – 192	$2,20 \cdot 10^{-7}$	19,01	$2,285 \cdot 10^{-8}$	1,97	$2,25 \cdot 10^{-7}$	1,94
	192 – 216	$0,69 \cdot 10^{-7}$	5,96	$2,118 \cdot 10^{-8}$	1,83	$2,75 \cdot 10^{-7}$	2,37
	216 – 240	0	0	$2,049 \cdot 10^{-8}$	1,77	$2,97 \cdot 10^{-7}$	2,57
	240 – 264	0	0	$1,586 \cdot 10^{-8}$	1,37	$2,97 \cdot 10^{-7}$	2,57
	moyennes			$2,82 \cdot 10^{-8}$	2,44	$2,41 \cdot 10^{-7}$	2,09
DÉGEL	312 - 336	$-1,50 \cdot 10^{-7}$	-12,96	$-0,32 \cdot 10^{-8}$	-0,28	$-1,03 \cdot 10^{-7}$	-1,28
	336 - 360	$-2,89 \cdot 10^{-7}$	-24,97	$-1,16 \cdot 10^{-8}$	-1,00	$-1,03 \cdot 10^{-7}$	-0,89
	360 - 384	$-4,98 \cdot 10^{-7}$	-43,03	$-1,37 \cdot 10^{-8}$	-1,18	$-0,34 \cdot 10^{-7}$	-0,29
	moyennes		-26,99		-0,82		-0,82
Teneur en eau volumique $\theta = 30[\%]$		Chaleur latente de fusion de l'eau $L = 333 \cdot 10^6 [W \cdot s \cdot m^{-3}]$					
Vitesse moyenne extraction chaleur pendant le gel $q = 90 W \cdot m^2$ (estimation)							
Vitesse moyenne extraction chaleur pendant le dégel $q = 60 W \cdot m^2$ (estimation)							

La courbe de gonflement de l'essai no 8 est très intéressante. Pendant le gel de cet essai, après une période à température de la tête constante ($-6^\circ C$), on a augmenté progressivement cette température jusqu'à $-3^\circ C$ puis on l'a diminuée jusqu'à $-6^\circ C$. Jusqu'à cette diminution, la courbe des gonflements est approximativement la même que celle des essais no 5 et 6. Le réchauffement provoque alors et probablement (la tête s'est bloquée) un léger tassement. Ensuite les gonflements reprennent de plus bel pour atteindre une valeur très importante si on la compare aux essais no 5 et 6. Ce comportement démontre parfaitement que la vitesse de gonflement est fonction du gradient de la température et non pas de cette dernière. Ainsi et par exemple, sous une route, les gonflements dus au gel seront plus importants si les températures négatives de la surface varient que si elles restent constantes, même très basses.

7.2 Gonflements des essais 11 et 12

Les deux courbes de gonflement des essais no 11 et 12 sont dissociées de celles des essais 3 à 9 car, en fin d'essai, l'éprouvette a subi des cycles de charge-décharge.

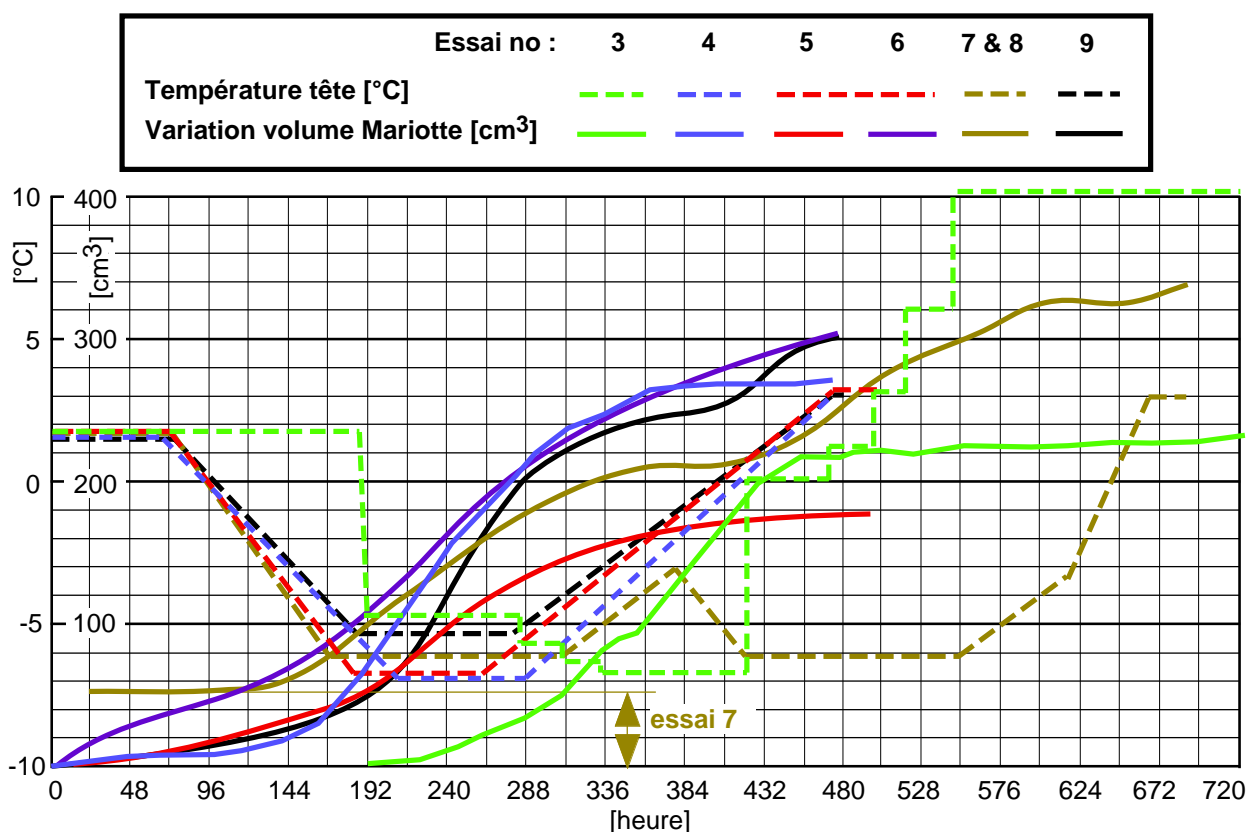
Lors de l'essai no 11 dont l'éprouvette a été compactée avec une énergie de $0,6 MJ \cdot m^{-3}$, le gonflement au gel n'est pas annulé après les deux cycles de charge-décharge. Par contre, à la fin de l'essai no 12 dont l'éprouvette a été compactée avec une énergie moindre de $0,4 MJ \cdot m^{-3}$, l'éprouvette est « écrasée » par les deux cycles de charge-décharge et cet « écrasement » détermine des modules résilients très faibles (voir § 7.9 et chapitre 10). L'« écrasement » est confirmé par les mesures de déformations par rayons X.



7-5 Comparaison des gonflements et tassements des essais 11 et 12

7.3 Volumes vase Mariotte essais 3 à 12

La figure 7-6 compare les variations de volume mesurées avec le vase de Mariotte pendant les essais 3 à 9. Cette comparaison de mesures sera surtout utilisée au paragraphe 7.5 pour faire le bilan des masses pendant les essais. Ces variations de volume sont associées aux courbes de variation des températures. La courbe de l'essai no 6 inclut les pertes d'eau constatées dans le système liant le vase de Mariotte à la base de l'éprouvette. Pour cet essai, le bilan des masses n'est donc pas très significatif.



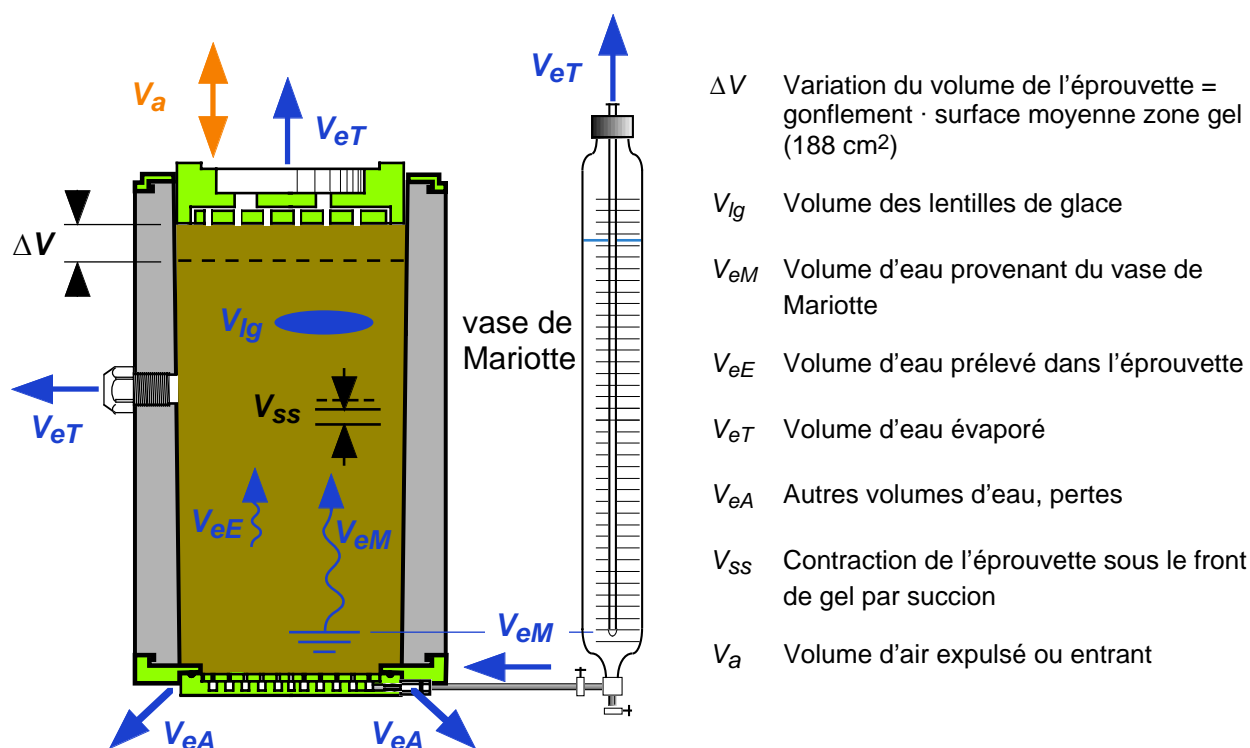
7-6 Comparaison des variations de volume dans le vase de Mariotte

7.4 Teneurs en eau après compactage et en fin d'essai pour les essais 3 à 12

La figure 7-7 compare les teneurs en eau mesurées par séchage sur des prélèvements effectués après le compactage de l'éprouvette et, en fin d'essai, pendant l'excavation de l'éprouvette, ceci pour les essais 3 à 12. Les teneurs en eau en fin d'essai sont encore des teneurs en eau transitoires, car la réaspiration de l'eau vers le bas de l'éprouvette peut durer encore de très nombreuses heures après la destruction de l'éprouvette.

Dans la partie supérieure de l'éprouvette, les teneurs en eau sont, en fin d'essai, de quelque 3 à 4,5 % plus élevée que lors du compactage de l'éprouvette. Cela correspond à l'eau de ségrégation pendant le gel. Ces teneurs en eau diminuent en fonction de la profondeur pour atteindre des valeurs minimales juste au-dessous du front de gel, valeurs qui restent environ constantes dans la zone non gelée de l'éprouvette. Pour les essais no 5 et 6, ces dernières valeurs sont légèrement plus élevées que celles mesurées lors du compactage, alors que, pour les autres essais, elles sont comparables.

Les valeurs de l'essai no 9 proviennent de mesures faites au moyen de prélèvements de très petit volume exécutés dans les trous du moule prévus pour le placement des tensiomètres. Elles donnent des teneurs en eau largement supérieures à celles des autres essais. Cela peut s'expliquer par le fait que ces mesures ont été réalisées avant le démontage de l'éprouvette. Cette opération et le laps de temps entre les mesures par prélèvements de sols dans les trous des tensiomètres et celles qui sont réalisées après le démontage de l'éprouvette permet la réaspiration vers le bas



7-8 Bilan des volumes pendant le gel

Pendant un intervalle de temps Δt , le bilan des masses dans l'éprouvette (eau et variations de volume) peut s'établir par l'équation générale suivante qui correspond au schéma de la figure 7-8 et dont les symboles sont définis sur cette même figure :

$$\Delta V = \Delta V_{lg} - \Delta V_{ss} = \Delta V_{eM} + \Delta V_{eE} - \Delta V_{eT} - \Delta V_{eA} + \Delta V_a \quad (7-5)$$

Pour les essais réalisés et les Δt choisis, ΔV_{ss} n'a pu être mesuré. Il n'est cependant pas toujours très faible. Par exemple, les essais dans la halle fosses d'Écublens ont montré qu'il pouvait atteindre 20 % du gonflement total (fig. 9-8d, 22 jours). En outre, lors de l'essai no 9 de la présente recherche, la mesure du champ des déplacements au moyen des rayons X a montré que cette contraction représentait le 21 % du gonflement total (fig. 6-11).

Le ΔV_{eE} n'a aussi pu être mesuré. Cependant, dans son cas, comme la teneur en eau de la partie non gelée de l'éprouvette n'a pour ainsi dire pas varié pendant les essais, on peut le négliger.

Enfin, ΔV_a est inconnu et ne peut être évalué ; il est probablement très faible. La compressibilité de l'air ne joue ainsi qu'un rôle très négligeable.

Le tableau 7-9 compare les valeurs mesurées avec ce que devrait donner le bilan.

À la fin de l'essai no 9, après le colmatage avec de la graisse silicone de tous les orifices et interstices, les pertes résiduelles d'eau ont été mesurées par le tube de Mariotte (figure 6-6 et tableau 6-7). Ces pertes sont en moyenne de 1 cm³·jour⁻¹. Elles sont introduites, en fonction du nombre de jours $t_2 - t_1$, dans la colonne 10 de la figure 7-9.

7-9 Valeurs du bilan

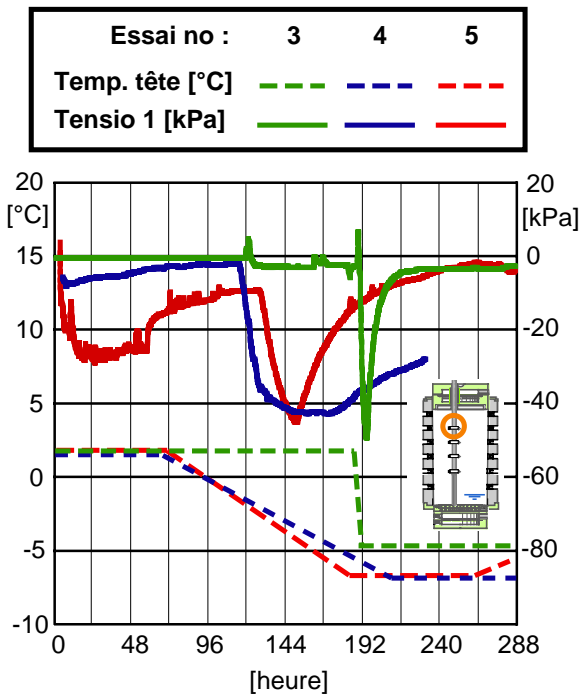
no col	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Essai	Δt		Nbre jours = $t_2 - t_1$	Δ gonfl.	ΔV mesuré = gonfl./ 1,1	ΔV_{eM} mesuré	ΔV_{eT} mesuré	ΔV_{eA} (pertes calculées) = 5-6+7	$ \Delta V_{eA} / \Delta V $	Pertes résiduelles essai no 9	
	t_1	t_2									[h]
3	288	384	4,0	0,71	122	100	8	30	25	4	
4	168	240	3,0	0,60	103	113	6	-4	4	3	
5	192	264	3,0	0,39	67	85	6	-12	18	3	
6*	168	264	4,0	0,72	124	101	8	31	25	4	
8	168	264	4,0	0,68	117	84	8	41	35	4	

* = pertes constatées

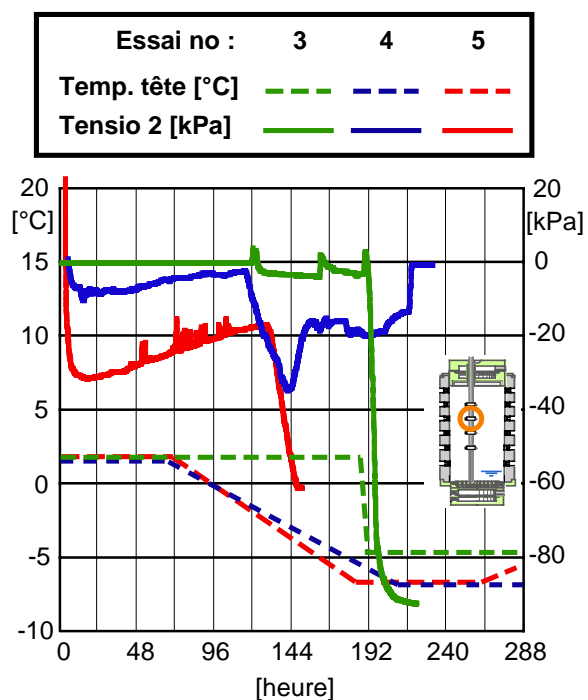
Le calcul des pertes (positives et négatives, colonnes 8 et 9) montre qu'elles sont nettement supérieures à celles mesurées lors de l'essai no 9 (colonne 10), ceci à l'exception de celles de l'essai no 4. La perte de l'essai no 6 a été constatée et le volume calculé semble plausible. Quant aux essais no 3 et 8, aucune perte n'a été constatée et la cause de cette différence est inconnue. Cependant, la grande complexité du dispositif expérimental fait que certaines pertes n'ont pu être décelées.

7.6 Succions capillaires

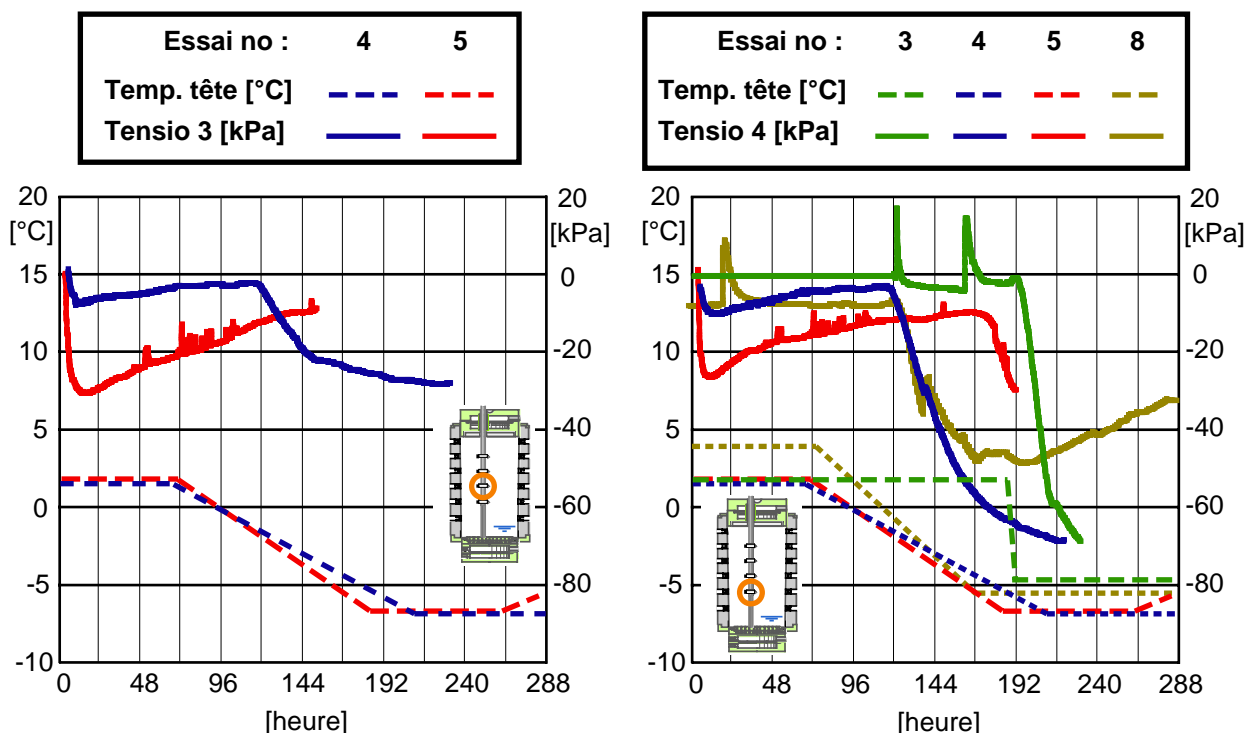
Les figures 7-10 à 7-13 comparent les succions capillaires mesurées avec les quatre tensiomètres pendant les essais 3 à 5 et 8. Il n'y avait pas de tensiomètres lors des essais no 6, 9, 11 et 12. Seules les courbes ou les parties de courbes correspondant à un comportement satisfaisant des tensiomètres sont représentées dans ces figures.



7-10 Comparaison succions capillaires pour le tensiomètre no 1



7-11 Comparaison succions capillaires pour le tensiomètre no 2



7-12 Comparaison succions capillaires pour le tensiomètre no 3

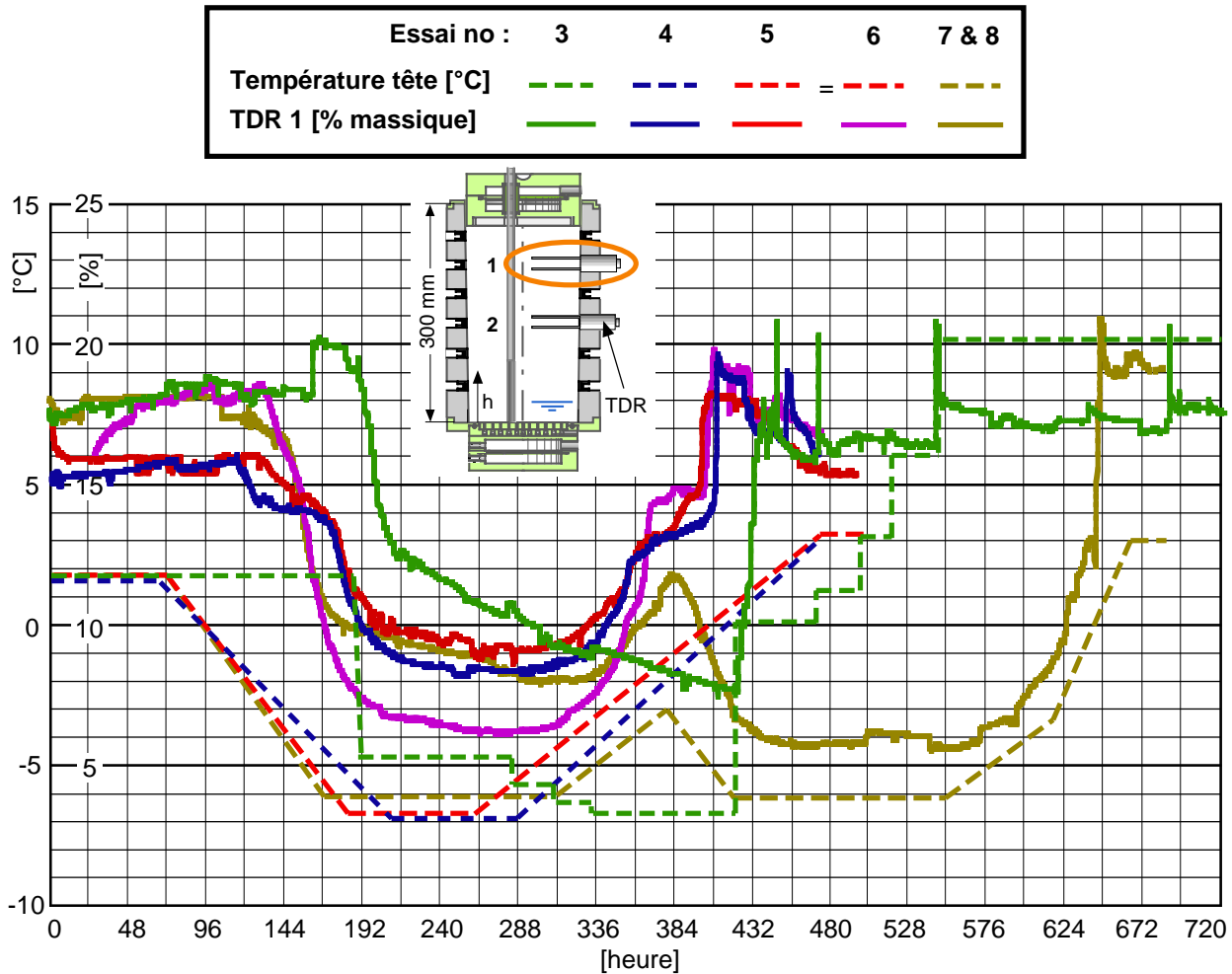
7-13 Comparaison succions capillaires pour le tensiomètre no 4

Les figures 7-10 à 7-13 montrent que les succions capillaires les plus élevées, mesurées pendant tous les essais, atteignent une valeur de quelque 80 kPa. C'est environ la valeur maximale que peuvent mesurer des tensiomètres à pierre poreuse. Dans les essais réalisés dans la halle fosses d'Écublens (Dysli & Pfister, 1982), des valeurs maximales d'environ 60 kPa avaient été atteintes avec le même type de tensiomètre. On peut comparer ces valeurs maximales avec la courbe caractéristique sol-eau déterminée sur le limon utilisé (fig. 3-5). 80 kPa correspond, sur cette courbe, à une diminution de la teneur en eau non gelée de quelque 2%, alors que les mesures de la teneur en eau non gelée avec le capteur TDR supérieur (fig. 7-14) donnent une diminution variant entre 8 et 12% ! Si l'on admet 10% comme valeur moyenne, l'extrapolation de la courbe caractéristique sol-eau de la figure 3-5 donne une succion d'environ 6'000 kPa. ($w = 7,7\%$) ! Avec une telle valeur, le transport d'eau ne peut s'effectuer que par voie gazeuse.

En admettant que la succion de 80 kPa est constante au-dessous des lentilles de glace, que la zone concernée a une hauteur de quelque 10 cm (qui détermine, dans le moule, un volume de 1770 cm^3) et que le module oedométrique de la zone en succion capillaire est d'environ 4'000 kPa (voir fig. 6-21), la contraction par succion ΔV_{ss} serait alors de $1770 \cdot 80 / 4000 = 35 \text{ cm}^3$. Cette valeur est à comparer au 20 % du gonflement total (voir § 7.5), à savoir une moyenne de 50 cm^3 pour les essais no 4, 5 et 6. Cela prouve, dans une certaine mesure, que la succion maximale est seulement un peu plus élevée que celle mesurée et limitée par la technique de mesure.

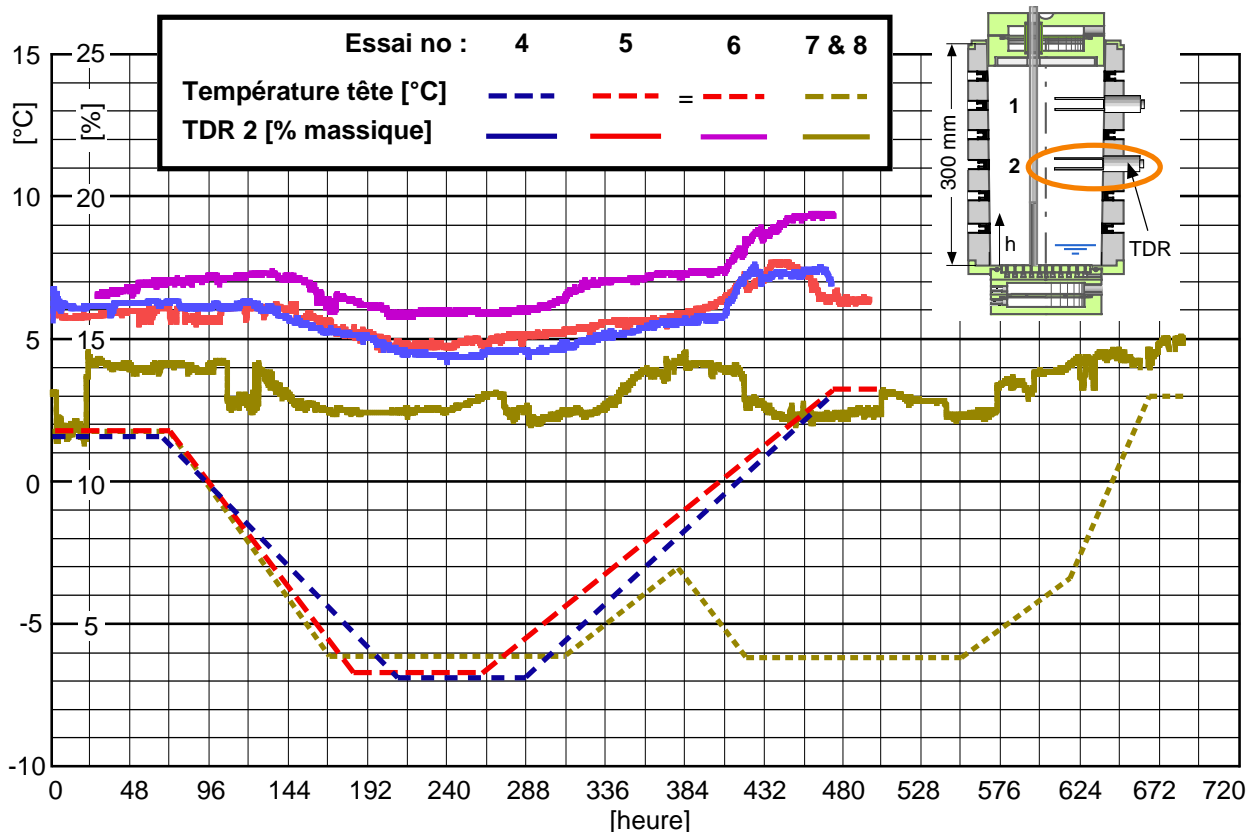
7.7 Teneurs en eau non gelée

Les figures 7-14 et 7-15 comparent les teneurs en eau non gelée mesurées avec les deux capteurs TDR pendant les essais 3 à 8. Il n'y avait pas de capteur TDR lors des essais 9 à 12. Pour l'essai no 3, la courbe du capteur TDR 2 n'est pas représentée car ce capteur a eu, pendant cet essai, un comportement aberrant (voir chapitre 4). Lors de l'essai no 6 les capteurs TDR 1 et TDR 2 ont eu aussi quelques problèmes (voir chapitre 4) ; leurs courbes sont cependant représentées sur les figures 7-14 et 7-15.



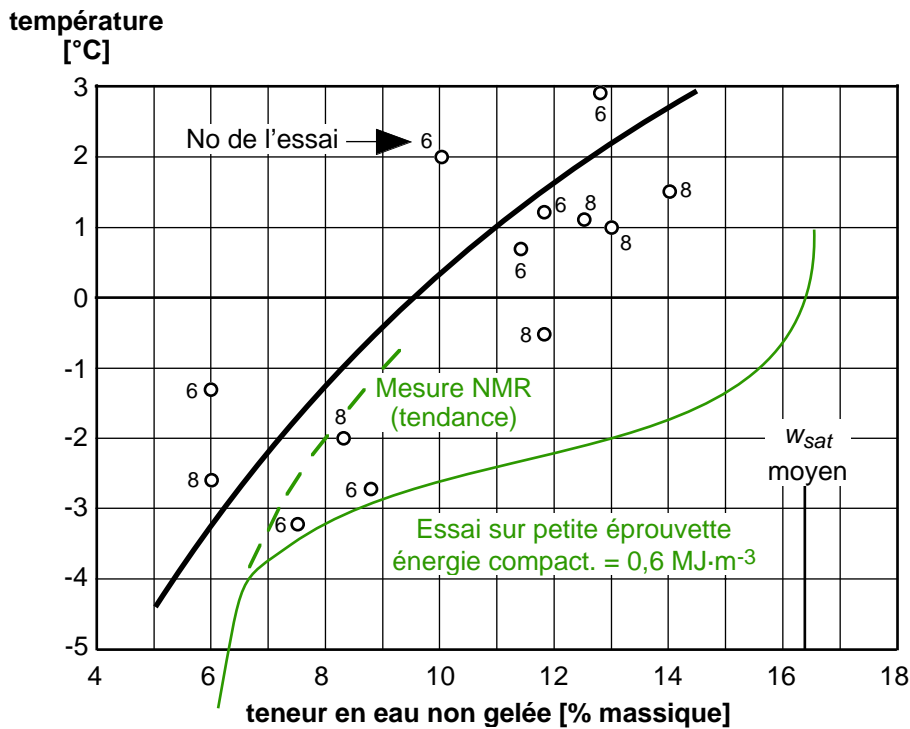
7-14 Comparaison des teneurs en eau massiques non gelées mesurées avec le capteur TDR no 1

Ces mesures montrent que les teneurs en eau non gelées peuvent atteindre une valeur minimale d'environ 6% dans le limon utilisé pour les essais, ceci au niveau du capteur TDR supérieur. Cette valeur a été déjà exploitée dans la section 7.6. Le capteur TDR inférieur, proche de la profondeur maximale du front de gel, donne des valeurs beaucoup plus élevées (fig. 7-15). En fait, à ce niveau, la teneur en eau non gelée ne varie que très peu, ce qui est tout à fait normal.



7-15 Comparaison des teneurs en eau massiques non gelées mesurées avec le capteur TDR no 2

Enfin, la figure 7-16 donne l'importante relation entre la température et la teneur en eau non gelée. Elle a été établie au moyen des résultats des essais no 6, 8 et 11 et doit être analysée en fonction des caractéristiques du limon utilisé pour tous les essais, caractéristiques données au chapitre 3. Les teneurs en eau non gelée sont mesurées avec les deux capteurs TDR et la température est celle de l'axe de l'éprouvette, à savoir celle à l'extrémité de l'antenne du capteur TDR. Sur la même figure, nous avons reporté la courbe mesurée avec le dispositif décrit au chapitre 3 qui permet d'obtenir des températures approximativement constantes dans toute l'éprouvette, ce qui n'est pas le cas avec les mesures par capteurs TDR pour lesquelles les températures sont des moyennes à un niveau donné de l'éprouvette, alors que c'est la température mesurée ou calculée sur l'axe de l'éprouvette qui est utilisée sur la figure 7-16. Pour des températures supérieures à environ -3°C , il y a une forte différence entre les deux courbes. Des mesures réalisées en résonance magnétique nucléaire (NMR, voir par exemple fig. 10-23) auraient donné une courbe dont la tendance est donnée en traitillés sur la figure 7-16.



7-16 Relation entre la teneur en eau non gelée et la température pour le limon utilisé

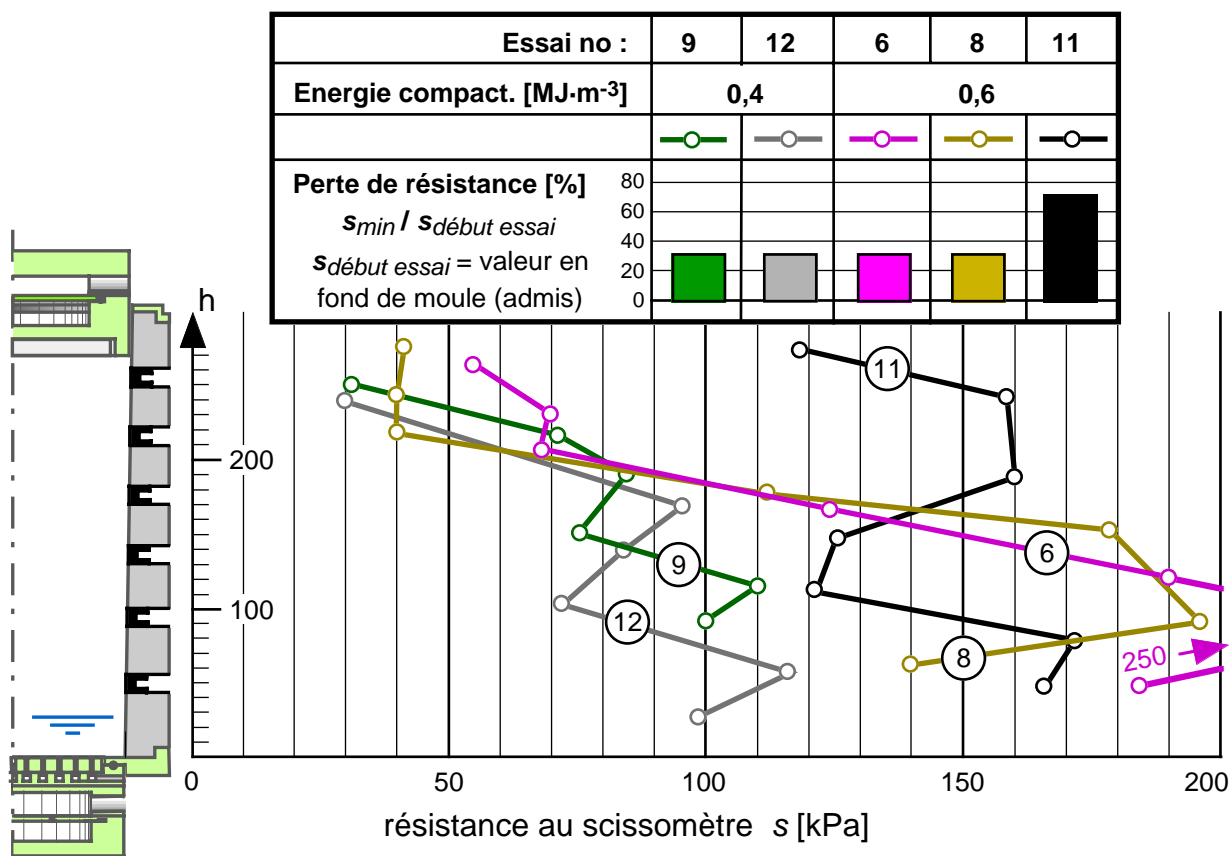
7.8 Résistance au cisaillement en fin d'essai

La comparaison fait l'objet de la figure 7-17. Avant de discuter de ces mesures, il faut rappeler que les résistances mesurées avec le scissomètre sont plutôt des valeurs relatives et non des valeurs absolues correspondant à la résistance au cisaillement réelle du limon.

À l'exception des essais no 11 et 12 qui ont subi des charges et décharges importantes, les courbes montrent assez clairement une faible résistance au-dessus de la profondeur maximale atteinte par le front de gel et une résistance beaucoup plus importante au-dessous qui correspond à la résistance du sol n'ayant pas subi le cycle de gel-dégel avec, cependant, un léger accroissement dû à la succion capillaire. Pour ces essais, le rapport entre les résistances juste au-dessus du front de gel et celles au-dessous est en moyenne de 3,0. Cette diminution de la résistance au cisaillement dans la zone où les lentilles de glace étaient les plus épaisses est importante. En admettant comme réalistes les résistances au cisaillement non drainé c_u données dans la norme SN 670 010b qui proviennent des statistiques de Dysli et Rybisar (1992), à savoir 94 kPa (CL), la résistance au dégel serait d'environ 30 kPa.

Toujours pour ces essais, l'effet de l'énergie de compactage est aussi clairement montré sur la figure 7-17 (essai 6 et 8 à $0,6 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-3}$ et essai 9 à $0,4 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-3}$).

Pour les essais no 11 et 12, les cycles de charge et décharge en fin d'essai ont recompacté l'éprouvette et uniformisé un peu sa résistance au cisaillement.



7-17 Comparaison de la résistance au cisaillement en fin d'essai

7.9 Modules de déformation pendant le dégel (essais 11 et 12)

Les essais no 11 et 12 avaient pour but de tenter d'évaluer les modules résilients au dégel. Leurs résultats ne sont pas comparables et ils seront utilisés et discutés au chapitre 10.

7.10 Endoscope

7.10.1 Explications introductives

La plupart des animations ont déjà été discutées au chapitre 5, essais après essais. Cette section est, elle, consacrée à des comparaisons et à une discussion générale de ces animations.

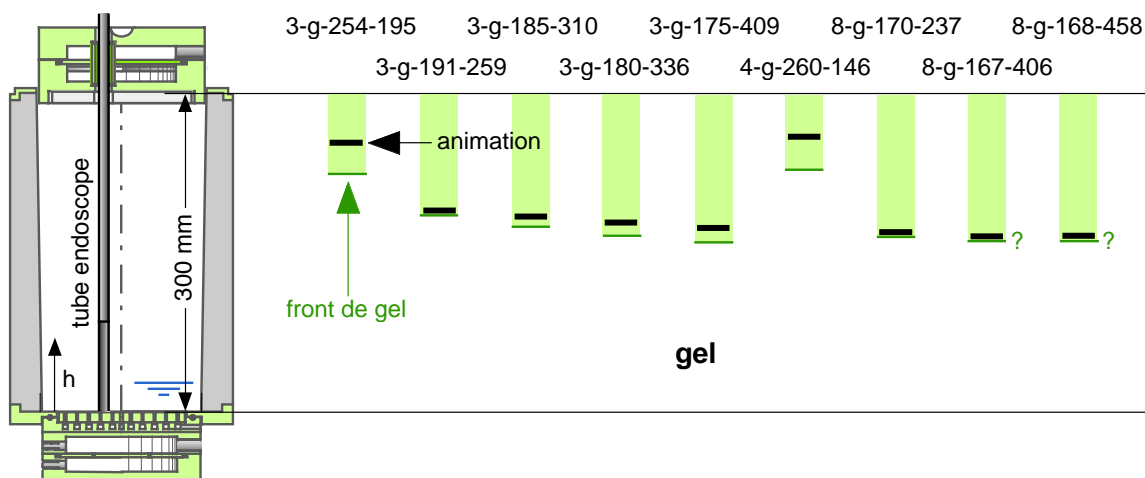
Pour pouvoir comprendre la discussion et les commentaires qui suivent, il faut visionner en parallèle les animations qui se trouvent sur le CD annexé à ce rapport. La numérotation de ces vidéos est celle utilisée au chapitre 5 et est basée sur le système suivant : |Nom essai|–|g = gel, d = dégel|–|hauteur mesurée depuis le fond du moule (h)|–|heure début animation (heure depuis le début de l'essai)|.

Le tableau 7-18 donne la liste de toutes ces animations enregistrées sur le CD avec quelques-unes de leurs caractéristiques. Elles sont au format avi non comprimé et peuvent ainsi être regardées sur n'importe quel ordinateur. Pour le gel, la figure 7-19 place les animations dans l'éprouvette et donne la position du front de gel pour chacune d'entre elles ; la figure 7-20 est l'équivalent de la figure 7-19 pour le dégel. Sur ces deux dernières figures, les fronts de gel sont

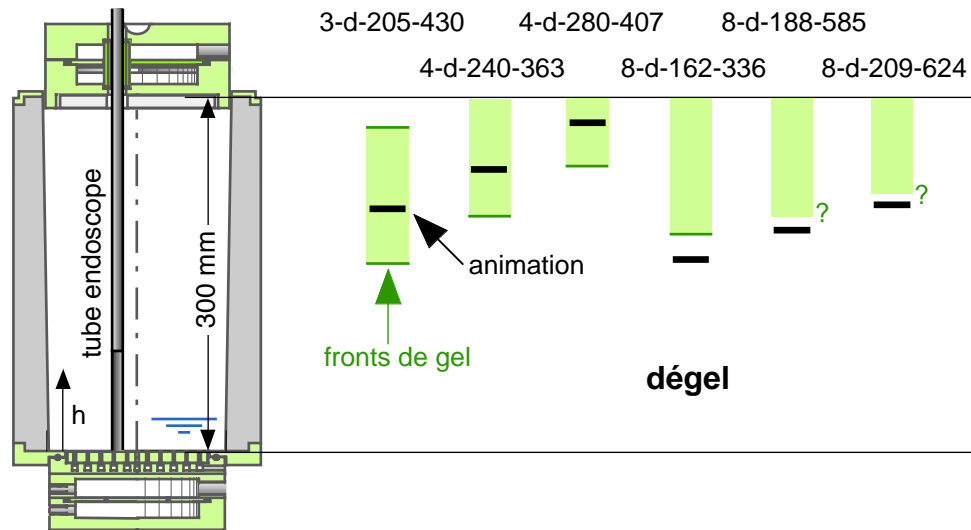
indiqués par un trait vert lorsqu'ils sont connus et la zone gelée est signalée par un fond vert clair.

No essai	No animation	Dates	Heures depuis début essai	Δt [heure]	Remarque
Gel					
3	3-g-254-195	26/9 20:55 au 27/9/2003 17:55	195 à 216	1/2	Courte mais intéressante.
3	3-g-191-259	29/9 12:55 au 1/10/2003 9:25	259 à 304	1/2	Intéressante. Avec dégel intermédiaire.
3	3-g-185-310	1/10 14:55 au 2/10/2003 14:25	310 à 333	1/2	Intéressante.
3	3-g-180-336	2/10 17:35 au 4/10/2003 18:25	336 à 385	1/2	Intéressante.
3	3-g-175-409	5/10 18:25 au 6/10/2003 9:25	409 à 424	1/2	Moyennement intéressante.
4	4-g-260-146	4/12 19:25 au 5/12/2003 22:25	146 à 173	1/2	Sans grand intérêt.
8	8-g-170-237	27/6 17:06 au 29/6/2004 10:21	237 à 278	1/4	Intéressante, mais déplacement du tube de l'endoscope.
8	8-g-167-406	4/7 18:28 au 6/7/2004 14:06	406 à 450	1/2	Curieux déplacement vers le bas.
8	8-g-168-458	6/7 21:51 au 8/7/2004 3:51	458 à 488	1/2	dito
Dégel					
3	3-d-205-430	6/10 15:15 au 7/10/2003 3:25	430 à 442	1/2	Intéressante.
4	4-d-240-363	13/12 20:10 au 15/12/2003 10:10	363 à 401	1/2	Intéressante.
4	4-d-280-407	15/12 15:50 au 16/12/2003 13:55	407 à 429	1/4	Intéressante. Avec regel intermédiaire.
8	8-d-162-336	1/7 20:06 au 2/7/2004 20:06	336 à 360	1/2	Intéressante. Fin gel et début dégel
8	8-d-188-585	12/7 5:21 au 13/7/2004 17:06	585 à 621	1/4	Intéressante.
8	8-d-209-624	13/7 20:00 au 14/7/2004 12:51	624 à 641	1/4	Intéressante. Fin du dégel d'une lentille

7-18 Liste des animations du CD annexé



7-19 Positions des animations pour le gel



7-20 Positions des animations pour le dégel

7.10.2 Gel

Toutes les animations relatives à la période du gel des essais no 3, 4 et 8, à savoir ceux où l'endoscope a été utilisé, montrent que les lentilles de glace se forment du haut vers le bas, dans le sens de progression du front de gel. Le niveau de formation d'une lentille correspond souvent à une zone de faiblesse de l'éprouvette, due principalement au mode de son compactage. Cette zone de faiblesse détermine l'orientation de la lentille. Par contre, le vecteur vitesse de la croissance d'une lentille est toujours vertical. Les lentilles se forment vers le bas et poussent le sol vers le haut (gonflement). Juste au-dessus d'une lentille, ce gonflement peut provoquer la fermeture de fissures préexistantes.

Après un certain temps de formation de la lentille, le front de gel « décroche », le développement de la lentille cesse, totalement ou seulement en partie, et de nouvelles lentilles commencent à se former plus bas. La dimension des images de l'endoscope ne permet généralement pas de visualiser ce phénomène, cependant la formation des lentilles inférieures (non visibles sur les animations) pousse le sol vers le haut (gonflement), ce qui est, par contre, parfaitement visible sur les animations. Ce phénomène est visible sur l'animation 3-g-180-336. Sur l'animation 3-g-180-409, deux groupes de lentilles, à deux niveaux différents, se développent en même temps. Quelquefois le tube de l'endoscope est entraîné vers le haut par le gonflement de l'éprouvette ; dans ce cas, la ou les lentilles semblent comprimer le sol vers le bas mais ce n'est qu'un artefact (ex. : 8-g-170-237).

Dans les animations 8-g-167-406 et 8-g-168-458, les lentilles sont stables et le déplacement se fait vers le bas. Des défauts du tube montrent que ce dernier ne se déplace pas. Ce phénomène se produit juste après un réchauffement intermédiaire de l'éprouvette et pourrait provenir de la fonte de lentilles au-dessous des photos de l'animation.

Attention, dans les animations, toutes les zones foncées ne sont pas des lentilles de glace, mais peuvent être des discontinuités dues au compactage, les trous laissés par d'anciennes lentilles voire des billes de plomb (voir fig. 5-31). En outre, certaines zones claires sont du limon qui

reste collé sur le tube de l'endoscope (par ex. :3-g-254-195). Ces remarques sont aussi valables pour le dégel.

7.10.3 Dégel

Le sens du dégel des lentilles de glace devrait dépendre de leur situation par rapport aux deux positions de l'isotherme 0° C. Cette isotherme se déplace, pour sa position supérieure, du haut vers le bas et, pour sa position inférieure, du bas vers le haut. Cependant, les animations concernent uniquement le déplacement vers le bas de l'isotherme 0° C supérieure, l'isotherme inférieure restant très stable.

D'une manière générale, les animations montrent que la fonte des lentilles de glace est plus rapide que leur formation. À proximité de l'isotherme 0° C supérieure, les lentilles commencent à fondre par le haut et l'eau de fonte est aspirée vers le bas. Un film d'eau est souvent visible, contre le tube de l'endoscope, sous la partie inférieure des lentilles en dégel (3-d-205-430, 4-d-280-407, 8-d-188-585, 8-d-209-624). Cela montre bien que *toute l'eau du dégel est aspirée vers le bas* et ce qui confirme les résultats des mesures réalisées dans la halle fosses d'Écublens (Dysli, 1993). Le déplacement du sol vers le bas indique que d'autres lentilles, invisibles, sont en train de fondre au-dessous de l'animation.

Dans l'animation 3-d-205-430, la lentille qui se trouve sur le haut continue à croître jusqu'à environ 05:00 heures, alors que la grosse lentille inférieure est déjà en train de fondre. La cause de ce regel est, probablement, la décompression de la zone autour de cette lentille supérieure due à la fonte de la lentille inférieure.

Dans l'animation 4-d-280-407, un léger regel de la lentille supérieure est observé. L'animation 8-d-162-336 commence par la fin d'un gonflement suivi d'une fonte caractéristique.

Dans la plupart des animations montrant le dégel de lentilles de glace, on observe les fissures laissées par les lentilles dégelées, fissures qui peuvent avoir une certaine importance lors d'un prochain cycle de gel-dégel. Cependant, malgré la faible contrainte verticale (4 kPa) ces fissures se reconsolident un peu. Cela est probablement dû à la succion capillaire engendrée par le phénomène du gel.

8

Simulation numérique thermique des essais 1 à 5

8.1 Introduction

Ce chapitre contient les hypothèses et les résultats des simulations numériques réalisées avec les essais no 1 à 5 dont les résultats font l'objet du chapitre 5. La séparation des résultats et des simulations numériques a un but de mise en pages ; elle permet cependant aussi de mieux séparer deux domaines assez différents. Ces simulations n'ont été réalisées qu'avec un code de diffusion thermique sans aucun couplage. Les conditions aux limites sont cependant un peu élaborées.

Dans une recherche, la simulation numérique des essais est importante, car elle permet notamment de déterminer les paramètres des éprouvettes soumises aux essais par approximations successives, sur ces paramètres et sur les conditions aux limites.

8.2 Modèle utilisé

La simulation numérique du moule et de son éprouvette a été réalisée avec le programme ADINAT (Bathe, 1982) qui fait partie du groupe de programmes ADINA. Ce programme résout l'équation du transfert de la chaleur et a, entre autres, les caractéristiques suivantes :

- conduction, convection et radiation à une, deux et trois dimensions,
- analyse en régime permanent et transitoire,
- radiation entre surfaces de formes quelconques,
- naissance et mort des éléments,
- lois des matériaux non linéaires en fonction du temps ou des températures,
- chaleur latente, par ex. pour le gel et le dégel,
- couplage possible avec d'autres codes du groupe ADINA comme, par exemple, le code en contraintes et déformations.

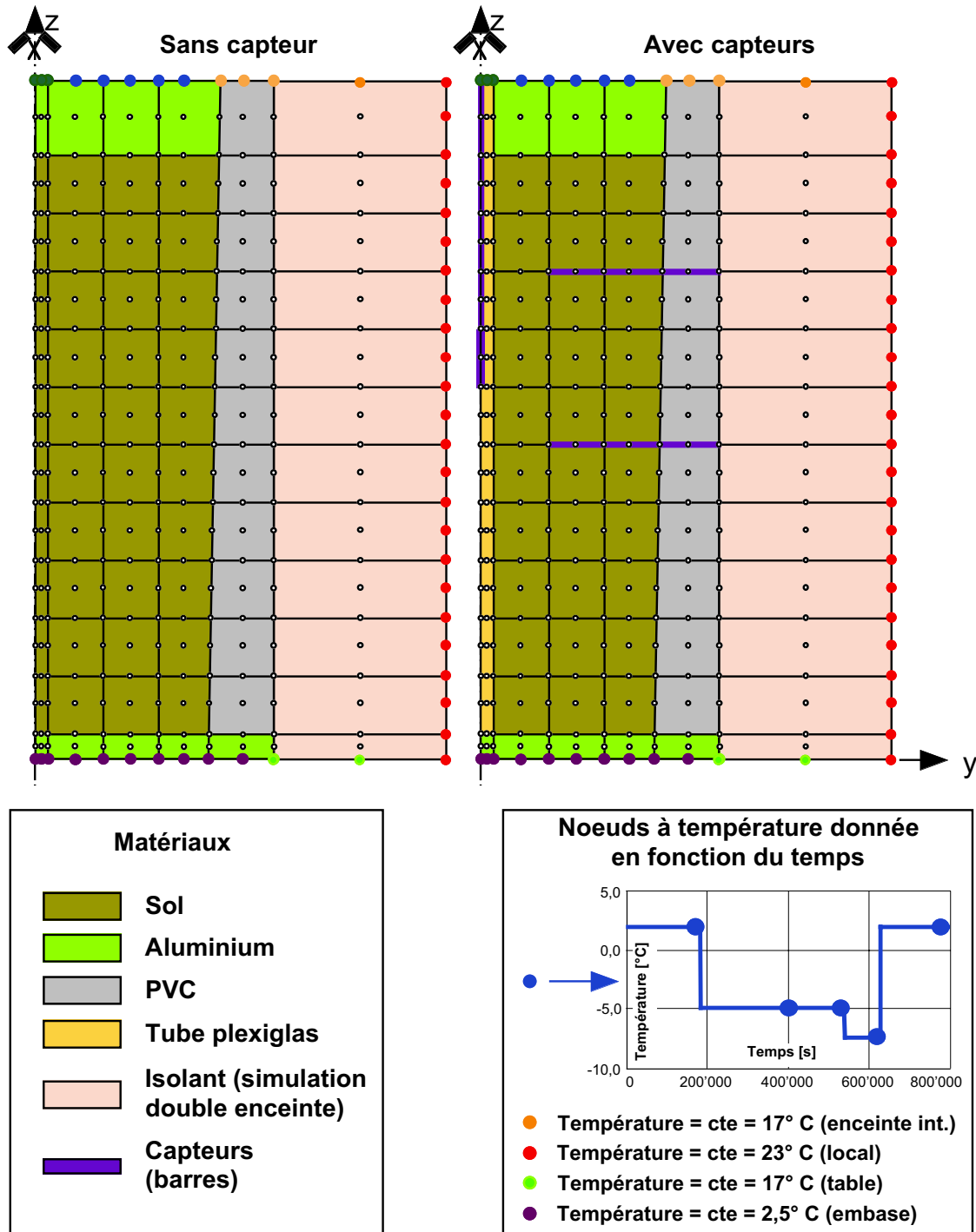
8.3 Essais no 1 et 2

8.3.1 But des essais

Ces deux premiers essais avaient pour but d'évaluer l'effet des capteurs : endoscope, TDR et tensiomètres sur la répartition des températures dans et sur les limites de l'éprouvette. L'essai no 1 a été réalisé sans capteur et l'essai no 2 avec tous les capteurs.

8.3.2 Réseau

Le réseau utilisé fait l'objet de la figure 8-1. Il est composé de 72 éléments isoparamétriques à 9 nœuds en symétrie de révolution et de 20 barres à 2 nœuds pour la simulation des capteurs. Tous ces éléments nécessitent un total de 325 nœuds. L'isolation thermique intérieure et celle extérieure ont été simplement simulées par un matériau isolant continu. Les sections des barres horizontales simulant les capteurs TDR tiennent compte de l'axisymétrie du problème.



8-1 Essais nos 1 et 2: Les réseaux d'éléments finis simulant le moule et son éprouvette avec ses conditions aux limites

8.3.3 Conditions aux limites

Les conditions aux limites solide-air sont rudimentaires : températures, fonction du temps, fixées aux nœuds et la forme de la tête de refroidissement est très schématisée. Cependant, ces deux simulations n'ayant pour but que la détermination de l'effet des capteurs, ces lacunes ne prêtent pas trop à conséquence. La simulation numérique des autres essais sera un peu plus élaborée.

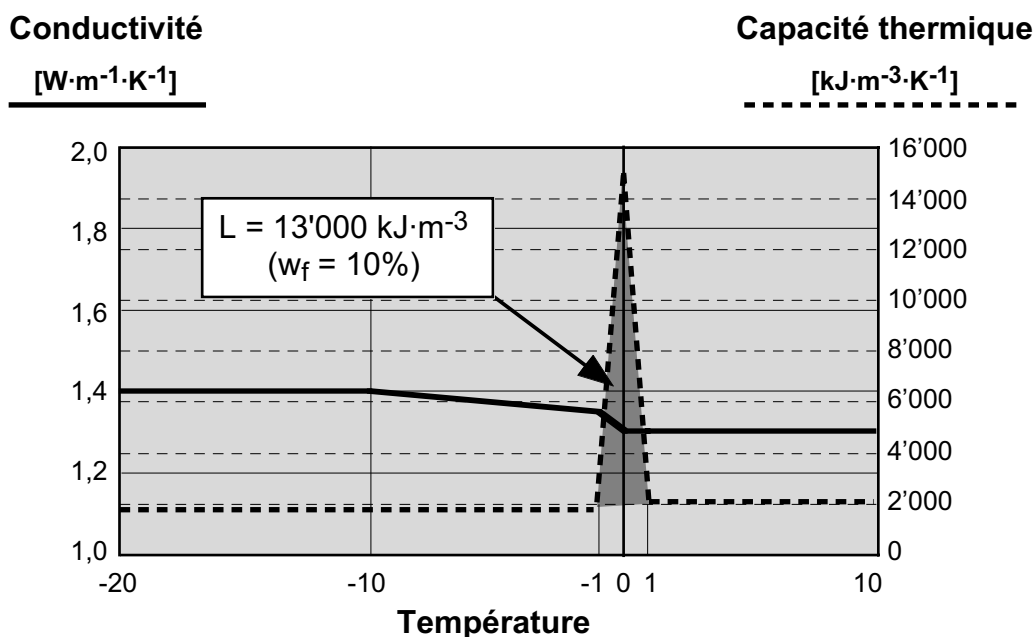
8.3.4 Données

Tous les matériaux, à l'exception du sol, ont des paramètres thermiques (conductivité et capacité thermique) constants en fonction des températures. Ils sont donnés sur le tableau 8-2. Ceux du sol décrivent exactement ce matériau complexe sur le plan thermique (fig. 8-3). On remarquera sur cette figure que, selon l'habitude et les bonnes expériences de l'auteur de ces lignes (Dysli, 1991), la chaleur latente du sol gelé est introduite par la capacité thermique.

Parmi les capteurs, seul l'endoscope et les capteurs de teneur en eau TDR ont été simulés. Les tensiomètres ont des caractéristiques thermiques très proches de celles du sol et leur effet peut être négligé.

8-2 Essais nos 1 et 2: Paramètres thermiques des matériaux autres que le sol
Dysli, 1991a

Matériaux		Conductivité [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]	Capacité [$kJ \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}$]
2	Aluminium	220	2600
3	PVC	0,22	2100
4 & 5	Isolants	0,08	40
6	Acier (capteurs)	70	3800

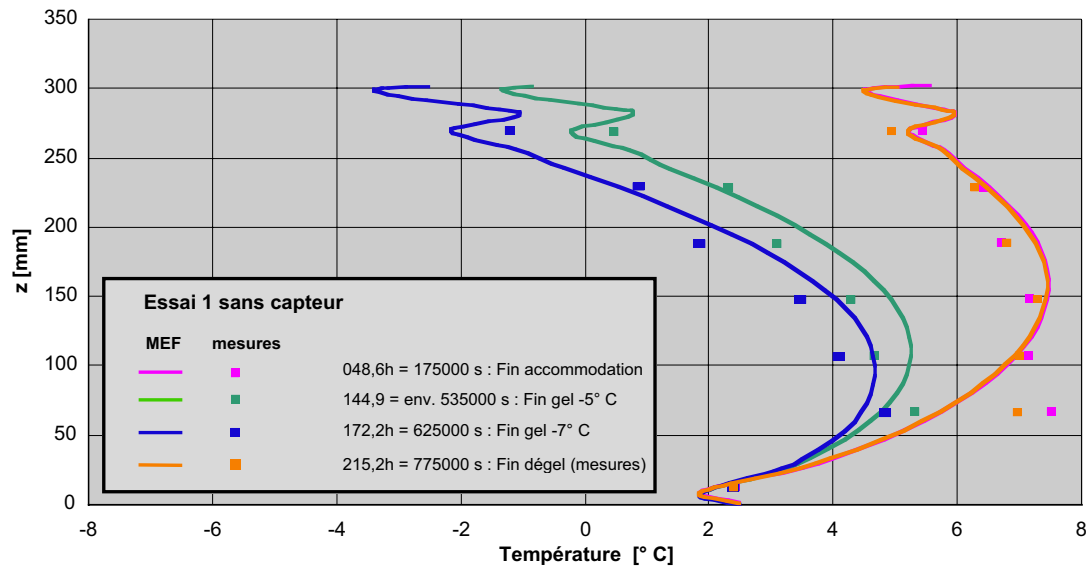


8-3 Essais nos 1 et 2: Paramètres thermiques du sol
Dysli, 1991a

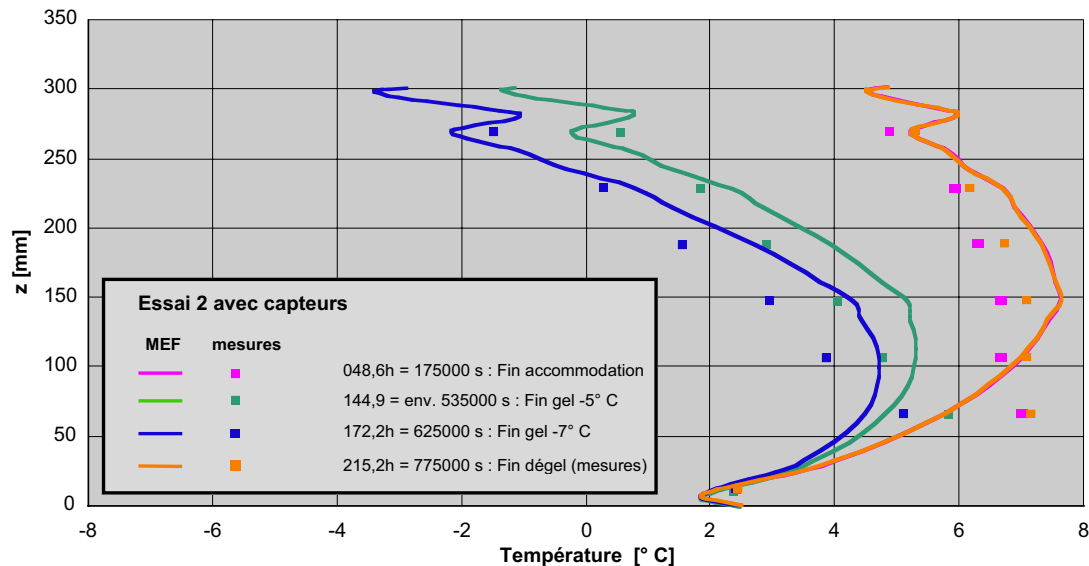
8.3.5 Résultats

La première chose à faire est de caler le modèle numérique sur la réalité représentée par les mesures de températures. Plusieurs réseaux et de nombreux paramètres différents ont été utilisés pour ce calage. Les deux réseaux de la figure 8-1 sont l'aboutissement de cette démarche. Les figures 8-4 et 8-5 comparent certains résultats des simulations numériques finales avec les

mesures de températures sur la face intérieure du moule (moyennes des deux axes de mesure). Elles montrent que le calage n'est pas parfait, mais qu'il est acceptable. Les plus grandes différences sont observables au bas du moule ; elles proviennent probablement du réseau d'éléments finis qui simule assez mal ce qui se passe au-dessous du moule. On remarquera que les résultats de la simulation à 175'00 s (fin de l'accommodation) et à 775'000 s sont presque identiques, alors que les mesures ne le sont pas tout à fait. Ces imperfections sont surtout dues aux conditions aux limites rudimentaires et à la simulation grossière de la forme de la tête de refroidissement.

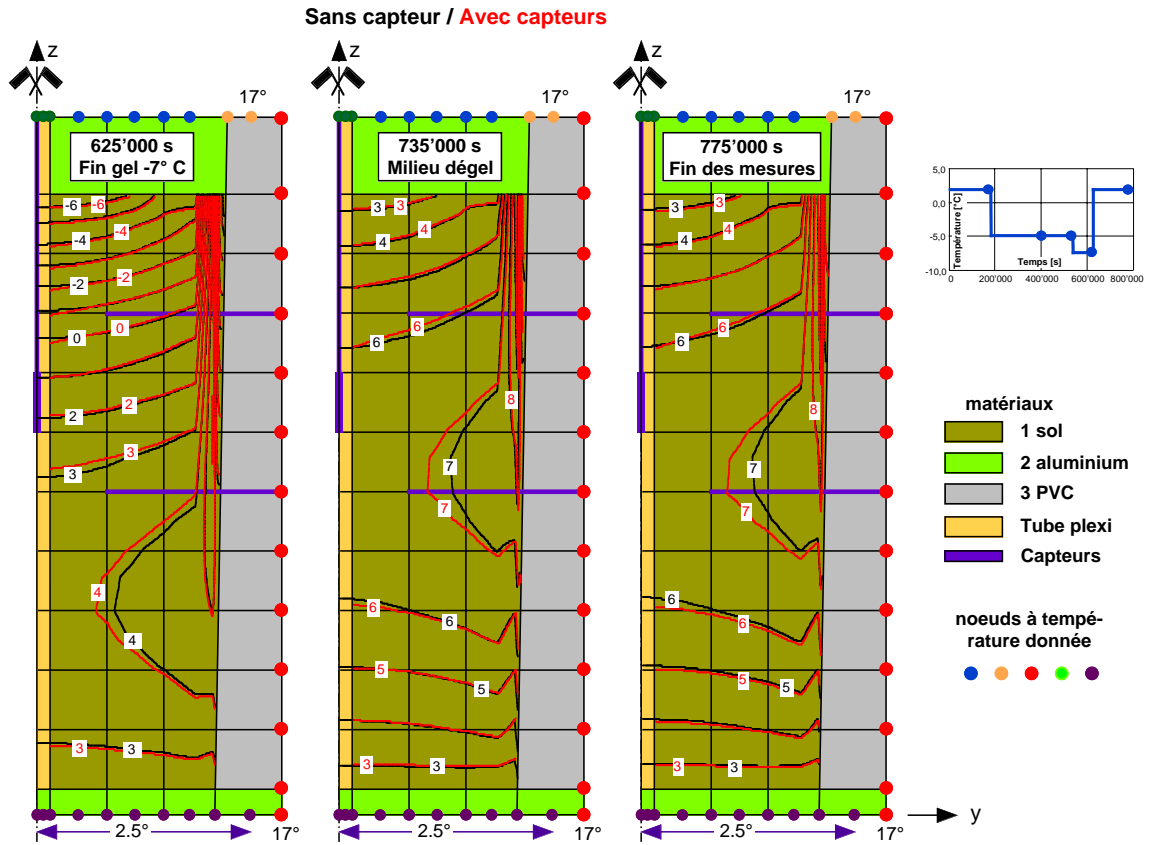
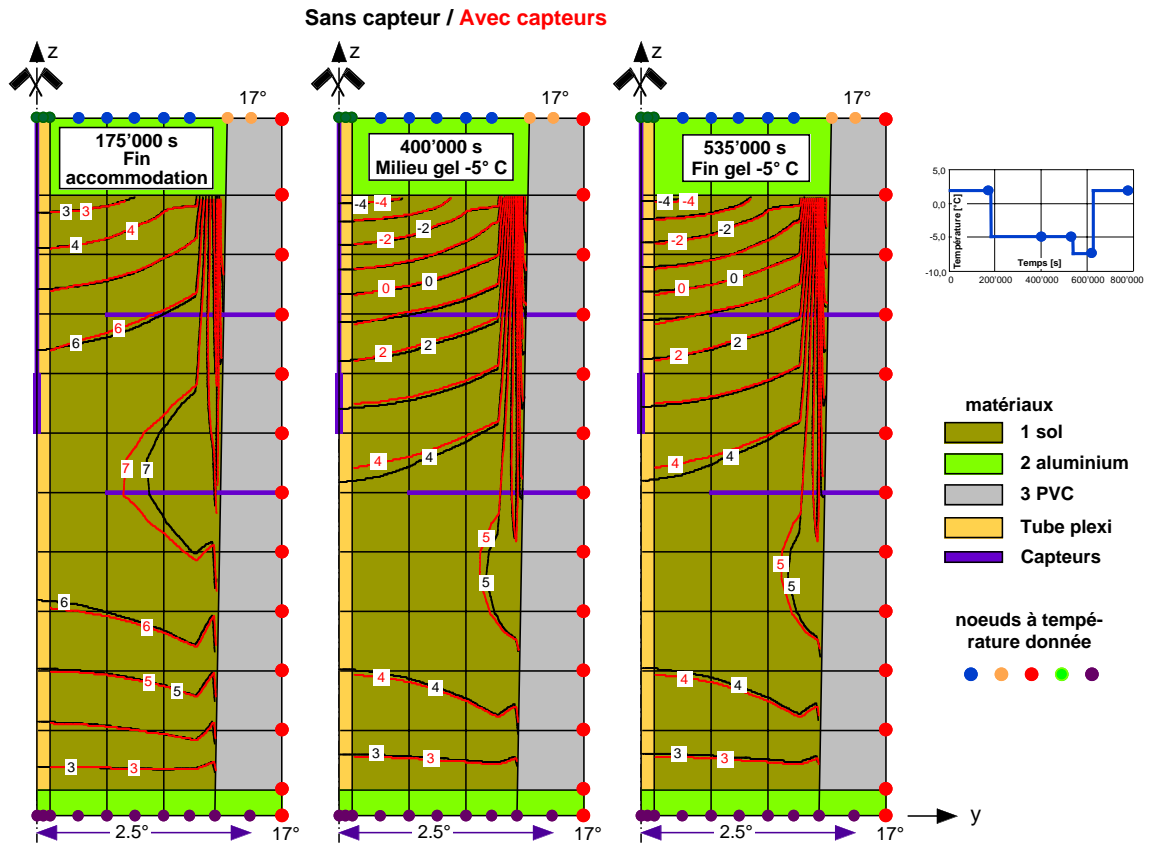


8-4 Comparaison des mesures avec la simulation numérique: essai no 1 sans capteur



8-5 Comparaison des mesures avec la simulation numérique: essai no 2 avec capteurs

Le calage terminé, on peut maintenant comparer les simulations des températures dans l'éprouvette, sans et avec les capteurs. Les figures 8-6 et 8-7 présentent cette comparaison par les isothermes à l'intérieur de l'éprouvette.

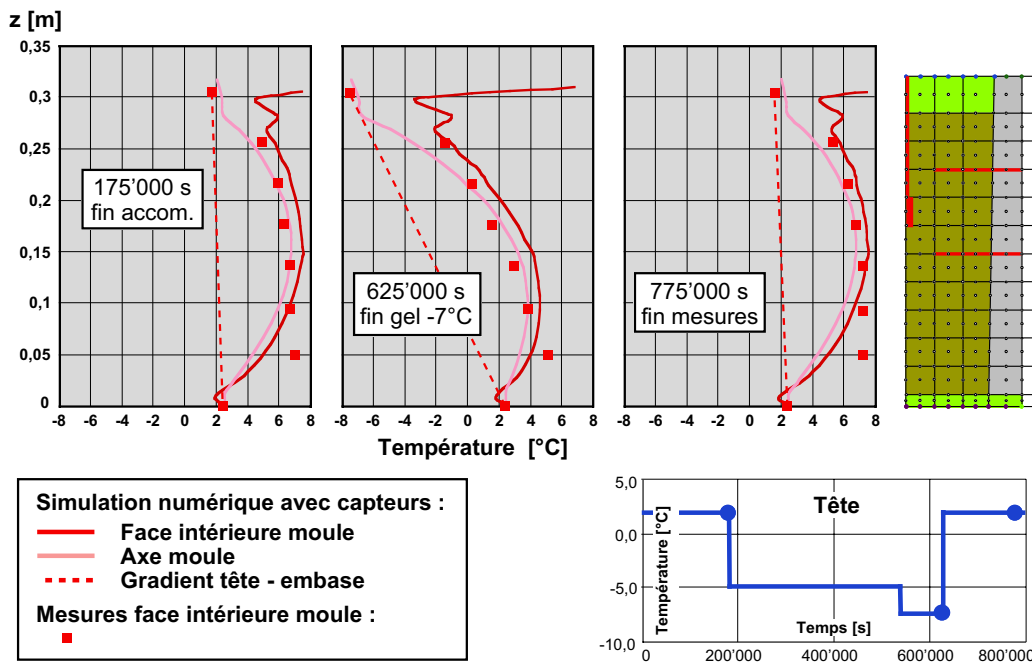


Les différences sont très faibles. En regardant de près ces deux figures, on remarquera que l'endoscope, son câble et les capteurs TDR ont un petit effet en apportant, par conduction, un peu de chaleur à l'intérieur de l'éprouvette. Sur la base de cette simulation, cet effet paraît négligeable.

8.3.6 Températures moule vs axe éprouvette

Les températures de l'éprouvette sont mesurées sur la face intérieure du moule (deux lignes de mesures), alors que les températures déterminantes pour l'exploitation des résultats sont surtout celles de l'axe de l'éprouvette. Avant les essais no 5 et 6, lors desquels les températures ont été mesurées sur l'axe, le seul moyen de les comparer était la simulation numérique correctement calée sur les résultats des mesures. La figure 8-8 présente cette comparaison pour la fin de l'accommodation (175'000 s), la fin de gel à -7°C (625'000 s) et la fin du dégel (775'000 s = fin des mesures). On remarque sur la figure 8-8 que, sur l'axe de l'éprouvette, l'allure des températures s'écarte franchement du gradient linéaire théorique entre la tête et l'embase. Malgré la double isolation de l'éprouvette, l'apport latéral de chaleur est important.

Ce problème a été en grande partie résolu par l'insertion d'un serpentin de refroidissement à l'intérieur de l'isolation extérieure du moule et par le remplacement de l'endoscope par 3 thermistances. (voir § 8.6).



8-8 Essais nos 1 et 2 : Températures sur l'axe de l'éprouvette vs celles sur le moule.

8.3.7 Conclusions

La comparaison des résultats des mesures de températures sur la face intérieure du moule, faites sans et avec les capteurs et surtout celle des simulations numériques menées par un modèle élaboré, montre que l'effet des capteurs sur la répartition des températures à l'intérieur de l'éprouvette n'est pas nulle, mais il peut être négligé.

8.4 Essai no 3

8.4.1 But de l'essai

C'est le premier essai complet où tous les paramètres ont été mesurés, et où l'endoscope a été utilisé de manière continue. On peut cependant encore considérer cet essai comme un essai de mise au point de la procédure, car tout n'a pas été sans problème.

8.4.2 Réseau, conditions aux limites et données

Le réseau utilisé, ses conditions aux limites et les paramètres thermiques des matériaux sont exactement ceux de l'essai no 5 (§ 8.6) où les températures ont été mesurées sur l'axe de l'éprouvette. Seule la température de la tête de refroidissement, fonction du temps, et celle, constante, de l'embase sont propres à cet essai.

8.4.3 Résultats

Ils sont très semblables à ceux de l'essai no 5 et ne seront pas décrits dans ce paragraphe. Cette simulation a surtout été utilisée pour déterminer la propagation du front de gel à l'intérieur de l'éprouvette qui est discutée aux chapitres 5 et 7.

8.5 Essai no 4

8.5.1 But de l'essai

Il est un peu le même que celui de l'essai no 3 avec cependant des paramètres qui tiennent compte des petits problèmes rencontrés lors de cet essai. Il devait surtout permettre d'examiner un peu mieux le phénomène de la fonte des lentilles de glace. Le gel et le dégel sont notamment beaucoup plus progressifs.

8.5.2 Modèle utilisé et données

Comme pour l'essai no 3, le modèle utilisé, ses conditions aux limites et les paramètres thermiques des matériaux sont exactement ceux de l'essai no 5 où les températures ont été mesurées sur l'axe de l'éprouvette. Seule la température, fonction du temps, de la tête de refroidissement et celle, constante, de l'embase sont propres à cet essai.

8.5.3 Résultats

Toujours comme pour l'essai no 3, ils sont très semblables à ceux de l'essai no 5 et ne seront pas décrits dans ce paragraphe. Cette simulation a surtout été utilisée pour déterminer la propagation du front de gel à l'intérieur de l'éprouvette.

8.6 Essai no 5

8.6.1 But de l'essai

Le but principal de l'essai no 5 était de mesurer les températures sur l'axe de l'éprouvette avec des thermistances placées sur l'axe de l'endoscope, ceci afin de tenter de mieux caler les résultats de la simulation numérique avec ceux des mesures.

8.6.2 Réseau et conditions aux limites

Comme pour les simulations précédentes, les éléments utilisés sont des éléments isoparamétriques en symétrie de révolution à 9 nœuds. Le réseau a été modifié sur la base d'études paramétriques ; il fait l'objet de la figure 8-10. Les principales différences avec le réseau des essais 1 & 2 (fig. 8-1) concernent les conditions aux limites simulant le contact entre les parties solides du dispositif d'essai et l'air ambiant ainsi qu'une modélisation plus précise de la tête de refroidissement. Les études paramétriques ont montré que, pour ce genre de simulation, les conditions aux limites sont déterminantes. Le réseau reste cependant simple. Par exemple, la double enceinte d'isolation n'est simulée que par un seul groupe d'éléments.

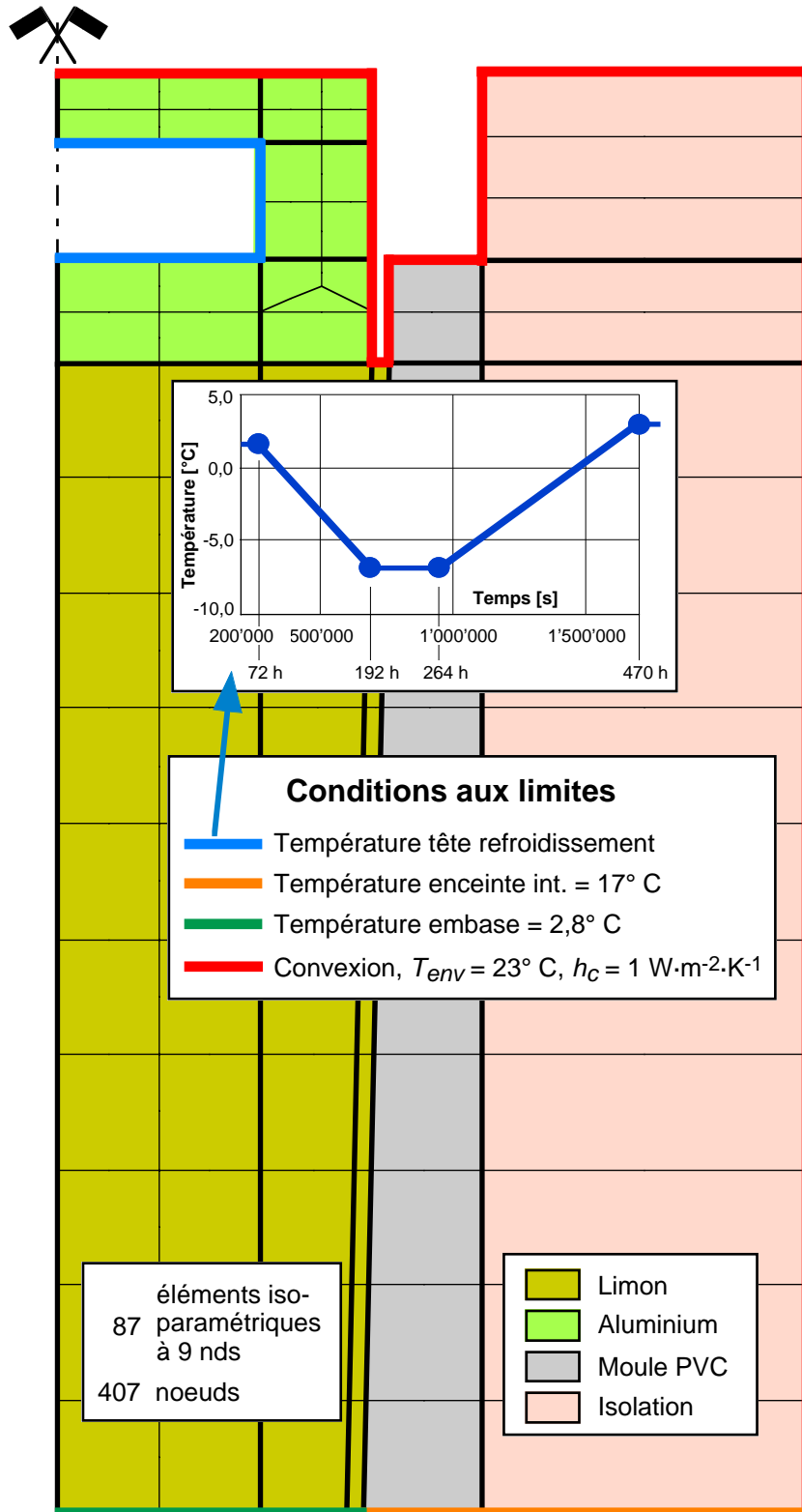
8.6.3 Données

Tous les matériaux à l'exception du sol ont des paramètres thermiques (conductivité et capacité thermique) constants en fonction des températures. Ils sont donnés sur le tableau 8-9. Ceux du sol décrivent exactement ce matériau complexe sur le plan thermique (fig. 8-11). On remarquera sur cette figure que, comme pour la simulation des essais 1 & 2, la chaleur latente du sol gelé est introduite explicitement par la capacité thermique. Suite aux simulations précédentes, la conductivité thermique de l'isolation a été légèrement augmentée. Il en est de même de la chaleur latente (fig. 8-11).

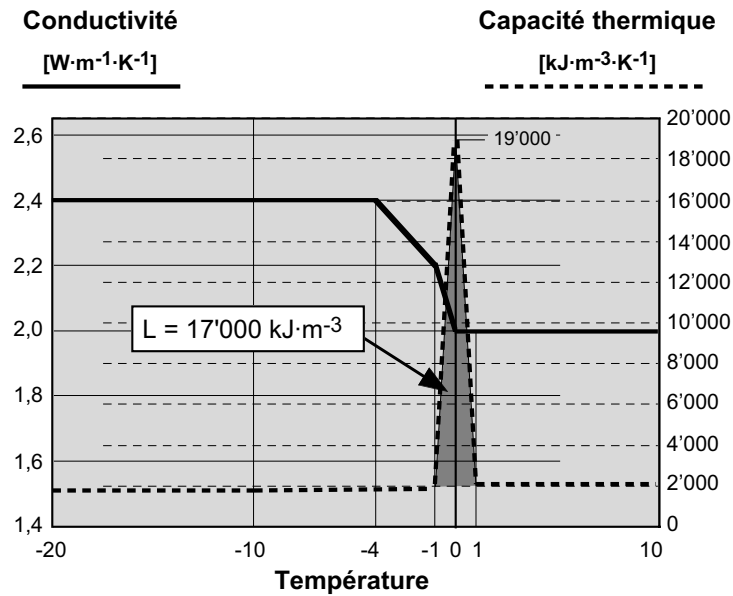
Pour les faces du dispositif d'essai en contact avec l'air, un faible coefficient de convection de $1 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ a été choisi car l'air du local d'essai est très stable. Des simulations avec des coefficients plus forts ont montré que cette valeur était correcte.

8-9 Essai no 5: Paramètres thermiques des matériaux autres que le sol

Matériaux		Conductivité [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	Capacité [$\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$]
2	Aluminium	220	2600
3	Moule en PVC	0,22	2100
4	Isolants	0,09	40



8-10 Essai no 5: Le réseaux d'éléments finis et ses conditions aux limites



8-11 Essai no 5 : Paramètres thermiques du sol

8.6.4 Résultats

Dans ce rapport, un seul résultat général sera présenté et discuté. C'est celui qui correspond à 886'000 secondes (246 heures), à savoir un point placé dans la zone temporelle où la température minimale de $-6,8^\circ\text{C}$ est constante. La figure 8-12 montre ce résultat sous la forme d'isothermes. Les isothermes correspondant aux mesures des températures sur l'axe de l'éprouvette et sur la paroi intérieure du moule sont aussi représentées sur cette figure. À propos de ces dernières, il est intéressant de signaler que, sur le plan de la position des isothermes, la simulation numérique est beaucoup plus précise que les mesures ! Les thermistances et leur support ont, en effet, un volume assez important et des effets de tige qu'il ne faudrait pas négliger. Par exemple, dans la paroi du moule, où faut-il placer le point correspondant à la mesure ? Les petits ronds de la figure représentent les points choisis un peu arbitrairement.

Sur la figure 8-12 on voit que l'isotherme 0°C , à savoir approximativement le front de gel, calculé coïncide assez bien avec celui mesuré. Cela est normal car c'est l'élément choisi pour le calage. C'est aussi l'isotherme la plus intéressante pour l'évaluation de l'essai et la comparaison avec les différentes mesures autres que les températures. Au-dessus par contre, la différence entre les mesures et la simulation est loin d'être satisfaisante.

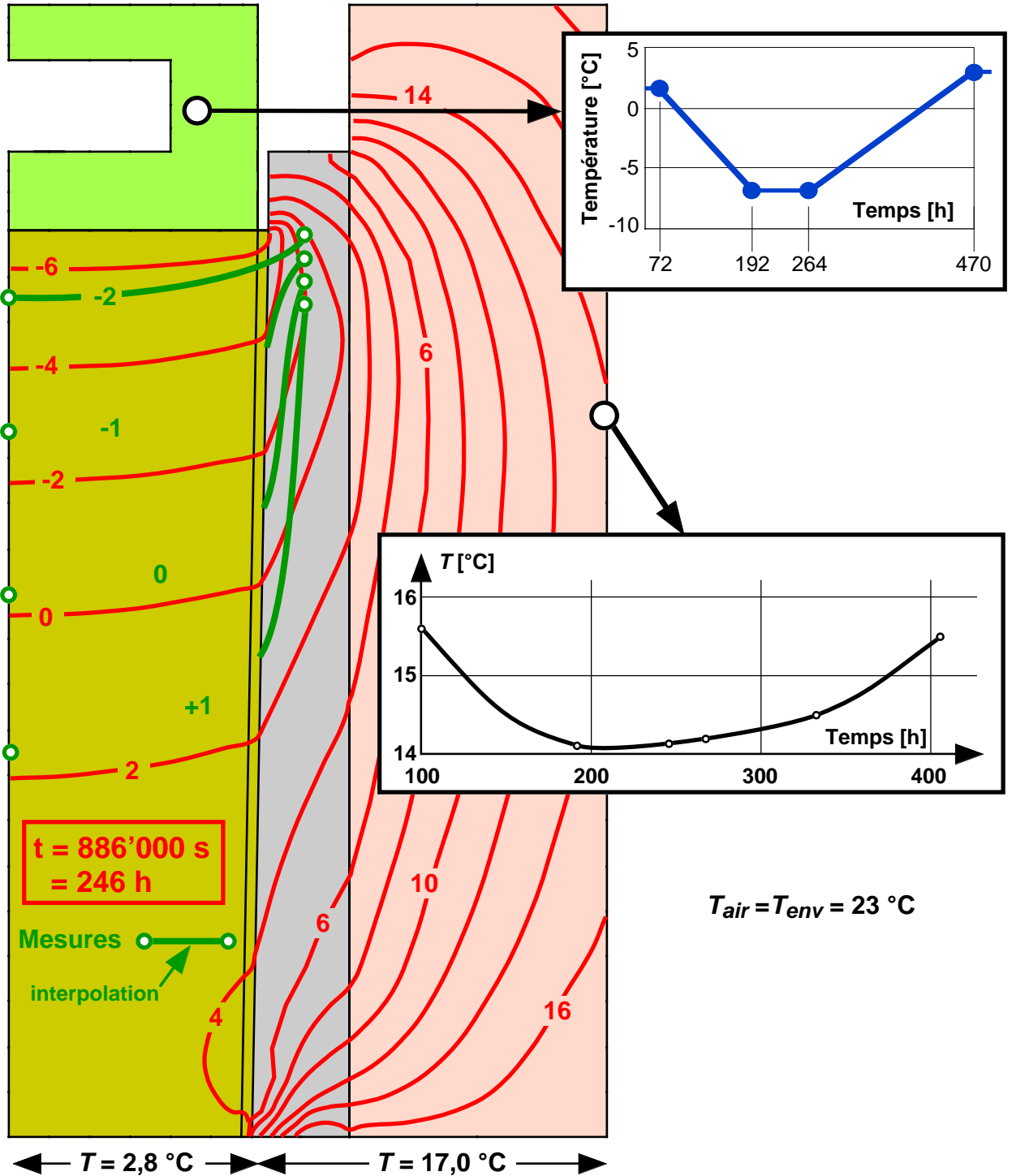
La variation des températures en fonction du temps, calculées en un point donné juste sous la limite convective de droite, est ajoutée sur cette figure, ceci à titre d'exemple. Cette relation montre la différence qu'il existe entre la température de l'environnement (air) $T_{env} = 23^\circ\text{C}$ et cette dernière. Si la simulation numérique avait été poursuivie bien au-delà de 400 heures, la température sur la limite de convective aurait atteint la température de l'air.

8.6.5 Propagation du front de gel

Cette simulation a aussi été utilisée pour déterminer la propagation du front de gel à l'intérieur de l'éprouvette.

8.6.6 Conclusions

La simulation de l'essai no 5 est loin d'être parfaite malgré quelques améliorations par rapport aux simulations précédentes. Le non-contact entre la tête et le moule est le point le plus délicat et n'a pu être résolu à satisfaction. En outre la non-simulation de la double enceinte est critiquable.



8-12 Essai no 5: Résultats (isothermes) au temps de 886'000 s (246 heures)

8.7 Autres simulations

D'autres simulations ont été tentées, notamment en introduisant des surfaces radiatives en plus des surfaces convectives entre la tête et le moule et en introduisant la double isolation. Pour les raisons évoquées ci-dessous, elles n'ont pu être menées à chef.

8.8 Remarques finales

Les résultats des simulations numériques entreprises et décrites dans les sections précédentes ont déçu l'auteur de ces lignes. Elles ont cependant remédié, pour certains essais, au fait que les températures n'étaient pas mesurées sur l'axe de l'éprouvette. L'auteur de ces lignes aurait souhaité reprendre ces simulations numériques avec un réseau beaucoup plus fin et l'usage de conditions aux limites convectives et radiatives et aussi les compléter par celles d'autres essais. Cependant, tout à une fin et par manque de temps et défaut de logiciel, cela n'a pu être réalisé.

9

Ré-exploitation des mesures dans la halle fosses

9.1 Introduction

De 1975 à 1985 environ, le Laboratoire de mécanique des sols de l'EPFL, sous la direction de l'auteur de ces lignes, a réalisé plusieurs essais en vraie grandeur dans une grande fosse d'essais construite lors du transfert de l'EPFL sur le site d'Écublens. Ces essais avaient été demandés par l'Association suisse des professionnels de la route et du trafic (VSS) pour permettre une profonde révision des normes de dimensionnement au gel des routes suisses.

L'hiver 1962/63 fut le plus froid du XXe siècle et causa des dégâts très importants sur l'ensemble du réseau routier suisse. Suite à cet hiver, une révision importante de la première norme de dimensionnement au gel s'est avérée nécessaire. Cependant, les ingénieurs de l'époque ont été un peu trop prudents et cette révision a conduit à des épaisseurs de superstructure un peu généreuses. En outre, elle n'avait pas pour base des recherches scientifiques et techniques sérieuses si ce n'est celles réalisées aux États-Unis lors de l'essai AASHTO (1962). Une deuxième révision était donc nécessaire et elle a été possible grâce aux essais en vraie grandeur réalisés dans la halle fosses (s car il y a deux fosses d'essai !).

Une ré-exploitation des très nombreuses mesures réalisées pendant ces essais en vraie grandeur au gel et dégel est fort utile car leur instrumentation très complète et élaborée permet d'aller plus loin que ce qui avait été fait à l'époque (Dysli 1978, Pfister, Dysli & Recordon 1979, Dysli & Pfister 1980, Dysli & Pfister 1982, Dysli 1982, Dysli, Pigois & Jaccot 1982, Dysli & Bourdeau 1984, Lefebvre & Dysli 1988, Dysli & Boccard 1991, Dysli 1991a, , Dysli 1991b, Dysli 1993, Dysli 1999a, Dysli 1999b, Dysli 2000, Dysli 2001). En particulier, elle permettra l'évaluation des modules résilients de l'infrastructure pendant le dégel des lentilles de glace, évaluation qui n'avait pas été réalisée à l'époque.

9.2 Installation d'essais

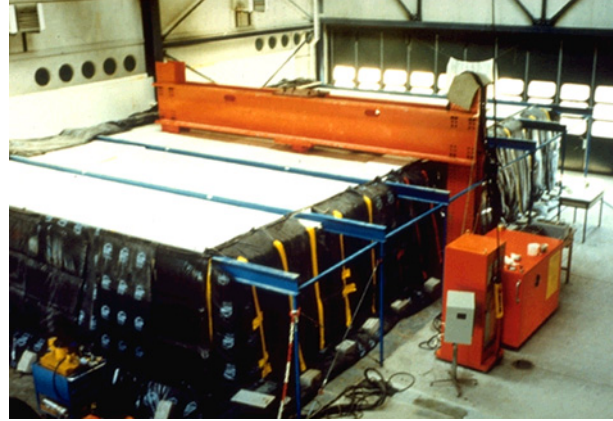
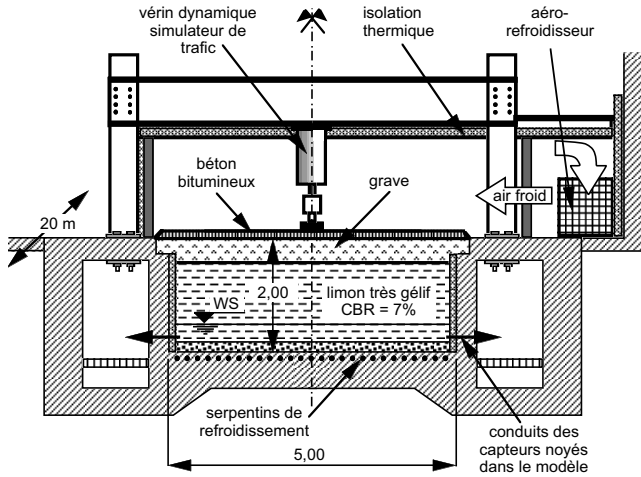
Les essais ont été entrepris dans le dispositif d'essai décrit schématiquement sur la figure 9-1. Cette installation, placée dans une halle, comprend une fosse de 20 mètres de longueur, de 5 mètres de largeur et de 2 mètres de profondeur, un dispositif de contrôle de la température de l'air jusqu'à -20°C au-dessus de la fosse et jusqu'à -10°C pour le fond, et un simulateur de trafic constitué par un vérin dynamique.

Tout au long des essais, les paramètres suivants étaient mesurés par de nombreux capteurs placés dans les modèles en vraie grandeur de chaussées et sur leurs limites :

- quelque 40 thermomètres Pt 100 (fig. 9-2),
- quelque 10 tensiomètres (fig. 9-2),
- quelque 8 axes verticaux de mesure des tassements par des capteurs magnétiques (fig. 9-3),
- environ 30 capteurs de contraintes verticales de type Glötzl (fig. 9-4),
- environ 3 capteurs de contraintes verticales et de cisaillement de type Cambridge (fig. 9-5)
- quelques tubes verticaux pour la mesure des masses volumiques par un nucléo-densimètre (rayons gamma) et de la teneur en eau par une sonde à neutrons,

- Jusqu'à 3 cadres de référence pourvus de nombreux comparateurs pour la mesure dynamique et statique des déformations verticales de la surface (fig. 9-6).

Un grand nombre de ces capteurs étaient reliés à un datalogger avec enregistrement des données sur bande magnétique.



9-1 Dispositif d'essais en vraie grandeur d'Ecublens



9-2 Thermomètre Pt 100 et tensiomètre (remote, 2 tubes)

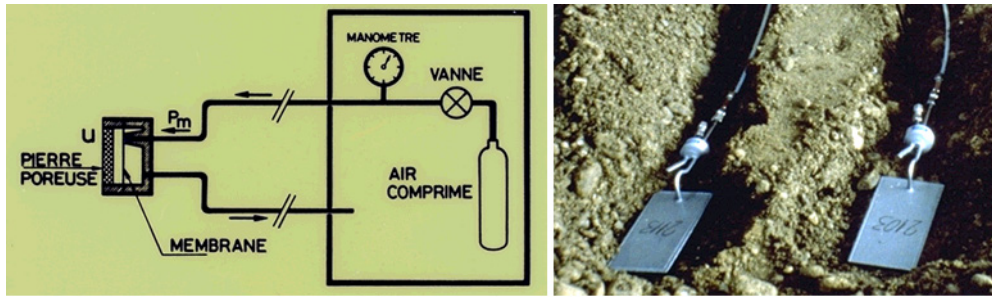
CAPTEURS

APPAREIL DE CONTROLE

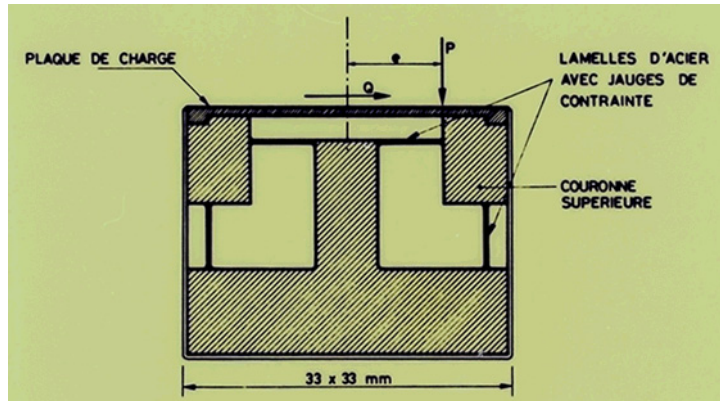
PRINCIPE : LA VARIATION DE DISTANCE DES BOBINES PROVOQUE UNE VARIATION DU COURANT INDUIT. ON UTILISE LE CHANGEMENT D'AMPLITUDE DU COURANT INDUIT POUR DETERMINER LE DEPLACEMENT DES BOBINES A L'AIDE DE COURBES D'ETALONNAGE PREALABLEMENT ETABLIES.

NIVELLEMENT

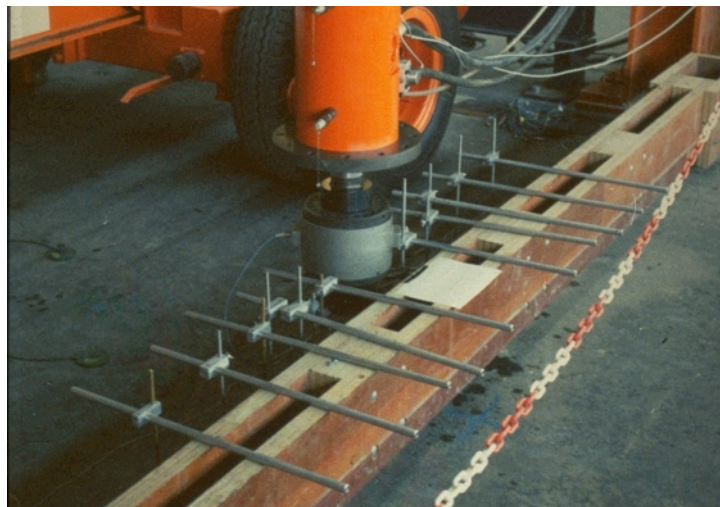
9-3 Capteur magnétique de tassement



9-4 Capteurs de pression des terres Glötzl



9-5 Capteur de contraintes verticales et de cisaillement Cambridge



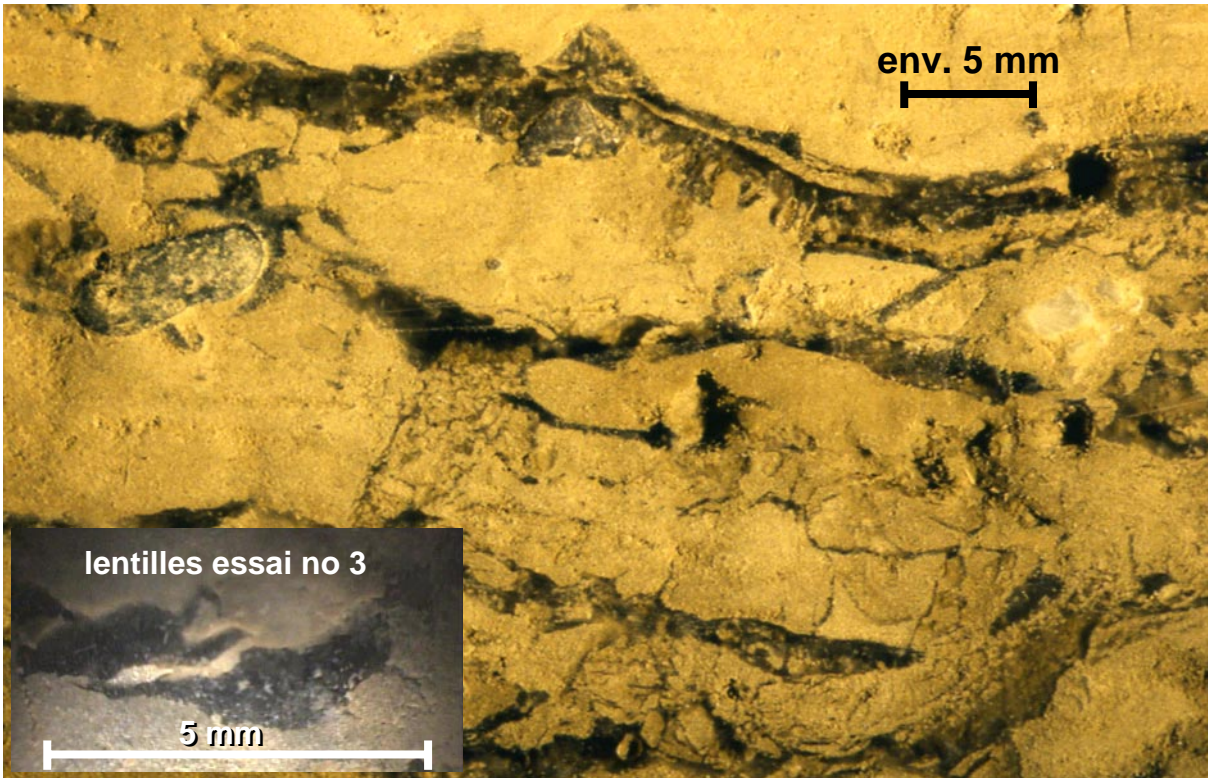
9-6 Vérin dynamique et comparateurs avec cadre de référence

9.3 Lentilles de glace de la halle fosses

Lors des essais entrepris dans la halle fosses d'Écublens, avant le dégel, des carottages étaient exécutés en diamètre de 10 cm. Les carottes étaient rapidement coupées en deux et des photographies des lentilles de glace étaient prises.

Il est donc intéressant de comparer ces photos avec celles réalisées avec l'endoscope lors de la présente recherche. La figure 9-7 est un exemple typique de cette comparaison. La grande photographie a été prise sur une carotte prélevée dans le limon de la halle fosses et la petite, en

bas à gauche, est une des nombreuses photographies prises avec l'endoscope. On constate que l'ordre de grandeur et la topologie générale des lentilles sont les mêmes. Comme les lentilles de glace de la halle fosses se sont développées dans un sol gélif quasi naturel et avec des conditions de gel réelles, cela montre que le dispositif d'essai, le mode de compactage du limon et les gradients thermiques utilisés pour la présente recherche représentent bien le comportement réel d'un sol gélif soumis au gel et au dégel. D'autres comparaisons peuvent être faites avec les photographies à l'endoscope présentées au chapitre 5.



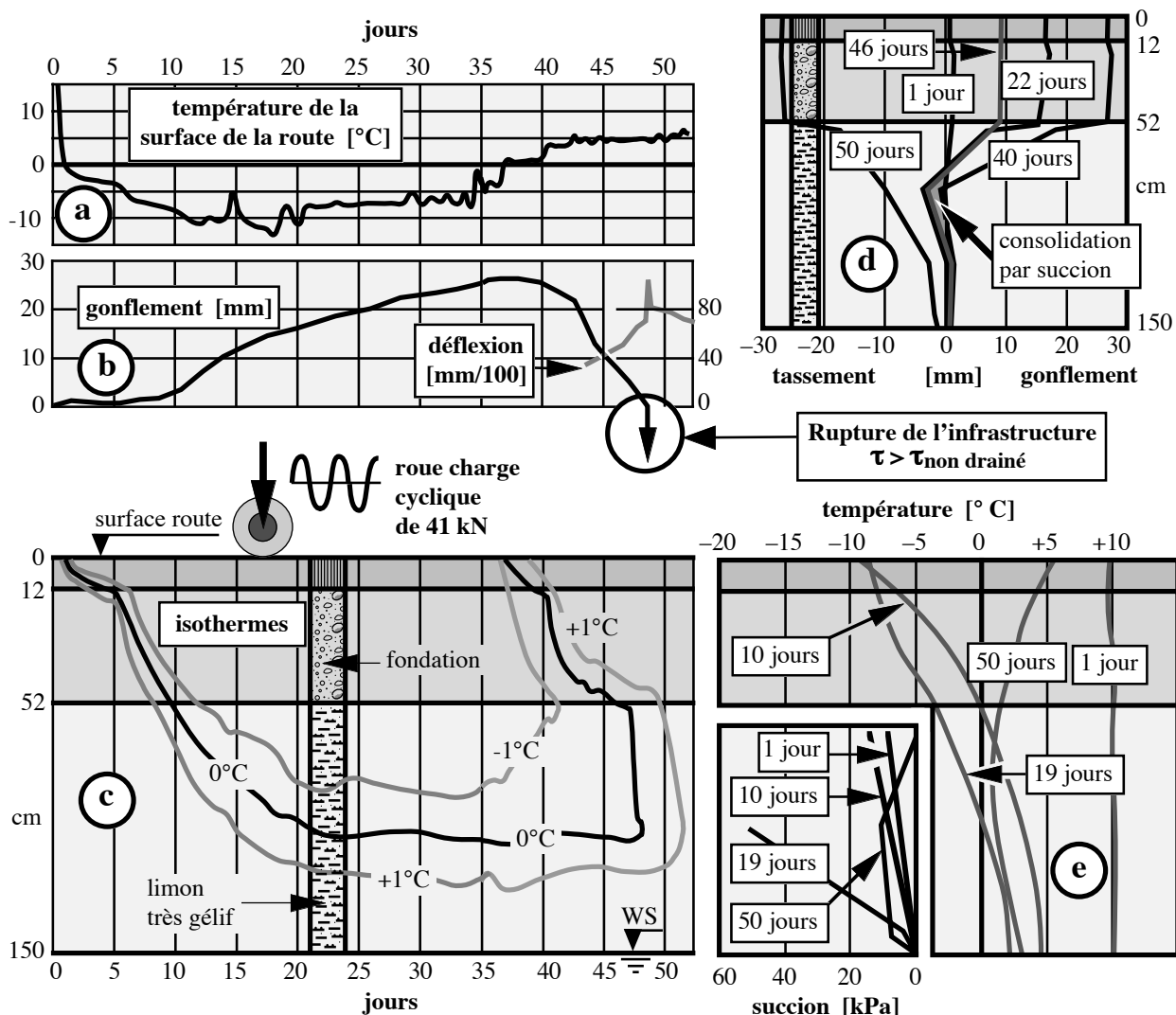
9-7 Comparaison des lentilles de glace de la halle fosses avec celles de la présente recherche

9.4 Buts de la ré-exploitation

Lors des essais réalisés dans la halle fosses d'Écublens les modules résilients de l'infrastructure pendant le dégel des lentilles de glace n'avaient pas été évalués alors que certaines mesures le permettaient. L'infrastructure était constituée d'un limon très gélif aux caractéristiques très proches de celui utilisé pour cette recherche. Le but de cette ré-exploitation des résultats des essais réalisés dans la halle fosses est donc, seulement, l'évaluation de ces modules.

9.5 Principaux résultats de l'époque

Un des nombreux résultats des essais réalisés dans la halle fosses d'Écublens (fig. 9-8) permet de décrire exactement et d'expliquer la chronologie de la formation et de la fonte des lentilles de glace avec leurs conséquences sur les gonflements et la portance de la chaussée que l'on quantifie sur cette figure par la mesure de la déflexion, à savoir le tassement de la chaussée sous un essieu chargé à 100 kN (fig. 9-8b et 9-8d).



9-8 Principaux résultats d'un essai caractéristique

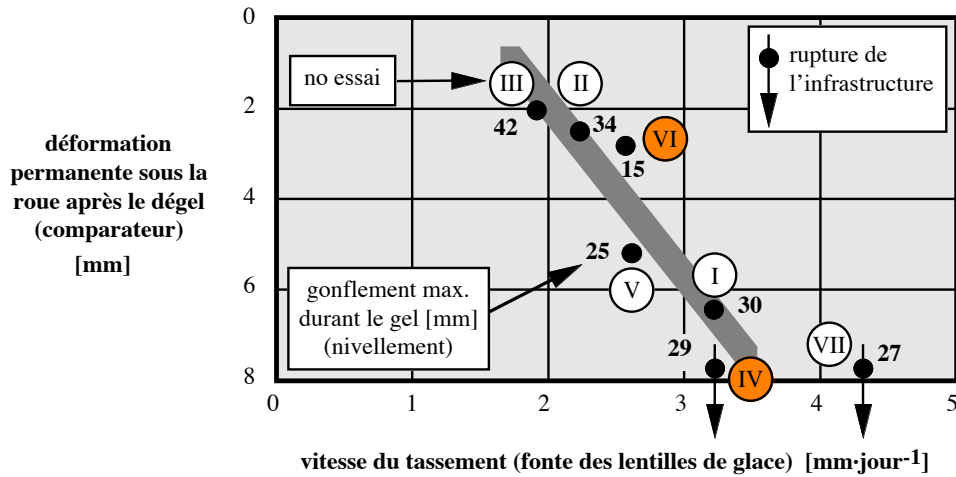
- a** Températures sur la surface de la route
- b** Gonflements et déflexions en fin d'essai
- c** Isothermes 0, -1 et +1° C sous la surface de la route
- d** Déformations sous la surface de la route
- e** Températures et succions capillaires en fonction de la profondeur

Dès le début du gel, l'isotherme 0° C (front de gel) commence à descendre dans le revêtement et la couche de fondation de la chaussée. Après un certain temps, le front de gel atteint le sol gélif de l'infrastructure. Des lentilles de glace commencent alors à se former sous la couche de fondation et l'on constate des gonflements à la surface de la chaussée. Dès le début du dégel, les lentilles de glace commencent à fondre et les gonflements constatés à la surface de la chaussée diminuent. L'eau interstitielle excédentaire provenant de la fonte des lentilles, qui ne peut s'échapper rapidement par drainage (Dysli, 1993), fait chuter la résistance au cisaillement du matériau gélif par diminution de la contrainte effective: une part plus ou moins importante de la contrainte totale due aux charges des essieux est reprise par la pression interstitielle.

On remarque notamment sur cette figure 9-8, la brutale fermeture de l'isotherme 0° C due à la chaleur latente de fusion de la glace des lentilles qui conduit à la fonte rapide des lentilles de glace et à la diminution brutale de la résistance au cisaillement de l'infrastructure. Comme le montre la figure 9-9, c'est la vitesse du dégel qui régit surtout la diminution de la portance d'une

infrastructure de voie de communication lors du dégel. Sur cette figure, les deux essais en orange sont ceux utilisés pour l'évaluation des modules résilients.

Il se pourrait aussi que les déformations permanentes sous la roue soient un peu fonctions de l'épaisseur de la zone gelée sous la couche de fondation.



I	1 ^{er} essai sur champ 1 (fondation de 50 cm d'épaisseur)
II	2 ^{ème} essai sur champ 1 (fondation de 50 cm d'épaisseur)
III	3 ^{ème} essai sur champ 1 (fondation de 50 cm d'épaisseur)
IV	1 ^{er} essai sur champ 2 (fondation de 40 cm d'épaisseur)
V	2 ^{ème} essai sur champ 2 (fondation de 40 cm d'épaisseur)
VI	1 ^{er} essai sur champ 3 (fondation de 30 cm d'épaisseur)
VII	2 ^{ème} essai sur champ 3 (fondation de 30 cm d'épaisseur)

9-9 Influence de la vitesse du dégel sur la portance

9.6 Simulation numérique

L'essai caractéristique décrit par la figure 9-8 a été modélisé numériquement par un code d'éléments finis (ADINAT, Bathe, 1982). Cette modélisation utilise la très classique équation de la diffusion thermique de Fourier décrite par l'équation (1) et les conditions aux limites (2) et (3) avec prise en compte de la chaleur latente volumique L de fusion de la glace. À l'exception de la chaleur latente, tous les paramètres thermiques sont fonctions de la température et du temps; le modèle est donc non linéaire.

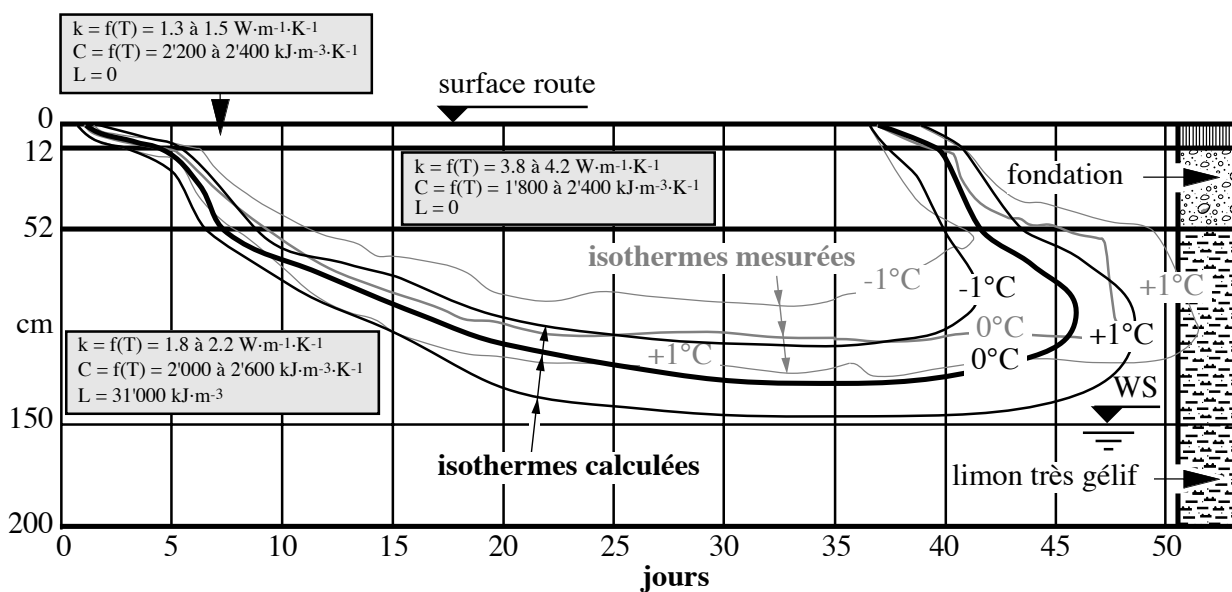
$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = -q^B \quad (1)$$

$$T|_{S1} = T_{env} \quad (2) \quad k_n \frac{\partial T}{\partial n} |_{S2} = q^S \quad (3)$$

T est la température, $k = f(T \text{ ou } t)$ est la conductivité thermique, q^B la vitesse d'extraction de chaleur générée par unité de volume ($= \frac{C}{k} \frac{\partial T}{\partial t}$ avec C la capacité thermique volumique), et t le temps. T_{env} est la température extérieure sur la surface $S1$, q^S le flux thermique entrant sur la surface $S2$ (flux de chaleur concentré, convection, radiation solaire) et k_n la conduction

thermique normale à la surface. La chaleur latente volumique de fusion de la glace L est introduite par une relation $C = f(T)$ autour du 0°C .

La figure 9-10 décrit le résultat obtenu avec un code d'éléments finis ADINAT résolvant l'équation (1), résultat correspondant à l'essai qui fait l'objet de la figure 9-8. Cette figure montre que l'on peut simuler correctement la fermeture brutale de l'isotherme 0°C avec un code un peu élaboré, notamment pas ses conditions aux limites, basé sur une équation très classique. La chaleur latente de fusion de la glace admise est cependant un peu élevée.



9-10 Résultat de la simulation numérique de l'essai de la figure 9-8
Dysli, 1998

9.7 Modules résilients (ré-exploitation)

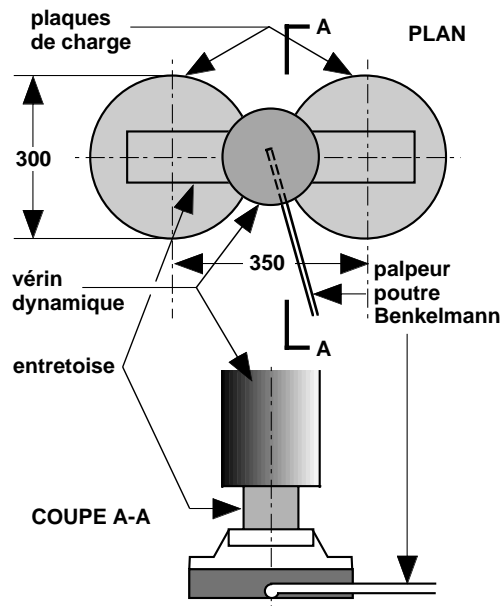
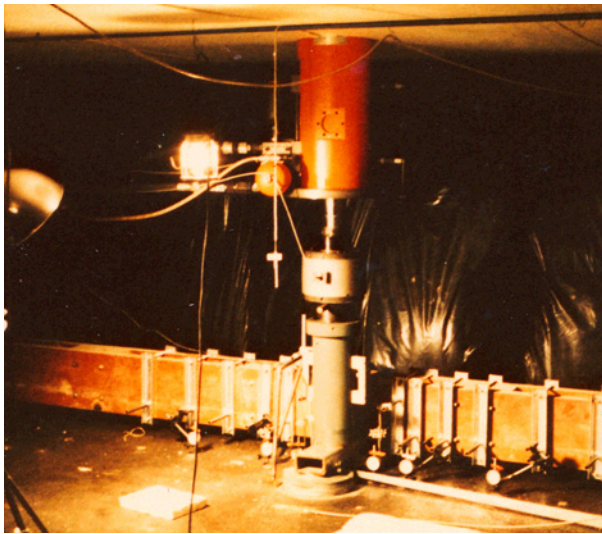
9.7.1 Dispositif de charge

Le dispositif de charge du modèle en vraie grandeur de la route était constitué d'un vérin dynamique s'appuyant sur deux plaques de 300 mm de diamètre posées sur le revêtement bitumineux. Ces deux plaques simulaient le double pneu d'une roue de camion et sont décrites par la figure 9-11 et par la figure 9-6. La charge verticale était de 40,8 kN et sa fréquence de 0,5 Hz. Ce chargement dynamique correspondait approximativement à un convoi ininterrompu de camions à deux essieux roulant à environ 60 km/h avec une distance entre véhicules de 60 m, à savoir un trafic extrême d'environ 43'000 essieux de 81,6 kN par jour.

9.7.2 Mesures utilisées

Le gonflement maximal est celui mesuré par nivellement. La déformation permanente sous le dispositif de charge (la roue) est celle mesurée par les comparateurs (fig. 9-11). Les gonflements et tassements en fonction de la profondeur sont mesurés par les capteurs magnétiques « Bison » (fig.9-3). Les contraintes verticales sous le dispositif de charge sont mesurées par les capteurs de pression des terres « Glötzl » (fig. 9-4) et, quelquefois, par les capteurs « Cambridge » (fig. 9-5).

Elles sont contrôlées par calcul. Enfin, la déflexion élastique sous les charges périodiques est mesurée au moyen d'une poutre de Benkelmann (fig. 9-11).



9-11 Dispositif de chargement

9.7.3 Méthode d'estimation des modules résilients

Les gonflements et tassements mesurés, dans l'infrastructure gélive (en dessous de la couche de fondation), par les capteurs magnétiques englobent les déplacements verticaux dus à la fonte des lentilles de glace et ceux dus au chargement dynamique par le dispositif de charge simulant une roue de camion chargée à 41 kN. Ce sont ces derniers qui doivent être utilisés pour l'évaluation des modules résilients. Pour estimer les déplacements verticaux relatifs à la seule charge dynamique, comme les mesures ont été réalisées sur les trois champs, on déduit les déplacements mesurés sous un champ non chargé de ceux mesurés sous le champ chargé. Ces déplacements sont la première base pour le calcul des modules résilients.

Les contraintes en fonction de la profondeur sont la deuxième base de calcul des modules résilients. Ce sont les contraintes calculées qui seront utilisées.

Sous la couche de fondation, les modules résilients varient fortement en fonction de la profondeur. Pour cette raison, ils seront déterminés dans trois ou quatre couches (bandes) de 20 cm d'épaisseur (voir figures 9-12 et 9-13). Ces modules sont des modules dynamiques relatifs à la déformation permanente due à la charge cyclique. Ils seront calculés, pour diverses phases du dégel (du jour x au jour y), pour une seule charge périodique (division du tassement total de la phase par le nombre de cycles de charge) ou pour tous les cycles de charge.

Un autre module de déformation sera déterminé par les mesures de déflexions. Dans ce cas, comme seule la mesure de surface est connue, on admettra que la déformation du revêtement et de la couche de fondation est nulle et que toute la déformation verticale se produit dans les premiers 20 cm de l'infrastructure gélive. Les modules ainsi déterminés seront donc plutôt un ordre de grandeur.

9.7.4 Résultats de l'estimation des modules résilients

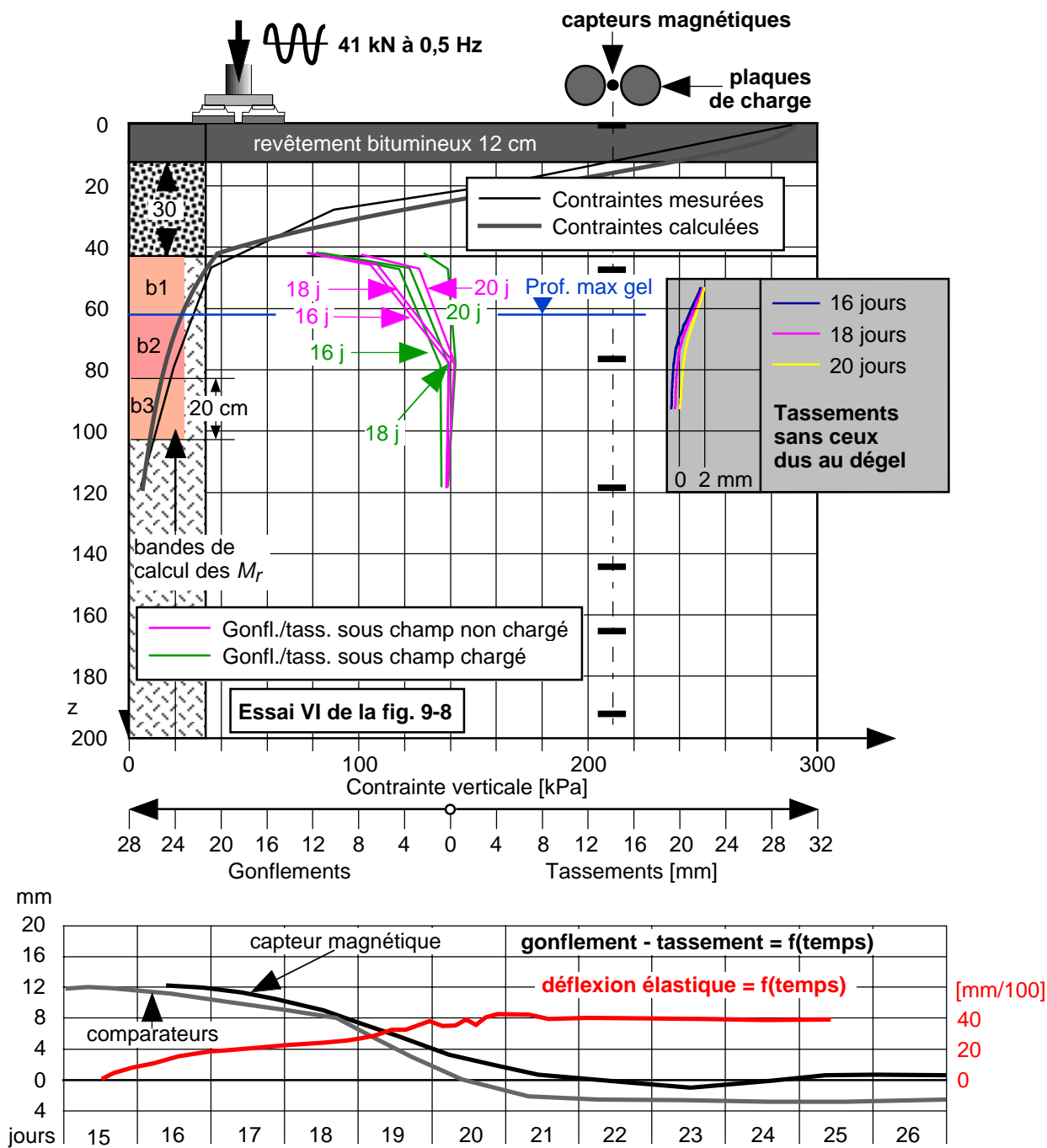
Parmi tous les essais réalisés dans la halle fosses d'Écublens, seuls deux essais caractéristiques ont été ré-exploités. Ce faible nombre provient du fait que beaucoup de mesures différentes devaient être disponibles pour l'évaluation des modules résilients et cela n'était le cas que pour deux ou trois essais. À l'époque, il n'avait pas été prévu d'exploiter les essais en vue de déterminer des modules résilients. En outre, les innombrables mesures effectuées n'ont pas toutes été consignées dans les rapports de recherche et elles se trouvent aujourd'hui sur des supports quasiment illisibles aujourd'hui (bandes magnétiques).

Les deux essais ré-exploités sont :

- l'essai désigné par le numéro VI sur la figure 9-9, défini surtout par un faible tassement permanent sous la roue du camion,
- et l'essai désigné par le numéro IV sur la figure 9-9, défini surtout par une forte vitesse de fonte des lentilles de glace et par le poinçonnement de la chaussée.

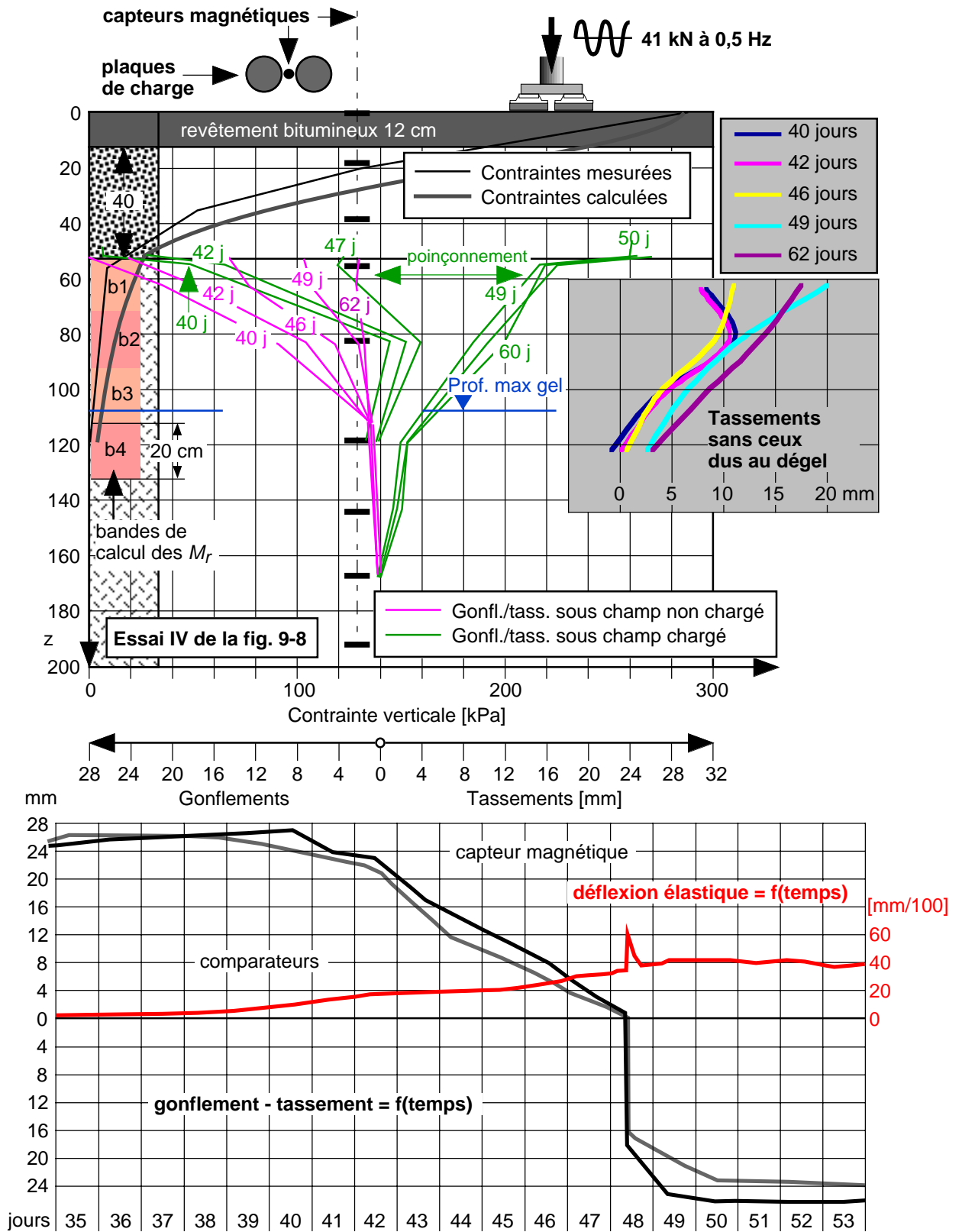
Seuls les résultats concernant le dégel sont exploités. Les principaux paramètres de ces deux essais sont donnés sur les figures 9-12 et 9-13. Les éléments suivants sont reportés sur ces deux figures :

- La coupe de la superstructure de la route composée d'un revêtement bitumineux de 12 cm d'épaisseur et d'une couche de fondation en grave d'épaisseur variable (30 ou 40 cm).
- La position des capteurs de déplacement vertical « Bison ».
- Un schéma du dispositif de charge.
- Les gonflements et les tassements en fonction de la profondeur mesurés sous le champ d'essai soumis aux chargements dynamiques (couleur verte) et sous un champ voisin non chargé (couleur rouge).
- Les contraintes en fonction de la profondeur, mesurées et calculées. Ce sont ces dernières qui seront utilisées pour l'évaluation des modules résilients.
- La position des bandes du calcul des modules résilients (b1, b2, b3, b4).
- En grisé, les tassements, sans ceux dus au dégel, qui seront utilisés pour l'évaluation des modules résilients pour chaque bande de calculs. Ces tassements sont obtenus par déduction des tassements sous le champ non chargé de ceux sous le champ chargé, ceci pour se soustraire des tassements dus uniquement au dégel. Ces tassements sont à la même échelle que celle des gonflements et tassements totaux.
- Les gonflements et tassements mesurés sur le revêtement en fonction du temps. Deux courbes sont données : celle correspondant aux mesures effectuées par les comparateurs disposés à la surface du revêtement bitumineux (fig. 9-11) et celle mesurée par le capteur magnétique de déplacement vertical placé à la surface du revêtement.
- Les déflexions à la surface du revêtement en fonction du temps, mesurées avec la poutre de Benkelmann.



9-12 Essai no VI. Contraintes sous la plaque et déplacements

On constate sur la figure 9-12 que les tassements, sans ceux dus au dégel, sont extrêmement faibles. Les modules résilients dynamiques correspondant n'ont ainsi que peu de signification et ne seront exploités qu'en partie sur le tableau 9-14. La figure 9-12 illustre cependant bien le cas d'un dégel à vitesse modérée de fonte des lentilles de glace. Les déflexions élastiques sont dans ce cas tout à fait exploitables (tableau 9-15).



9-13 Essai no IV. Contraintes sous la plaque et déplacements

Les résultats de l'estimation des modules résilients pour l'essai IV sont eux consignés dans le tableau 9-14 et ceux relatifs aux déflexions sur le tableau 9-15

Trois types de modules résilients au dégel sont donnés sur le tableau 9-14 :

- Un module correspondant à 100 cycles de charge de 41 kN ; à savoir le nombre moyen de cycles des essais du CRREL (voir chapitre 10).
- Un module correspondant à la période considérée (jour x à jour y) qui a une signification que dans certains cas, par exemple lors du début du poinçonnement de l'infrastructure (jours 46 à 49 de l'essai IV).
- Un module correspondant à toute la période de dégel. C'est le plus intéressant car il pourrait être utilisé comme module de dimensionnement (voir chapitre 10).

9-14 Résultats de l'estimation des modules résilients M_r

		Modules M_r [kPa]											
Essai	VI						IV						
Figure	9-12						9-13						
	Période [jour]		Période [jour]										
	16 - 20	40 - 42	42 - 46	46 - 49	49 - 62	40 - 62							
Cycles	172'800		86'400		172'800		129'600		561'600		950'400		
Bande	pour 100 cycles	pour tout le dégel (tous les cycles)	pour 100 cycles	pour tous les cycles	pour 100 cycles	pour tous les cycles	pour 100 cycles	pour tous les cycles	pour 100 cycles	pour tous les cycles	pour 100 cycles	pour tout le dégel (tous les cycles)	
b1	ss	ss	3,5E+7	4,0E+4	1,3E+6	7,7E+2	8,4E+5	6,5E+2	ss	ss	5,4E+6	5,7E+2	
b2	ss	ss	ss	ss	2,4E+6	1,4E+3	9,8E+5	7,6E+2	ss	ss	1,1E+7	1,2E+3	
b3	1,9E+7	1,1E+4	ss	ss	ss	ss	ss	ss	6,7E+6	1,2E+3	ss	ss	
b4	-	-	ss	ss	ss	ss	8,0E+2	6,2E+2	2,0E+6	3,6E+2	5,9E+6	6,2E+2	

ss = sans signification, en général module négatif

9-15 Résultats de l'exploitation des mesures de déflexion

Essai	VI				IV			
Figure	9-12				9-13			
Jour	16	19	23	41	46	48 poinçonnement	51	
Déflexion [mm/100]	15	32	40	14	25	62	40	
Module [kPa]	3,7E+4	1,8E+4	1,4E+4	2,9E+4	1,6E+4	6,5E+3	1,0E+4	

D'une manière générale et en ce qui concerne les modules résilients, le résultat de la ré-exploitation des essais réalisés dans la halle fosses d'Écublens est un peu décevant. Cela provient notamment du fait que les mesures sans le chargement dynamique sont réalisées, obligatoirement, sur un champ un peu différent de celui qui reçoit le dispositif de charge avec des conditions de gel et de dégel forcément légèrement différentes de celles qui prévalent sur le champ chargé.

Parmi les modules obtenus par les mesures de déflexion en surface, le seul que l'on puisse vraiment considérer comme un module résilient est celui correspondant au 48^{ème} jour de l'essai IV, à savoir au poinçonnement de l'infrastructure. Il est de 6'500 kPa.

On peut comparer ces modules avec un module de déformation très connu dans le domaine des routes suisses, à savoir l'ancien module M_E de contrôle de la couche de fondation en grave qui est de 80'000 kPa (8,0E+4 kPa).

Au chapitre 10, les résultats de la ré-exploitation des mesures dans la halle fosses d'Écublens en ce qui concerne les modules résilients, seront discutés et comparés avec ceux obtenus par d'autres méthodes

10

Applications aux voies de communication

10.1 Applications retenues

Ce chapitre est important car c'est celui qui présente le plus d'intérêt pour le l'Office fédéral des routes (OFROU) qui a attribué le crédit de recherche qui a lui-même permis de réaliser toute la recherche expérimentale (chapitres 2 à 8).

Deux des résultats généraux obtenus pendant la recherche sont retenus pour être appliqués dans le domaine routier et ferroviaire. Ce sont :

- Les mesures de température, succion capillaire, teneur en eau non gelée, déplacements par rayons X, ainsi que les photographies prises avec l'endoscope, qui vont permettre de mieux expliquer le phénomène du dégel et ainsi de *contribuer à l'amélioration des méthodes de construction des voies de communication*. La *section 10.2* est consacrée à cette première application.
- La mesure des *modules résilients* pendant le dégel dans les éprouvettes des essais de la présente recherche (chapitre 6) et les modules résilients obtenus par la ré-exploitation des essais réalisés dans la halle fosses d'Écublens (chapitre 9) qui vont permettre d'améliorer les méthodes de *dimensionnement au dégel des voies de communication*. L'utilisation de modules résilients au dégel dans le dimensionnement des voies de communication va dans le sens de la tendance de remplacer l'empirisme des méthodes actuelles par des méthodes plus rationnelles basées sur les lois de la mécanique du continu et les lois de comportement propres à chaque matériau constituant l'infrastructure et la superstructure d'une voie de communication.

Cette deuxième application a un volume très important. Pour cette raison, elle sera divisée en plusieurs sections. Tout d'abord, la *section 10.3* sera consacrée à la définition et aux méthodes de détermination du module résilient. Il va falloir ensuite examiner les méthodes actuelles de dimensionnement au dégel utilisant ce module les plus intéressantes. La *section 10.4* est ainsi consacrée aux normes finlandaises, la *section 10.5* aux normes AASTHO (USA) et la *section 10.6* à la procédure préconisée par le « Cold Region Research and Engineering Laboratory » (CRREL). La *section 10.7* est dédiée à une comparaison entre les modules résilients obtenus dans la halle fosses d'Écublens, ceux déterminés lors de la présente recherche et ceux obtenus par le CRREL. Les trois méthodes citées ci-dessus seront, très probablement, à la base de la future méthode suisse qui fait l'objet des propositions de la *section 10.8*.

Enfin, rappelons que si les méthodes empiriques appliquées dans la plupart des pays soumis au gel saisonnier ou permanent conviennent bien à des géométries de superstructures utilisées depuis longtemps, elles ne permettent pas d'étudier et de projeter rationnellement de nouveaux types de superstructures comprenant de nouveaux matériaux.

10.2 Exploitation des essais en laboratoire pour la construction des voies de communication

10.2.1 Problèmes non ou mal résolus

Dans le comportement au dégel des superstructures routières et ferroviaires, un des problèmes les plus discutés depuis quelques années est celui de la *direction de l'écoulement de l'eau en excès provenant de la fonte des lentilles de glace*. Malgré la publication des résultats d'un des essais réalisés dans la halle fosses d'Écublens (Dysli, 1993), publication consacrée presque exclusivement à ce problème, de nombreux praticiens continuent à penser qu'une grande partie de l'eau de fonte des lentilles de glace s'évacue, latéralement et au-dessus des lentilles. Plusieurs normes de construction routière, par exemple les normes finlandaises (Saarelainen, 2000) et du Canada (RTAC, 1977), prévoient encore une couche drainante pour faciliter cet écoulement. Ce n'est cependant pas le cas des normes suisses qui ont supprimé cette couche et l'ont remplacé par une couche anticontaminante constituée généralement par un géotextile.

Un autre problème mal résolu est la *soudaineté de la fonte des lentilles de glace* qui peut conduire à la destruction d'une route sous les essieux des camions par diminution de la portance de l'infrastructure gélive lors du dégel (voir fig. 2-15). Dans de nombreux pays, pour empêcher cette destruction, le trafic est limité en poids, voire interdit, pendant une certaine période sur les tronçons de routes fondés sur des sols gélifs. Cette restriction est dénommée « barrière de dégel » et existe en France, par exemple, depuis le début du 19^{ème} siècle. La barrière (panneau de circulation) est posée le plus tard possible et sa durée est brève. Le moment de l'établissement de la barrière et sa durée dépendent des conditions météorologiques et de l'expérience des voyers. Elles pourraient cependant être déterminées d'une manière plus rationnelle par une meilleure connaissance du phénomène. En Suisse, les barrières de dégel ne sont pas appliquées car, en principe, toutes les chaussées sont dimensionnées pour supporter la diminution de la portance de l'infrastructure gélive lors du dégel.

10.2.2 Cheminement de l'eau en excès lors du dégel

Les mesures réalisées en laboratoire pendant cette recherche ont confirmé celles réalisées dans la halle fosses d'Écublens, il y a déjà de nombreuses années (Lefebvre & Dysli 1988, Dysli 1993). Dans les sols gélifs, toute l'eau de fonte des lentilles de glace est réaspirée vers la zone où elle avait été prélevée. Sous les voies de communication, *le cheminement de l'eau du dégel se fait donc exclusivement du haut vers le bas*. Le régime des succions capillaires (voir en particulier § 7.6) fait qu'un autre cheminement de l'eau de fonte des lentilles de glace au dégel est impossible. La conséquence pratique est que *toute couche de drainage entre la superstructure et l'infrastructure est inutile*. Elle est même dangereuse car, comme la zone gelée est sous dépression capillaire, de l'eau peut utiliser cette couche perméable pour pénétrer sous la superstructure de la route. Un bon drainage latéral est ainsi primordial (voir par exemple Bertsen & Saarenketo, 2005).

10.2.3 Brutalité de la fonte des lentilles de glace

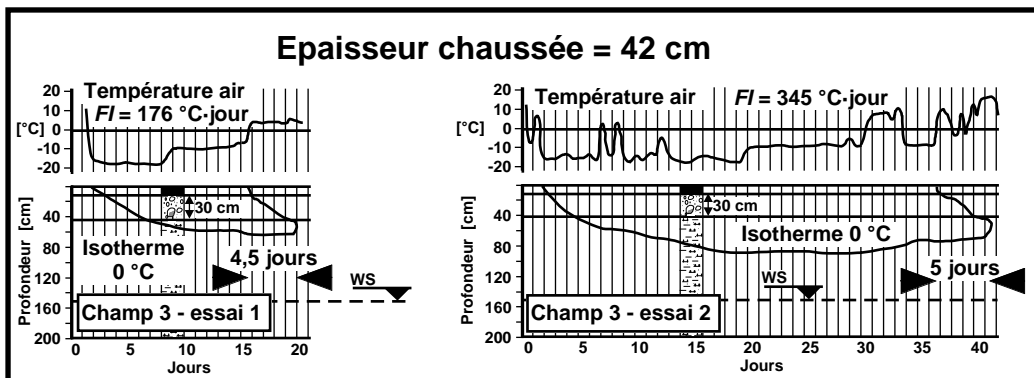
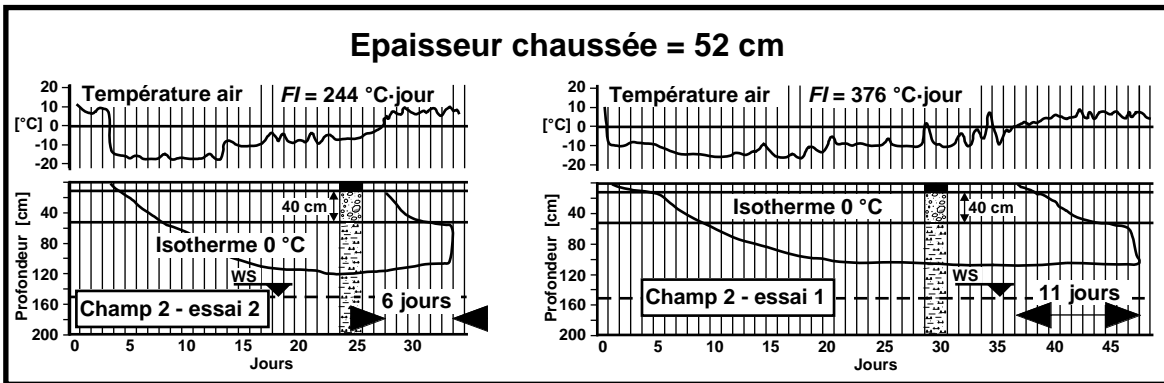
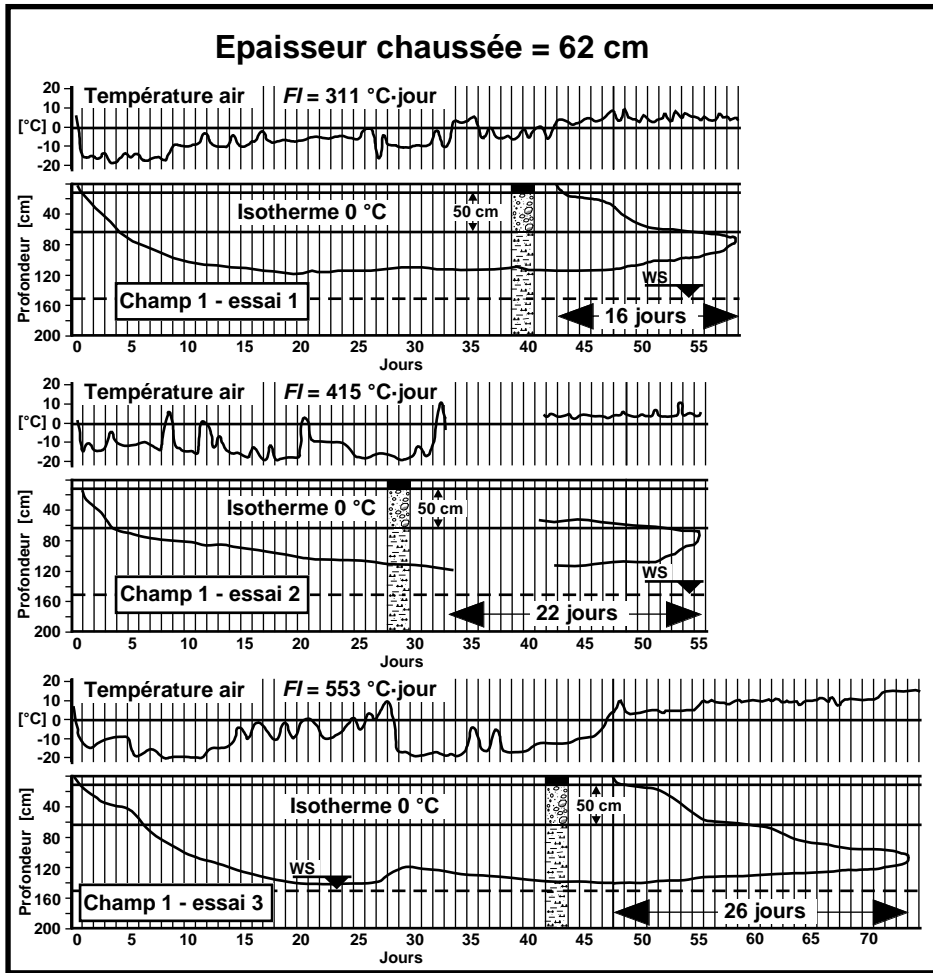
Ce sujet concerne les voies de communication et les pergélisols. La démonstration physique et la modélisation numérique de cette brutalité seront traitées au chapitre 11 consacré aux pergélisols alpins. Pour les voies de communication, seuls les résultats des essais réalisés dans la halle fosses d'Écublens (chapitre 9) seront exploités dans ce chapitre et ceci uniquement sur un plan pratique.

Sous les voies de communication, ces essais ont montré que la durée de la fonte des lentilles de glace était de quelques jours seulement. Le problème est la détection de son début et celle de la fin de la dissipation de l'eau interstitielle en excès, eau provenant de la fonte des lentilles de glace. Pour le début de la fonte des lentilles, on peut tenter d'estimer la *durée du dégel* que l'on peut définir comme étant le temps entre le passage de la température du revêtement à une valeur positive et celui de la fermeture de l'isotherme 0 °C dans le corps de la chaussée. Les nombreux essais réalisés dans la halle fosses d'Écublens vont permettre une telle estimation pour une chaussée comprenant une couche de surface (revêtement) en matériaux bitumineux et une couche de fondation en grave. La figure 10-1 décrit les résultats des 7 essais qui vont permettre cette estimation, à savoir les températures de l'air à la surface de la route et l'évolution de l'isotherme 0 °C dans le corps de la chaussée. Les températures en surface vont permettre le calcul des indices de gel de l'air FI , qui sont approximativement égaux à ceux de la surface de la route FI_S car les radiations solaires étaient nulles pour ces essais dans une halle.

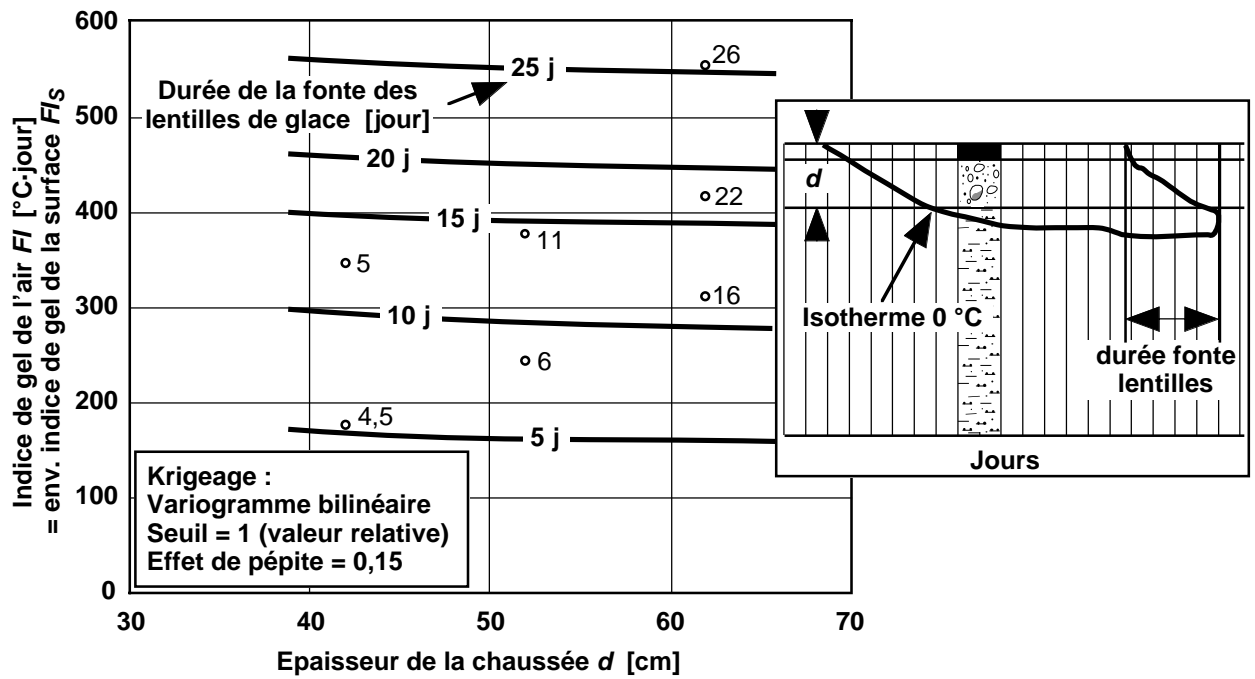
Ces résultats permettent de déterminer une relation : durée du dégel = f(Indice de gel, épaisseur de la chaussée), relation qui fait l'objet de la figure 10-2. Les résultats des mesures (fig. 10-1) ont été interpolés par krigeage dont le résultat le plus plausible est donné par les lignes de durée (5 j, 10 j, etc.) sur la figure 10-2 sur laquelle on voit que la durée du dégel n'est presque pas fonction de l'épaisseur de la chaussée mais surtout de l'indice de gel. La relation simplifiée (linéaire) que l'on peut tirer de ces résultats est la suivante (indice de gel en °C·jour) :

$$\text{Durée dégel} = a \cdot FI - b \quad (10-1)$$

Pour le cas des chaussées qui ont fait l'objet des essais dans la halle fosses d'Écublens et selon les hypothèses que l'on peut faire : valeurs du krigeage ou valeurs sans interpolation, a est compris entre 0,052 et 0,060, et b entre 4 et 7 jours. Le moment de l'établissement de la barrière de dégel pourrait être fixé au 2/3 de la durée du dégel. Par exemple, pour un indice de gel de 450 °C·jour (hiver très froid à la Chaux-de-Fonds, environ 1000 msM), en admettant $a = 0,055$ et $b = 5$ jours, la barrière de dégel devrait être posée 13 jours après le passage de la température du revêtement à une valeur positive.



10-1 Durée du dégel d'une chaussée
Adapté de Dysli, 1981



10-2 Interpolation de la relation : $Durée\ fonte\ lentilles = f(FI, d)$

Il reste encore à évaluer la durée de la barrière de dégel. La diminution de la portance après la fermeture de l'isotherme 0 °C est rapide et de courte durée. Elle est fonction de la vitesse du dégel (de la fonte des lentilles de glace) qui est elle-même fonction de l'importance et de la vitesse du réchauffement de l'air (voir fig. 9-9 en particulier).

La diminution de la portance peut se mesurer par des mesures de déflexions. Sur la figure 9-8, en sachant que la déflexion en début d'essai était de 40 mm/100, on voit que la diminution dure environ 4 jours. L'essai montré sur cette figure est un cas extrême qui a conduit à la destruction de la chaussée et l'on peut considérer cette valeur comme une limite. En complétant l'exemple ci-dessus, la durée de la barrière de dégel serait de quelque $7+4 = 11$ jours.

10.3 Définition et détermination du module résilient au dégel

10.3.1 Définitions du module résilient au dégel

Les modules résilients discutés et utilisés dans cette section sont tous des modules de déformation fonction de la température, de la teneur en eau et du nombre de charges appliquées par le trafic sur la voie de communication.

10.3.2 Détermination du module résilient au dégel

Les modules résilients au dégel peuvent être déterminés :

- In situ, par différents types d'essais comme l'essai de plaque ou le Falling Weight Deflectometre (FWD). La ré-exploitation des essais dans la halle fosses d'Écublens (chapitre 9) est un exemple de ce moyen de détermination.
- En laboratoire, par des essais au gel *et dégel* en système ouvert (apport d'eau de la zone non gelée) comme ceux réalisés durant cette recherche (§ 6.4.5.7 et 6.5.6.7). Ce moyen est cependant beaucoup trop coûteux pour un essai standard.
- En laboratoire, par un essai standard plus simple que celui décrit ci-dessus, par exemple par un essai du type de celui réalisé au CRREL (§ 10.6.6). L'essai du CREEL est un essai en système fermé qui ne fait intervenir qu'une phase de gel.

10.4 Normes finlandaises

La Finlande est le premier pays qui ait utilisé un module résilient pour le dimensionnement au gel des superstructures routières. Il semble cependant qu'elle ait abandonné aujourd'hui cette méthode (Saarelainen, 2000). Cette méthode est cependant intéressante. Ce paragraphe est en partie tiré de Dysli et Boccard (1991).

10.4.1 Bases

Les normes finlandaises de dimensionnement au gel des superstructures routières utilisent une démarche de dimensionnement qui consiste à réduire la portance du sol d'infrastructure pour tenir compte de sa diminution lors du dégel ou à utiliser directement un module résilient de dégel. La méthode finlandaise est notamment basée sur :

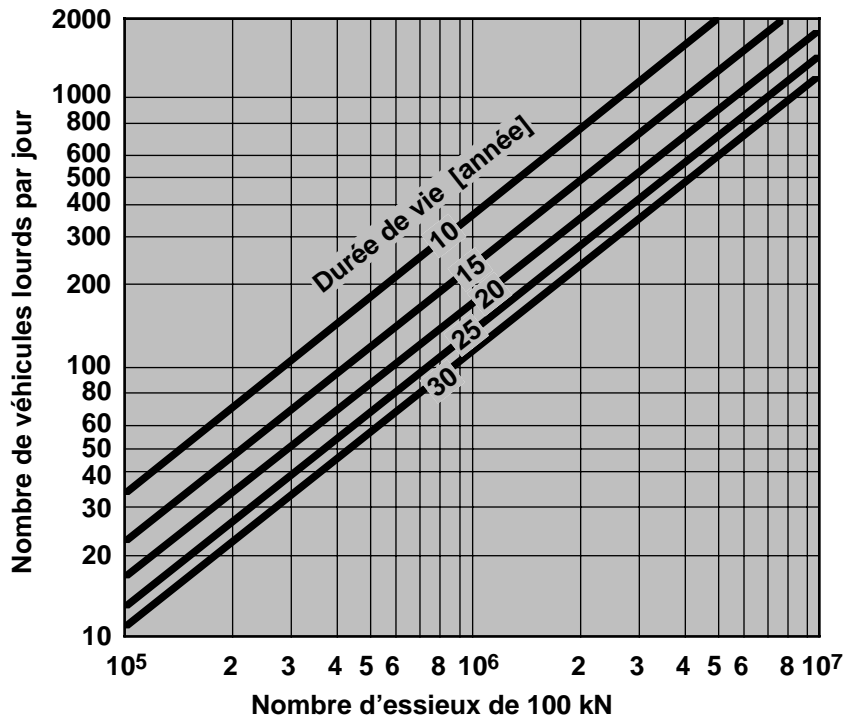
- Le trafic, qui est quantifié par le nombre d'application d'une charge de 100 kN pendant la durée de vie de la route lui-même déterminé par le trafic moyen journalier des véhicules lourds (fig. 10-3).
- La portance de la forme de l'infrastructure au dégel qui est définie par 7 classes de portance basées sur la gélivité de l'infrastructure; à chacune de ces classes correspond un module résilient M_r mesuré au printemps (au dégel), par exemple, par un essai de plaque (tableau 10-4). De nombreux essais ont montré que la portance au printemps variait entre 40 et 80% de la portance en été.
- La gélivité des sols d'infrastructure qui intervient dans le choix des classes de portance (tableau 10-4).
- L'indice de gel de l'air qui détermine l'épaisseur totale de la superstructure (figure 10-6).
- Les conditions hydrogéologiques, soit surtout le niveau de la nappe phréatique par rapport à celui de la forme de la fondation.

Cette méthode est donc un peu compliquée et nous n'allons discuter que de ses éléments essentiels.

10.4.2 Dimensionnement au dégel

Deux étapes principales sont nécessaires à ce dimensionnement :

- L'épaisseur totale de la superstructure est tout d'abord déterminée en fonction de l'indice de gel (fig. 10-6). Dans l'évaluation de cette épaisseur intervient le gonflement admissible qui est donné sur le tableau 10-5 en fonction de la classe de la route.
- Ensuite, sur la base de la portance de la surface de la route, qui est donnée en fonction du nombre d'essieux de 100 kN qu'elle devra pouvoir subir sans dommage, (tableau 10-4, colonne de droite), on détermine l'épaisseur des différentes couches au moyen d'un graphique tel que celui de la figure 10-7. La somme des épaisseurs de chacune des couches, qui peuvent être de diverses natures, et leur portance correspondante, doit satisfaire à l'épaisseur totale définie par l'indice de gel.



10-3 Finlande : Nombre d'applications de la charge de 100 kN pendant la durée de vie de la route
 Adapté de Vuorio et al. (1979)

Les graphiques du type de celui de la figure 10-7, qui font partie intégrante des normes finlandaises, sont établis par la formule d'Odermark (fig. 10-7). Cette formule, dérivée de la théorie de l'élasticité, permet de déterminer le module de déformation de la surface d'une couche de la superstructure M_{ry} , connaissant le module de déformation de cette couche et celui de la couche sous-jacente M_{rA} . Si M_{rA} et l'épaisseur de la couche h (dont le module de déformation est de 70 MPa sur la figure 10-7) sont connus, on peut alors déterminer M_{ry} .

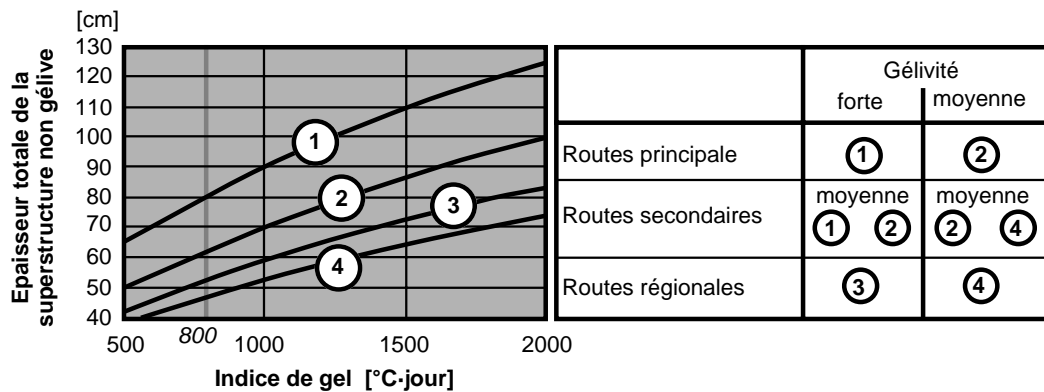
Les modules de déformation (modules résilients) des couches de la superstructure comme ceux de l'infrastructure peuvent être évalués au moyen de corrélations entre la granulométrie des sols et des matériaux de la superstructure, dont un exemple fait l'objet de la figure 10-9. Ces corrélations proviennent d'essais in situ. On procède par itérations jusqu'à ce qu'une solution satisfaisante soit obtenue. Des critères économiques peuvent aussi intervenir dans cet algorithme qui fait l'objet d'un programme sur ordinateur. Les graphiques des normes et le programme de calcul présupposent des conditions hydrogéologiques moyennement sévères. Pour des conditions favorables, par exemple pour les routes en remblai, les dimensions peuvent être réduites de 10 à 20% et pour des conditions très défavorables, elles sont augmentées de quelque 20%.

10-4 Finlande : Classes de portance
Selon Vuorio et al. (1979)

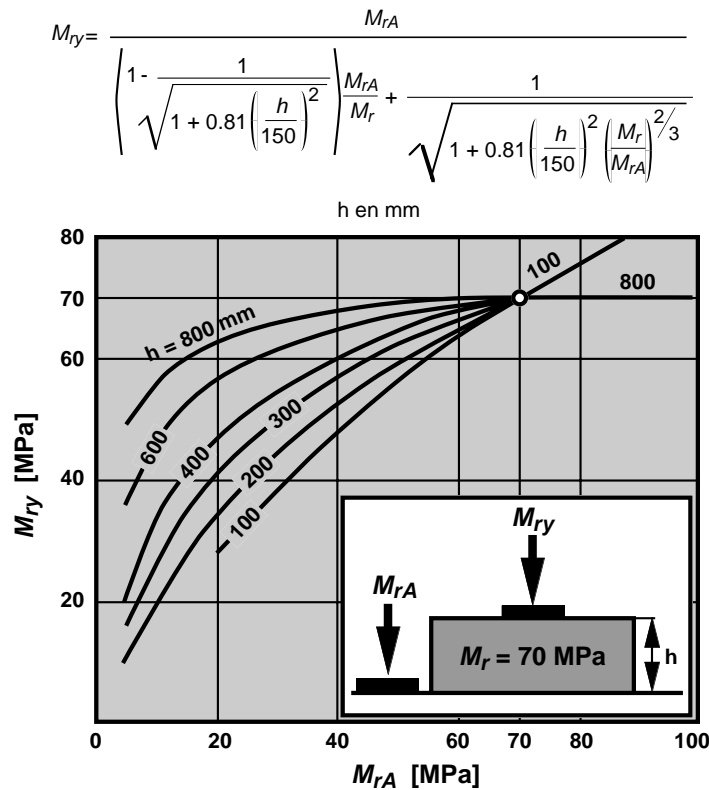
Classes portance	Sensibilité au gel	Sols d'infrastructure	Module M_r [Mpa] au printemps (moyenne et variabilité)
A	Non gélif	(Roche), marin, concassé	300 (250 – 500)
B	Non gélif	Gravier, matériaux concassés 0–45 mm, gravier concassé	200 (150 – 400)
C	Non gélif	Moraine très graveleuse, sable grossier à moyen	40 (30 – 60)
D	Non gélif	Sable fin	40 (30 – 60)
E	Moyennement gélif	Moraine graveleuse, moraine sableuse, sable moyen, argile sèche	20 (15 – 40)
F	Très gélif	Moraine limoneuse, sable fin, limon, argile varvée	10 (5 – 20)
G	Moyennement gélif	Sols mous : argile (non varvée et sèche), tourbe, vase	5 (2 – 8)

10-5 Finlande : Gonflements admissibles
Selon Vuorio et al. (1979)

Classe de route	Changement de pente admissible [o/oo]	Gonflements globaux admissibles [mm]
Autoroutes	4 – 5	40 – 70
Routes principales (classe I et II)	5 – 8	50 – 100
Routes régionales	7 – 11	80 – 200
Routes secondaires :		
Classe I	9 – 16	150 – 300
Classe II	15	> 200



10-6 Finlande : Détermination de l'épaisseur de la superstructure en fonction de l'indice de gel
Selon Vuorio et al. (1979)



10-7 Finlande : Méthode de calcul des épaisseurs de la superstructure par la formule d’Odermark
Adapté de la norme finlandaise

10.4.3 Exemple

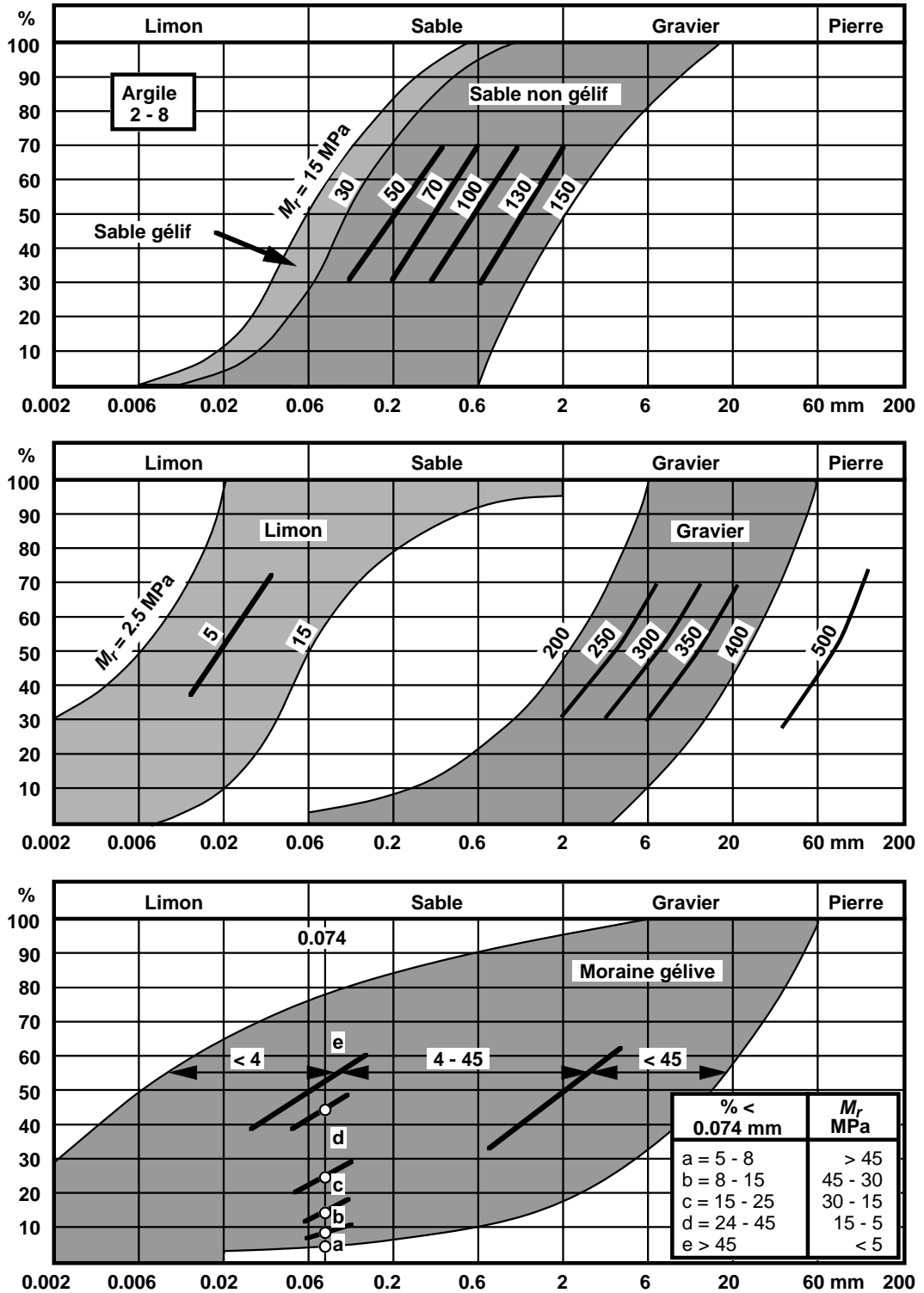
Nous allons maintenant illustrer la méthode finlandaise par le petit exemple dont les données générales sont consignées dans le tableau 10-8.

10-8 Données de l'exemple

Climat	Indice de gel de l’air [°C·jour]	900
	Ensoleillement	fort
	Indice de gel de dimensionnement FIS	800
Sol	Masse volumique sèche [t·m ⁻³]	1,65
	Teneur en eau [%]	23
	Classification USCS	CL-ML
	Gélimité	très forte
	CBR (hors gel) [%]	5
Situation, niveau	En dehors agglomération, niveau terrain naturel	
Trafic	Lourd, équivalent à 600 essieux de 82 kN par jour	
Durée de l’utilisation de la route [an]		20

Le trafic et la durée de vie de la route donnés dans cette figure correspondent approximativement à $8 \cdot 10^6$ essieux de 100 kN (fig. 10-3). La gélimité élevée de l’infrastructure détermine une classe de portance F et un module M_r de l’infrastructure de 10 MPa (fig. 10-4). Pour ce type de route, les normes finlandaises donnent un module de déformation de leur surface de quelque 320 MPa qui correspond à une déflexion de 50 mm/100.

Sur la figure 10-6, l’indice de gel de dimensionnement de 800°C·jour conduit, pour une route principale et la forte gélimité du sol d’infrastructure, à une épaisseur totale de la superstructure de 80 cm.

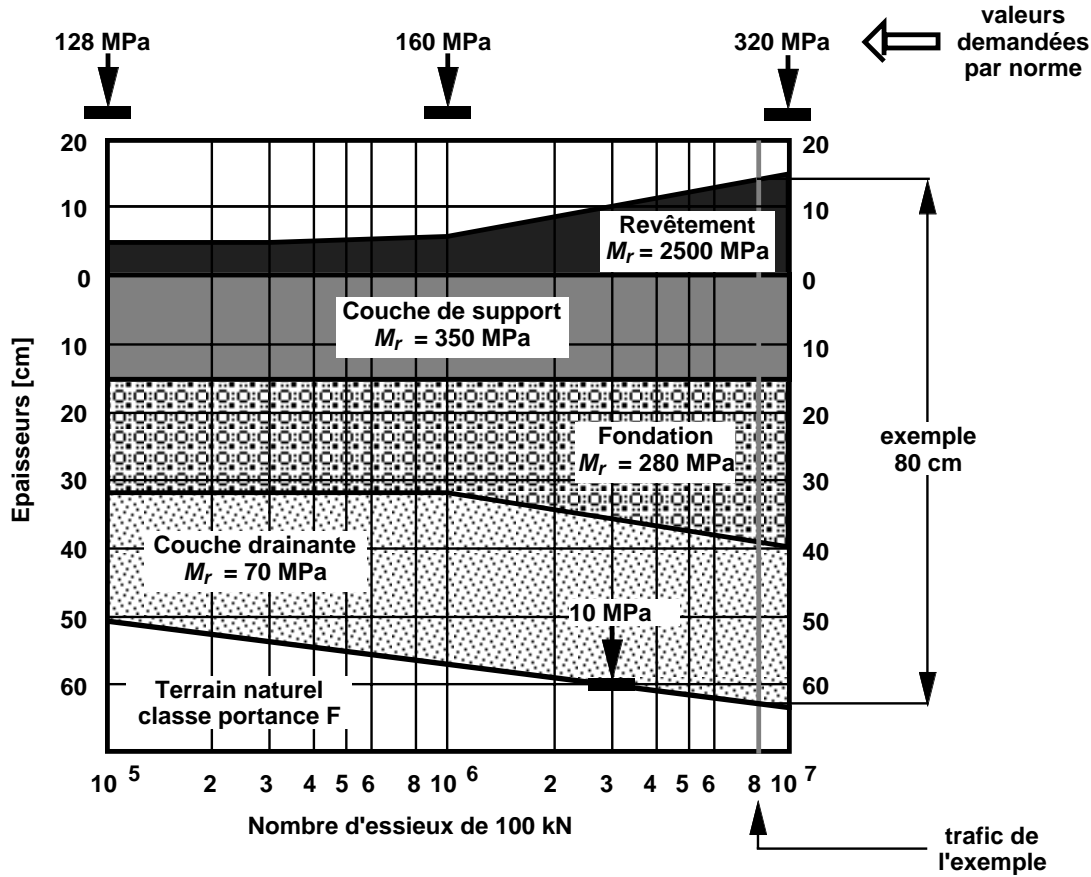


10-9 Finlande : Corrélations entre la granulométrie et leur module résilient M_r , Adapté de Vuorio et al.

Avec ces éléments, on peut alors se livrer aux calculs itératifs permettant de déterminer les épaisseurs de chaque couche dont la somme est de 80 cm. Ce calcul a été mené, par la formule d'Odermark, pour une superstructure constituée d'une couche de drainage en sable (utilisée systématiquement en Finlande), d'une couche de fondation en grave, d'une couche de support, par exemple en matériaux concassés, et par un revêtement bitumineux. En outre, ce calcul a été

effectué pour différents modules de déformation de la surface de la route. Son résultat fait l'objet de la figure 10-10.

La méthode utilisée en Finlande est très rationnelle, car elle se base sur un véritable modèle numérique de simulation du comportement de la route. Cependant, ce modèle est un peu éloigné de la réalité, car il est élastique et certains praticiens pourront le trouver un peu compliqué.



10-10 Finlande : Détermination de l'épaisseur des couches de la superstructure pour une portance de classe F

10.5 Norme AASHTO

Avant de décrire en détail la procédure du CRREL de contrôle du dimensionnement au gel et dégel des superstructures des voies de communication, il est intéressant de décrire la norme AASHTO de dimensionnement qui est largement utilisée aux USA. Cette norme est en effet à la base de la procédure du CRREL. Ce paragraphe est en partie tiré de Dysli et Boccard (1991).

10.5.1 Bases

Aux USA il existe différentes normes, suivant les États, pour dimensionner les routes. Les plus utilisées sont les normes AASHTO; elles sont intéressantes car elles accordent une grande importance aux critères économiques et prévisionnels. Elles ont été mises au point à partir des données expérimentales du programme d'essais AASHO de 1958-1960. Les normes AASHTO considèrent le cas des revêtements souples ainsi que celui de revêtements rigides. Elles permettent de dimensionner les différentes couches de matériaux utilisés en fonction de leur nature à partir de l'indice d'épaisseur SN de la chaussée obtenu grâce à une équation ou l'abaque de conception (fig. 10-12).

L'indice d'épaisseur est fonction :

- du trafic prévisible avant la première réhabilitation du revêtement,
- de la perte de viabilité acceptable (trafic, drainage, gel),
- du module résilient du sol d'infrastructure,
- de la fiabilité (facteur de sécurité) désirée,
- de l'écart type sur les différents paramètres (trafic et performance de la chaussée).

10.5.2 Estimation du trafic

Pour permettre une comparaison entre les contraintes subies par les chaussées, les américains ont développé la notion de trafic équivalent. Le trafic équivalent w_{18} à une charge à l'essieu de 18 kips (81,5 kN) est calculé à partir du nombre de véhicules de chaque type comptabilisé.

La détermination du trafic se fait par :

- le choix d'une période d'analyse,
- le choix d'une durée de service,
- l'estimation du trafic pour la première année de service,
- l'estimation du taux annuel d'accroissement du trafic,
- l'estimation de la répartition du trafic dans chaque sens,
- le choix du nombre de voies de circulation par direction,
- le calcul du nombre de véhicule qu'aura supporté la route à la fin de la période d'analyse,
- le calcul du nombre de véhicule w_{18} qu'aura supporté la route à la fin de la durée de service.

10.5.3 Viabilité

L'indice de viabilité PSI (Present serviceability Index) caractérise, du point de vue de l'utilisateur, l'état de la chaussée. Il dépend de l'état de la route, des détériorations type ornière ou fissure. Il varie entre 0 et 5. Avant le passage de véhicules, une route a un indice légèrement

supérieur à 4. Lors de la conception d'une route, les valeurs limites inférieures de la viabilité en fin de trafic normal (avant réfection) sont en général de :

- 2,5 pour les routes principales,
- 2,0 pour les routes secondaires.

La valeur de l'indice de viabilité initial est fixée par expérience en fonction de mesures effectuées sur des ouvrages de même type construits dans la région. Lors de la conception d'une route, il est utile de s'intéresser à des routes construites dans des zones similaires au point de vue géotechnique et au point de vue trafic et de comparer les valeurs de viabilité à différents instants selon le trafic atteint ou prévu :

- à la fin de la période d'analyse (trafic réel durant cette période),
- au moment où sera atteint le trafic prévu par calcul à partir de la période d'analyse,
- au moment où sera atteint le trafic prévu par calcul avant qu'il ne soit nécessaire de réhabiliter le revêtement,
- lorsqu'il est nécessaire de réhabiliter la chaussée (trafic ayant entraîné une dégradation rendant la réhabilitation indispensable).

La perte de viabilité d'une route est aussi fonction des conditions climatiques.

10.5.4 Module résilient du sol

Ce module M_r quantifiant le terrain de fondation peut être déterminé soit directement à partir de l'essai AASHTO, soit par corrélation à partir des valeurs du CBR Standard. Afin de tenir compte des conditions météorologiques, ce module est calculé chaque quinzaine; une valeur moyenne sur l'année sera ensuite utilisée dans les calculs.

Equivalence :

$$M_r [\text{psi}] = 1500 \cdot \text{CBR} \quad (\text{valable si } \text{CBR} \leq 10)$$

$$M_r [\text{kN.m}^{-2}] = 10350 \cdot \text{CBR} \quad (\text{valable si } \text{CBR} \leq 10)$$

Ce module n'est pas un module résilient au dégel.

10.5.5 Fiabilité

La fiabilité R d'une chaussée peut être définie de différentes façons :

- la probabilité que l'état de la route soit maintenu à un niveau suffisant du point de vue de l'utilisateur pendant la durée de vie prévue ;
- la probabilité que les sollicitations subies par la chaussée restent à un niveau admissible pendant la durée de vie prévue ;
- la probabilité que la chaussée définie soit performante sous le trafic et les conditions extérieures durant la période définie ;
- la probabilité que la chaussée définie en utilisant l'équation ou les abaques de conception soit performante sous le trafic et les conditions extérieurs durant la période d'utilisation de la chaussée avant réhabilitation du revêtement.

Bien que la fiabilité puisse être évaluée par un calcul de probabilité, le concepteur utilisera en général des valeurs fixées par l'expérience en fonction du type de chaussée (tableau 10-11).

10-11 AASHTO : définition de la fiabilité
Adapté du guide AASTHO

Type de route	Fiabilité R [%]	
	Milieu urbain	Milieu rural
Voies rapides et voies de liaison entre les états	85-99,9	80-99,9
Routes principales	80-99	75-95
Routes régionales	80-95	75-95
Routes d'intérêt local	50-80	50-80

La valeur de la fiabilité, prise en compte par le concepteur lors du calcul, doit tenir compte du nombre de réhabilitations prévues (la fiabilité donnée ci-dessus est la fiabilité globale, si la route est calculée en deux étapes : construction puis réhabilitation du revêtement après un certain nombre d'années, la fiabilité de chaque étape sera la racine de la fiabilité globale).

10.5.6 Erreur de prédiction

Tout comme pour la fiabilité, l'erreur de prédiction (écart type sur le trafic et sur la perte de viabilité) S_0 est fixée par expérience; les valeurs suivantes ont été adoptées :

- 0,35 pour les chaussées à revêtement souple,
- 0,25 pour les chaussées à revêtement rigide.

10.5.7 Démarche générale du dimensionnement

Pour dimensionner une chaussée, il est nécessaire de fixer les valeurs des différents paramètres pris en compte dans l'équation (ou l'abaque) de conception, afin d'obtenir, pour chaque couche, une valeur appelée indice d'épaisseur ; ces indices permettront de dimensionner les différentes couches (revêtement, support, fondation) suivant le type de matériaux utilisé. Les opérations à réaliser sont les suivantes:

Trafic :

- choix du volume de véhicules prévu durant la durée de service w_{18} .

Indice de viabilité :

- choix d'un indice de viabilité initiale ;
- choix d'un indice de viabilité terminale ;
- calcul de la perte globale de viabilité ΔPSI .

Fiabilité :

- choix de la stratégie (nombre de réhabilitation prévu) ;
- choix du type de route ;
- détermination du milieu (rural ou urbain) ;
- estimation de la fiabilité globale (tableau 10-11) ;
- calcul de la fiabilité R d'une étape de construction.

Erreurs de prédiction sur le trafic et la performance :

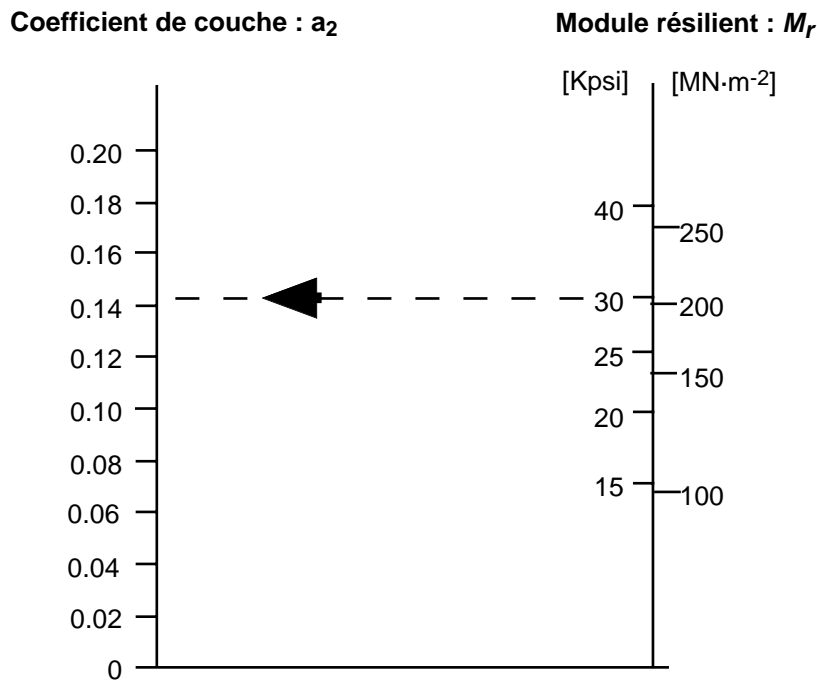
- estimation de l'erreur de prédiction S_0 .

Module résilient :

- calcul du module résilient moyen M_r .

Matériaux disponibles :

- choix des matériaux qui seront utilisés pour les différentes couches (roulement : 1, support : 2, fondation : 3) ;
- essai en laboratoire pour déterminer les modules résilients ;
- détermination des coefficients a_1, a_2, a_3 des couches en fonction de leur module résilient (fig. 10-12) ;
- détermination des coefficients de drainage des différents matériaux en fonction de la qualité du drainage désiré et de la région concernée (tableau 10-13).



10-12 AASHTO : Détermination du coefficient de la couche de support
Adapté du guide AASTHO

10-13 USA : détermination du coefficient de drainage des couches de fondation et de support
Adapté du guide AASTHO

Qualité du drainage	Pourcentage du temps durant lequel la route sera exposée à une humidité proche de la saturation			
	Moins de 1%	De 1 à 5%	De 5 à 25%	Plus de 25%
Excellent	1,40 - 1,35	1,35 - 1,30	1,30 - 1,20	1,20
Bon	1,35 - 1,25	1,25 - 1,15	1,15 - 1,00	1,00
Acceptable	1,25 - 1,15	1,15 - 1,05	1,00 - 0,80	0,80
Mauvais	1,15 - 1,05	1,05 - 0,80	0,80 - 0,60	0,60
Très mauvais	1,05 - 0,95	0,95 - 0,75	0,75 - 0,40	0,40

Indice d'épaisseur :

L'indice d'épaisseur SN permet de dimensionner les différentes couches formant la chaussée en fonction du matériau utilisé par l'utilisation d'un abaque donnant SN en fonction des paramètres précédents (fig 10-14).

Conditions climatiques :

- choix d'une période probable pendant laquelle la viabilité sera acceptable malgré les dégradations causées par les conditions météorologiques ;
- détermination de la perte de viabilité due au froid ΔPSI_{FH} et à l'humidité ΔPSI_{SW} (fonction du nombre d'année) ;
- calcul de la perte de viabilité résultante disponible pour le trafic ΔPSI_{TR} ;
- re-détermination du trafic acceptable w_{18} avec l'abaque de calcul de l'indice d'épaisseur (mêmes paramètres à part la perte de viabilité) (fig. 10-14) ;
- détermination de la période correspondante ;
- comparaison avec la période probable ;
- si la différence des périodes est proche de 1 on obtient la valeur réelle de la période de service après laquelle une réhabilitation du revêtement sera indispensable,
- sinon faire la moyenne des deux valeurs et recommencer une nouvelle itération.

Épaisseur des différentes couches :

- récapituler les valeurs des différents paramètres:
 - trafic admissible,
 - perte de viabilité due au trafic,
 - fiabilité,
 - erreur de prédiction,
 - module résilient pour chaque matériau utilisé ;
- calculer les différents indices d'épaisseur intermédiaires (fig. 10-14):
 - SN_1 (à partir du matériau de support),
 - SN_2 (à partir du matériau de fondation),
 - SN (à partir du matériau du sol de fondation) ;
- calculer les épaisseurs des différentes couches.

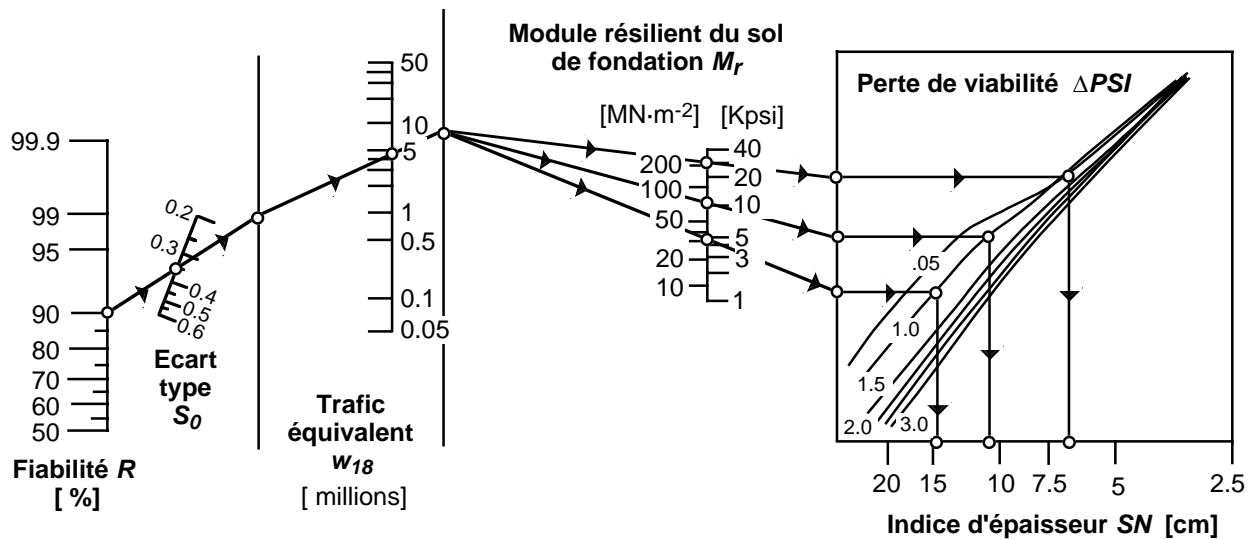
Formules de calcul :

$$D_1 \geq \frac{SN_1}{a_1} \quad (10-2)$$

$$D_2 \geq \frac{SN_2 - SN_1}{a_2 \cdot m_2} \quad (10-3)$$

$$D_3 \geq \frac{SN - (SN_1 + SN_2)}{a_3 \cdot m_3} \quad (10-4)$$

- avec D_1 = épaisseur arrondie à la valeur supérieure de la couche de revêtement
 D_2 = épaisseur arrondie à la valeur supérieure de la couche de support
 D_3 = épaisseur arrondie à la valeur supérieure de la couche de fondation
 SN_1 = $a_1 \cdot D_1$
 SN_2 = $a_2 \cdot D_2 \cdot m_2$
 a_1, a_2, a_3 , = coefficients de couche
 m_2, m_3 , = coefficients de drainage



10-14 AASHTO : Abaque de conception

Définition de l'indice d'épaisseur SN en fonction de : la fiabilité, de l'écart type des variables considérées (trafic, performance), du trafic équivalent, du module résilient du sol de fondation et de la perte de viabilité prévue durant le temps d'utilisation.

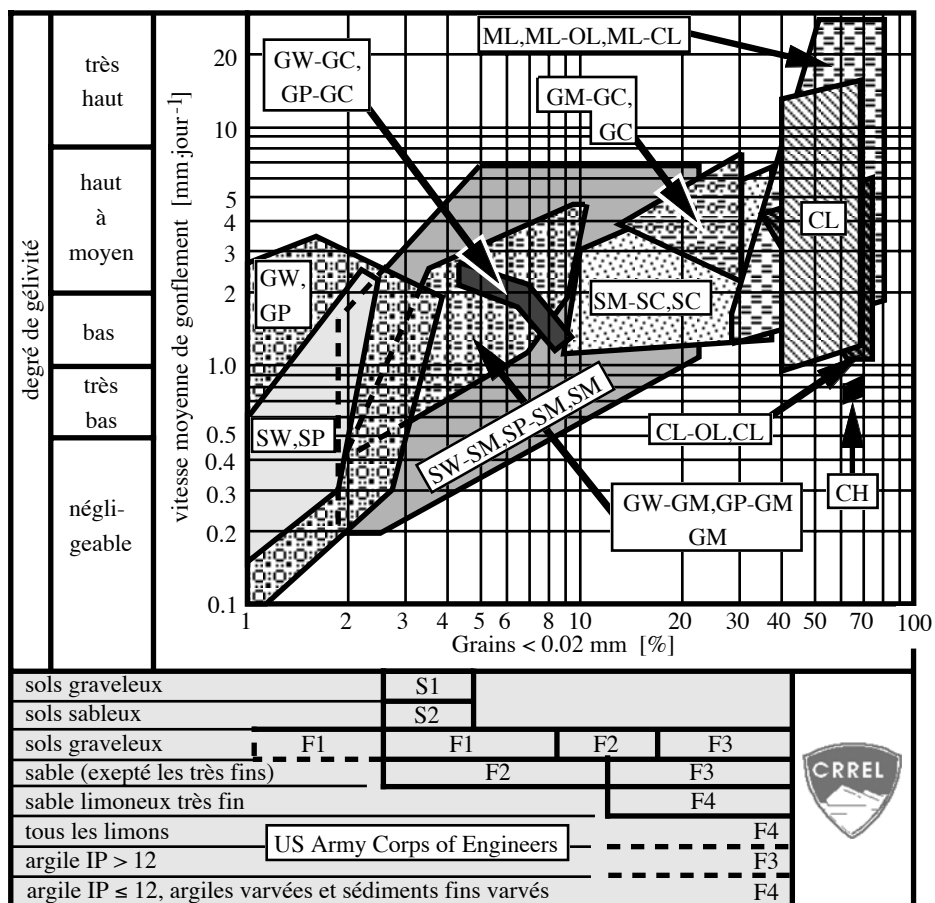
10.5.8 Dimensionnement au dégel

Les variations des températures et l'humidité entraînent:

- des variations de volume: gonflement, lentilles de glace ;
- des variations de portance.

Les effets du gel et du dégel sont pris en compte par le calcul de la perte de viabilité due au gel ΔPSI_{FH} . Une valeur quantifiant celle-ci est obtenue à partir d'une équation ou plus pratiquement d'un abaque fonction de quatre variables :

- La durée prévue ou période d'analyse ;
- La vitesse de gonflement : gonflement moyen en mm/jour du sol de fondation obtenu grâce à un abaque en fonction du type de matériaux de celui-ci (classification USCS), du pourcentage de particules fines (diamètre inférieur à 0.02 mm), de la sensibilité au gel de celui-ci (fig. 10-15) ;
- la perte potentielle maximale de viabilité fonction de la qualité du drainage et de la profondeur de pénétration du gel (tableau 10-16 et figure 10-17).
- la probabilité de gonflement de la chaussée due au gel : estimation faite par le concepteur du pourcentage de la zone du projet affecté par le gel (pourcentage fonction de la profondeur de propagation du front de gel dans le sol de fondation, de la vitesse de propagation du front de gel dans le sol de fondation, du degré d'humidité, de la qualité du drainage, du nombre de cycles de gel-dégel au cours de l'année) (fig. 10-18).



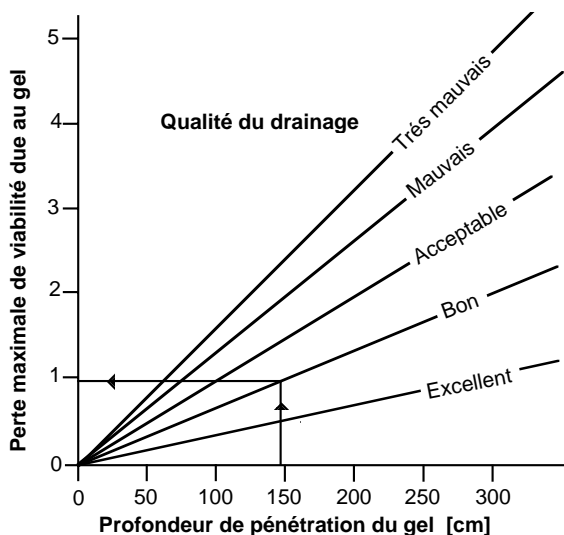
10-15 AASTHO : définition de la vitesse de gonflement

Tiré du guide AASTHO

10-16 AASHTO : définition de la qualité du drainage

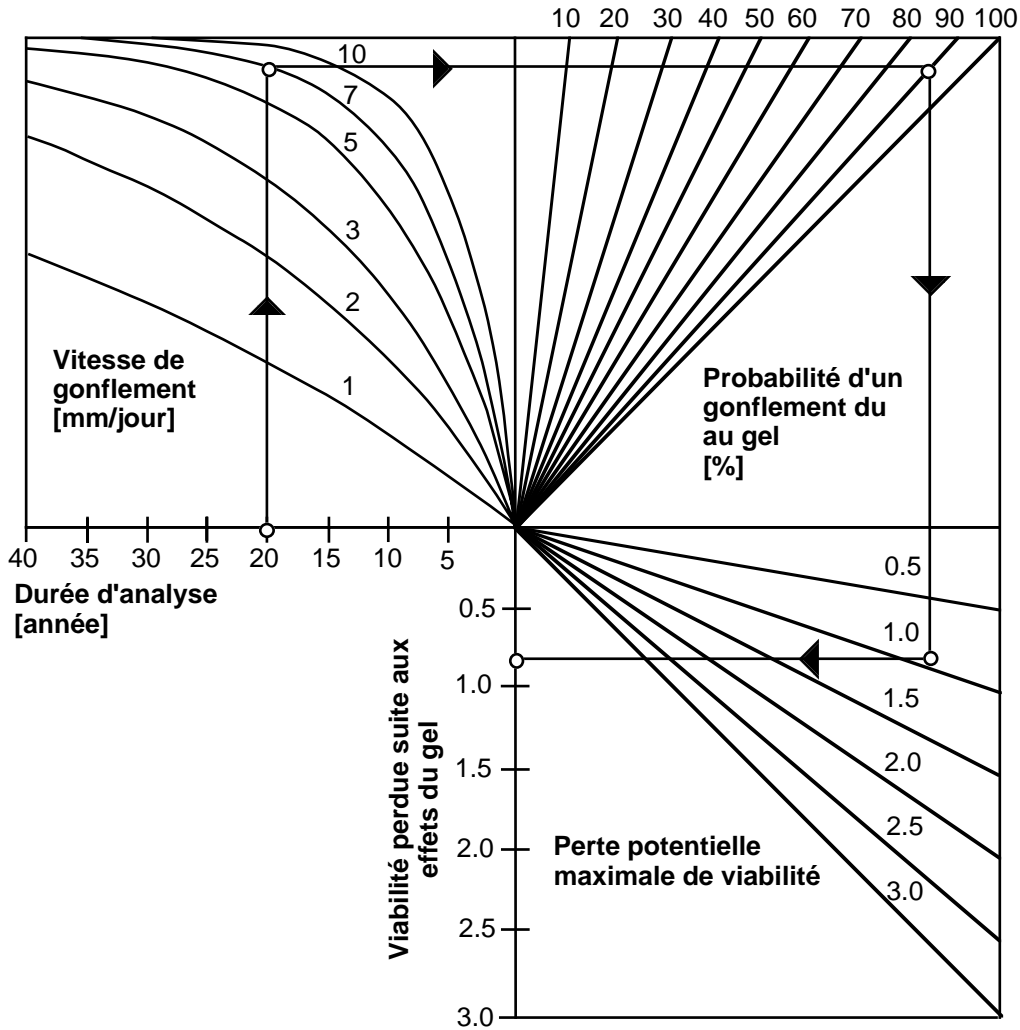
Tiré du guide AASTHO

Qualité du drainage	Durée de drainage
Excellent	1/2 jour
Bon	1 jour
Acceptable	1 semaine
Mauvais	1 mois
Très mauvais	infini



10-17 AASHTO : Perte de viabilité au dégel en fonction du drainage et de la profondeur du gel

Tiré du guide AASTHO



10-18 AASTHO : Perte de viabilité due aux effets du gel

en fonction de la période d'analyse, du taux de gonflement, de la probabilité de gonflement, de la perte potentielle maximale de viabilité
Tiré du guide AASTHO

10.5.9 Exemple

Nous allons illustrer la méthode AASHTO par l'exemple défini ci-dessous, en suivant pas à pas la méthode de dimensionnement décrite précédemment.

Trafic :

La période d'analyse ou durée d'utilisation de la route est de 20 ans; aucune réhabilitation du revêtement n'est prévue ; le trafic journalier est de 600 essieux de 82 kN, soit pour 20 ans : $w_{18} = 4'380'000$.

Perte de viabilité totale :

La route étant une route principale : $PSI_0 = 4,2$, $PSI_t = 2,5$ et $\Delta PSI = 1,7$.

Fiabilité :

Une fiabilité de 90% s'impose pour une voie rapide en milieu rural (voir tableau 10-11) : $R = 90\%$

Erreurs de prédiction :

Pour une chaussée à revêtement souple : $S_0 = 0,35$.

Module résilient du sol de fondation :

Pour tenir compte des effets du gel considérons un CBR de 3 pour le sol naturel ; en utilisant l'équation d'équivalence (valable si $CBR \leq 10$) :

- M_r [psi] = $1500 \cdot 3 = 4'500$ psi
- M_r [$\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$] = $10'350 \cdot 3 = 31'050 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$.

Matériaux disponibles :

Pour obtenir les valeurs des coefficients des différents matériaux, il est nécessaire de connaître le module résilient de chacun d'eux. Utilisons les valeurs données en exemple dans l'« AASHTO guide for design of pavement structure » soit :

- pour la couche de revêtement : béton bitumineux : $a_1 = 0.42$;
- pour la couche de support en grave concassée : $a_2 = 0.14$, $m_2 = 1.2$, $M_{r2} = 30'000$ psi = $207'000 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$;
- pour la couche de fondation : grave : $a_3 = 0.08$, $m_3 = 1.2$, $M_{r3} = 11'000$ psi = $75'900 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$.

Conditions climatiques :

Les normes AASHTO prévoyant une réhabilitation du revêtement avant la fin de la période d'analyse, elles doivent être légèrement modifiées pour coller au mieux à l'exemple et tenir compte des conditions climatiques. La perte de viabilité due au gel est calculée en plusieurs étapes :

- vitesse de gonflement : 7 (voir tableau 10-13)
- profondeur de pénétration du front de gel : 145 cm
- perte de viabilité maximale : 0,95 (voir fig. 10-15)
- perte de viabilité due au gel : 0,8 (voir tableau 10-16).

Indice d'épaisseur :

- $\Delta PSI_{TR} = \Delta PSI - \Delta PSI_{FH} = 1,7 - 0,8 = 0,9$
- $SN = 14,9$ cm (voir figure 10-12)
- $SN_1 = 6,9$ cm
- $SN_2 = 11,0$ cm.

Épaisseur des différentes couches :

$$D_1^* = \frac{SN_1}{a_1} = \frac{6,9}{0,42} = 16,4 \text{ cm}$$

$D_1 = 17$ cm = épaisseur de la couche de revêtement arrondie à la valeur supérieure

$$SN_1^* = a_1 \cdot D_1 = 0,42 \cdot 17 \text{ cm} = 7,1 \text{ cm}$$

$$D_2^* = \frac{SN_2 - SN_1^*}{a_2 \cdot m_2} = \frac{11,0 - 7,1}{0,14 \cdot 1,2} = 23,2 \text{ cm}$$

$D_2 = 24$ cm = épaisseur de la couche de support arrondie à la valeur supérieure

$$SN_2^* = a_2 \cdot D_2 \cdot m_2 = 0,14 \cdot 24 \cdot 1,2 = 4,0 \text{ cm}$$

$$D_3^* = \frac{\left(SN - \left(SN_1^* + SN_2^* \right) \right)}{a_3 \cdot m_3} = \frac{\left(14,9 - \left(7,1 + 4,0 \right) \right)}{0,08 \cdot 1,2} = 39,6 \text{ cm}$$

$D_3 = 40$ cm = épaisseur de la couche de fondation arrondie à la valeur supérieure

Récapitulatif :

Couche de revêtement en béton bitumineux :	17 cm ;
Couche de support en grave concassée :	24 cm ;
Couche de fondation en grave :	<u>40 cm</u> ;
Total :	81 cm

10.5.10 Commentaires

Avec la méthode AASHTO originale, le module résilient de l'infrastructure n'est pas un module résilient au dégel. L'effet de la diminution de la portance de l'infrastructure au dégel est pris en compte par une diminution de l'indice de viabilité PSI (fig. 10-17 et 10-18).

10.6 Procédure du CRREL

Les paragraphes suivants (10.6.1, 10.6.6 et, en partie, 10.6.8) ont été rédigés avec l'aide des publications de Bigl & Berg (1996a, 1996b, 1996c), Berg et al. (1996) et Janoo et al. (1999).

10.6.1 Principes

L'ordinogramme de la procédure du CRREL fait l'objet de la figure 10-19. La procédure commence par la décomposition de la superstructure et de l'infrastructure en un réseau à une dimension (fig. 10-20). La disposition des noeuds est fonction des épaisseurs des couches de la superstructure. Les notations utilisées sont celles du CRREL ; elles diffèrent un peu de celles de la liste des principales notations.

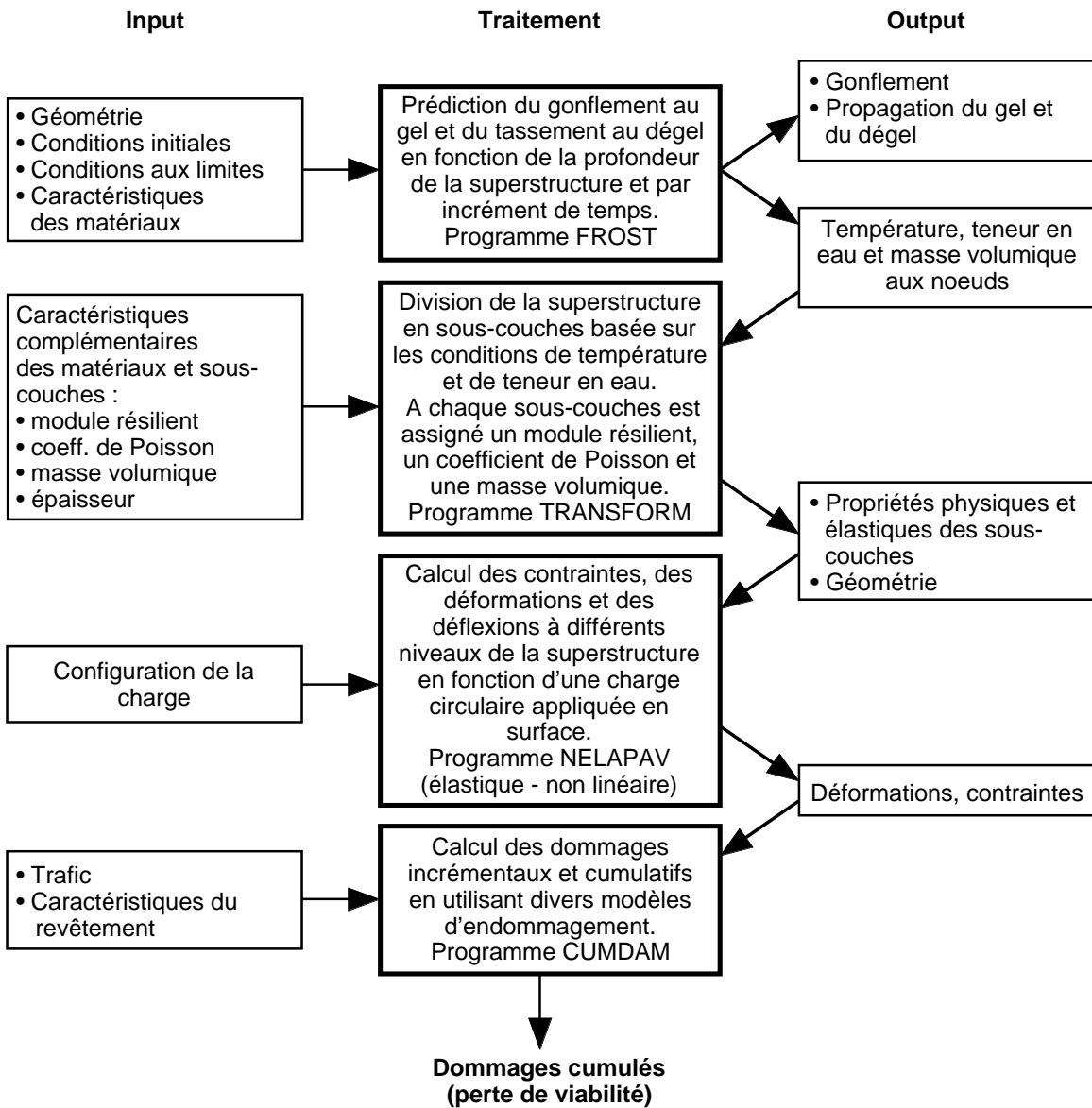
10.6.2 Programme FROST

La première phase consiste en l'évaluation des paramètres liés au gel et dégel des matériaux, ceci par incréments de temps : température, teneur en eau, masse volumique, etc. Le modèle utilisé, dénommé FROST, a été développé par Berg et al. (1980). C'est un *modèle couplé* de l'écoulement d'eau et de la diffusion thermique qui est résolu par éléments finis, différences finies ou par d'autres méthodes. Ces hypothèses simplificatrices sont en particulier : des matériaux poreux rigides (non-déformables, la consolidation est négligée), processus à un seul sens (par ex. la courbe caractéristique sol-eau n'a pas d'hystérésis), transport d'eau par vapeur négligé. FROST détermine : le gonflement par gel, le tassement par dégel et les conditions en fonction de la profondeur du modèle : température, teneur en eau non gelée, pression interstitielle (positive ou négative), teneur en glace et masse volumique.

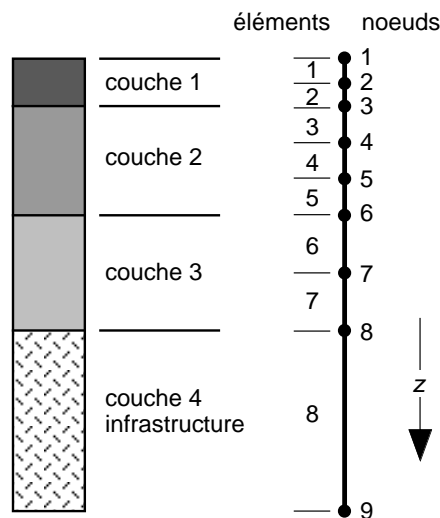
FROST est gouverné par la combinaison des équations de continuité et de Darcy :

$$\frac{\partial}{\partial z} \left[K_{D_u} \frac{\partial h}{\partial z} \right] = \frac{\partial \theta_u}{\partial t} + \frac{\rho_i}{\rho_w} \frac{\partial \theta_i}{\partial t} \quad (10-5)$$

- avec :
- K_{D_u} = perméabilité non saturée [$\text{cm}\cdot\text{hr}^{-1}$]
 - h = potentiel hydraulique [cm eau]
 - z = profondeur [cm]
 - θ_u = teneur en eau non gelée volumétrique [%]
 - θ_i = teneur en glace volumétrique [%]
 - ρ_i = masse volumique de la glace [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$]
 - ρ_w = masse volumique de l'eau [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$]



10-19 Démarche générale de la procédure du CRREL



10-20 Réseau de la procédure du CRREL

Le terme de pénétration de la glace $(\rho_w/\rho_i)(\partial\theta_i/\partial t)$ existe seulement dans les zones en gel et dégel. θ_i est une fonction continue du temps. Dans ces zones, l'équation (10-5) est couplée avec l'équation de la diffusion thermique.

La courbe caractéristique sol-eau (SWCC) suit la relation de Gardner (1958) :

$$\theta_u = \frac{\theta_0}{A_w |h_p|^\alpha + 1} \quad (10-6)$$

avec : θ_0 = porosité du sol [%]

h_p = pression interstitielle [cm eau]

A_w = multiplicateur de Gardner

α = exposant de Gardner

Pour chaque sol à modéliser, les valeurs de θ_u et h sont déterminées en laboratoire et ajustées à la relation de Gardner par les paramètres A_w et α .

La perméabilité non saturée est déterminée selon le même principe. Dans ce cas c'est la relation suivante, qui est aussi une relation de Gardner, qui est utilisée :

$$K_{Du} = \frac{k_s}{A_K |h_p|^\beta + 1} \quad (10-7)$$

avec : k_s = perméabilité saturée [cm·hr⁻¹]

A_K = multiplicateur de Gardner pour la perméabilité

β = exposant de Gardner pour la perméabilité

Dans la zone partiellement gelée, la perméabilité non saturée est réduite en utilisant une relation empirique gouvernée par le facteur E :

$$K_{DF} = K_{Du} (h_p) 10^{-E\theta_i}, \quad E\theta_i \geq 0 \quad (10-8)$$

avec : K_{DF} = perméabilité ajustée pour la zone partiellement gelée [cm·hr⁻¹]

E = constante empirique [-]

On peut déterminer le facteur E par la relation :

$$E = \frac{5}{4} (k_s - 3)^2 + 6 \quad (10-9)$$

Le gonflement au gel est estimé par la relation :

$$\theta_s = \theta_i - (\theta_0 - \theta_n) \quad (10-10)$$

avec : θ_s = teneur en glace volumétrique formée par aspiration (ségréguée) [%]

θ_0 = porosité du sol [%]

θ_n = teneur en eau non gelée résiduelle [%]

θ_n détermine la succion sur le front de gel. Il est calculé au moyen de l'équation (10-6) en admettant que cette succion est de 800 cm d'eau

Le tassement de dégel est établi par un processus inverse à celui du gonflement.

Les paramètres et conditions suivantes doivent être connus pour utiliser FROST :

- paramètres de Gardner pour la SWCC,
- paramètres de Gardner pour la perméabilité non saturée,

- porosité et masse volumique du sol,
- conductivité et capacité thermique,
- facteur E ,
- épaisseurs des éléments,
- pressions interstitielles au sommet et en bas du modèle,
- températures au sommet et en bas du modèle données par pas de 24 heures,
- distribution en fonction de la profondeur de la température initiale, de la pression interstitielle et de la teneur en glace,
- contrainte due à la surcharge,
- température de congélation (0°C),
- modificateur de la surcharge agissant sur le noeud supérieur pendant le dégel (0,0 pour une vieille superstructure fissurée et 1,0 pour une nouvelle).

Dans la zone du gel prévu, la hauteur des éléments doit être de quelque 2 cm.

Lorsque le modèle est complètement dégelé et que le drainage vertical s'établit, la pression interstitielle à la surface est donnée par la relation $\partial h / \partial t = 0$ qui signifie que la vitesse du flux au travers de cette limite est nulle. Lorsque la température de surface est $> 0^{\circ}\text{C}$, la pression interstitielle sur cette dernière est fixée à 0 cm d'eau. Lorsque cette température est $\leq 0^{\circ}\text{C}$, une pression interstitielle constante de -300 cm d'eau est utilisée. La pression interstitielle au bas du modèle est fixée en fonction de la position de la nappe phréatique

Les résultats fournis par FROST sont divisés en trois parties :

- les conditions initiales dont les propriétés des matériaux,
- les résultats en chaque noeud pour chaque étape du calcul (en général 24 heures) : température, pression interstitielle, teneur en eau et glace, masse volumique, porosité, etc.,
- résumé des gonflements et positions du front de gel.

10.6.3 Programme TRANSFORM

Ensuite, le programme TRANSFORM divise la superstructure et l'infrastructure en sous-couches dont les épaisseurs sont déterminées par les températures et les teneurs en eau. TRANSFORM utilise pour cela les résultats de FROST. À chaque sous-couche est assigné un module résilient, un coefficient de Poisson et une masse volumique. Par exemple, si le modèle à une dimension est divisé en 99 éléments, TRANSFORM les combine pour obtenir entre 5 à 20 sous-couches dont les modules résilients sont différents. Ces modules sont lissés d'une couche à l'autre. Sa tâche la plus importante est la détermination des modules résilients dans les zones gelées et non gelées. Ceux relatifs au revêtement bitumineux sont donnés par la relation de Schmidt (1975) pour des températures $< 1^{\circ}\text{C}$ et par celle de Ullidtz (1987) pour des températures $\geq 1^{\circ}\text{C}$.

Schmidt : $T \geq 1^{\circ}\text{C}$	$M_r [\text{kPa}] = 6,9 \cdot 10^{\eta}$ $\eta = 6,285 - 1,931 \cdot 10^{-2} \cdot T - 3,280 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 - 1,888 \cdot 10^{-5} \cdot T^3$ $+ 1,175 \cdot 10^{-7} \cdot T^4 + 1,502 \cdot 10^{-8} \cdot T^5 - 2,022 \cdot 10^{-10} \cdot T^6$	(10-11)
Ullidtz : $T < 1^{\circ}\text{C}$	$M_r [\text{kPa}] = [15000 - 7900 \log_{10}(T)] \cdot 1000$	(10-12)

Celui d'un revêtement en béton est fixé à $3,5 \cdot 10^7$ kPa.

Ensuite, il détermine la classification des modules des matériaux meubles (sols) de la superstructure et de l'infrastructure, classification donnée sur le tableau 10-21.

10-21 Classification des modules résilients

Classification	Définition
1	Gelé : teneur en glace $\geq 0,005$, température $\neq 0^\circ \text{C}$, pression interstitielle $< 0^\circ \text{C}$ (suction).
2	Partiellement dégelé : teneur en glace $\geq 0,005$, pression interstitielle ≥ 0 .
3	Dégelé avec une pression interstitielle négative : teneur en glace $< 0,005$, pression interstitielle $< 0^\circ \text{C}$ (suction).
4	Dégelé avec une pression interstitielle positive : teneur en glace $< 0,005$, pression interstitielle > 0 .
5	Couche récemment gelée : température $< 0^\circ \text{C}$. La couche conserve son module avant le gel jusqu'à ce que l'équation du gel prédit un module plus élevé ou jusqu'à ce que la température s'accroît.
6	Couche dégelée, pendant 120 jours après le gel. Son module est réduit par un rapport qui diminue en fonction du temps.

Les modules résilients des matériaux de la superstructure et de l'infrastructure sont calculés en utilisant des formules de régression tirées des essais en laboratoire. Pour les sols gelés, la forme générale de ces formules est :

$$M_r = K_1 \left[w_u / w_0 \right]^{K_2} \quad (10-13)$$

avec : w_u = teneur en eau non gelée

w_0 = teneur en eau totale

K_1, K_2 = coefficients de la régression. K_1 est fonction de la saturation et de la masse volumique sèche.

w_u est lui-même fonction de la température par une relation du genre :

$$w_u = \alpha \left| T / T_0 \right|^\beta \quad (10-14)$$

avec : T = température négative

T_0 = $1,0^\circ \text{C}$

α, β = constantes

Quelques exemples de la relation (10-14) sont donnés dans l'état des connaissances actuelles (chap. 2).

Pour l'évaluation du module résilient au gel et au dégel, comme en condition non gelée, il existe d'autres relations qui tiennent compte d'autres paramètres, notamment du tenseur des contraintes et de la masse volumique (voir en particulier : Bigl & Berg 1996c).

Les coefficients de Poisson utilisés par TRANSFORM sont ceux donnés par le tableau 10-22.

10-22 Coefficients de Poisson

Coefficient de Poisson	Condition
Revêtement bitumineux	
0,30	Température de la couche < -2° C
0,35	Température de la couche ≥ -2° C et ≤ 1° C
0,40	Température de la couche > 1° C et ≤ 8° C
0,45	Température de la couche > 8° C
Béton	
0,15	Constant pour toutes les températures
Sol	
0,33	Dégelé, teneur en glace volumique < 0,005
0,35	Gelé, teneur en glace volumique ≥ 0,005

10.6.4 Programme NELAPAV

Intervient alors le programme NELAPAV (Nonlinear Elastic Layer Analysis for PAVement) qui calcule les déformations, les contraintes et les déplacements aux noeuds lorsqu'une charge est appliquée sur la surface du modèle. Il a été développé par Irwin et Speck (1986). C'est un programme aux éléments finis, en coordonnées circulaires, adapté au calcul des contraintes et déformations dans une superstructure de chaussée sous une charge circulaire en surface. Il permet l'introduction de modules de déformation non linéaires et un coefficient de poussée des terres au repos K_0 variable. Le CRREL fixe les valeurs de ce coefficient à 1,5 pour le revêtement et 1,0 pour les couches non gelées.

Les principaux résultats de NELAPAV sont :

- un rappel des données,
- les modules de chaque couche recalculés (compatibles) par le programme,
- les contraintes en tous les points spécifiés.

10.6.5 Programme CUMDAM

Enfin, le programme CUMDAM détermine les dommages cumulés de la superstructure. Il a été développé au CRREL. Le cumul des dommages est calculé par la relation :

$$\sum_{i=1}^i \frac{n_i}{N_i} = D \quad (10-15)$$

- avec : n_i = nombre d'applications de la charge (trafic) à un niveau de déformation i
 N_i = nombre d'applications de la charge (trafic) produisant la rupture à un niveau de déformation i , basé sur un modèle de prévision du dommage
 D = dommage cumulé total.

$D = 1,0$ correspond à la durée de vie de la chaussée.

Trois modèles de prévision des dommages sont utilisés à savoir :

- deux critères pour les revêtements flexibles avec plusieurs variantes : critère de la déformation horizontale et critère de la déformation de l'infrastructure,
- un critère pour les revêtements en béton : contrainte horizontale.

A. Revêtement flexible, critère de la déformation horizontale

A1 Asphalt Instiute (MS-1, 1982)

$$N_a = 18,4 \cdot C \cdot \left(4,325 \cdot 10^{-3}\right) \cdot |\varepsilon_t|^{-3,291} \cdot \left(E_a^{-0,854}\right) \quad (10-16)$$

- avec : N_a = nombre d'applications de la charge de trafic pour une fissuration de 45%
 C = une fonction du volume des vides et du volume de l'asphalte (au sens américain du terme) = $10^{4,84[(V_b/V_v+V_b)-0,69]}$
 V_b = volume de l'asphalte, (11%)
 V_v = volume des vides (5%)
 ε_t = déformation en tension au pied de la couche d'asphalte
 E_a = module de la couche d'asphalte [lb/in²].

A2 Witczak (1972)

$$N_a = a \cdot b^{q^d} (1/\varepsilon_t)^c \quad (10-17)$$

- avec : a = $1,86351 \cdot 10^{-17}$
 b = 1,01996
 c = 4,995
 d = 1,45
 q = température du revêtement [°F].

A3 Corps of Engineers (U.S. Army, 1988)

$$N_a = 10^{(2,68-5\log|\varepsilon_t|-2,66\log E_a)} \quad (10-18)$$

A4 Coetze et Connor (1990)

$$N_a = a \cdot \varepsilon_t^b \cdot E_a^c \quad (10-19)$$

Lorsque $E_a \geq 1'500'000$ lb/in² : $a, b, c = 3,364 \cdot 10^6, -7,370, -4,470$.

Lorsque $E_a < 1'500'000$ lb/in² : $a, b, c = 6,565 \cdot 10^6, -5,764, -3,640$.

B Revêtement flexible, critère de la déformation de l'infrastructure

B1 Asphalt Instiute (MS-1, 1982)

$$N_s = 10^{\left[\frac{1}{m}(\log l - \log \varepsilon_v)\right]} \quad (10-20)$$

- avec : N_s = trafic admissible basé sur la déformation de l'infrastructure
 m = constante = 0,25
 l = constante = $2,8 \cdot 10^{-2}$
 ε_v = déformation verticale de l'infrastructure [-].

B2 Corps of Engineers (U.S. Army, 1988)

$$N_s = 10000 \left(\frac{0,000247 + 0,00245 \log E_s}{\varepsilon_v} \right)^{0,0658 E_s^{0,559}} \quad (10-21)$$

avec : E_s = module résilient de l'infrastructure [lb/in²].

C Revêtement en béton, critère de la contrainte horizontale du Corps of Engineers (U.S. 1990)

$$N_h = 10 \left[\frac{df - adon}{bdon} \right] \quad (10-22)$$

avec : N_h = trafic admissible basé sur la contrainte horizontale

$$df = R_{con} / \sigma_h$$

R_{con} = contrainte de flexion dans le revêtement en béton [lb/in²]

σ_h = contrainte horizontale à la base du revêtement en béton [lb/in²]

$$adon = 0,2967 + 0,002267 \cdot SCI$$

$$bdon = 0,3881 + 0,000039 \cdot SCI$$

SCI = Indice de surface du revêtement lors de sa rupture.

10.6.6 Détermination en laboratoire des modules résilients

10.6.6.1 Essais

Au CRREL, les essais pour la détermination des modules résilients sont réalisés dans des cellules soumises à un chargement répété triaxial avec une fréquence de 1/3 de Hz (Cole et al., 1985 & 1986, AASHTO 1996b). Le diamètre des cellules est de 2 ou 6 inches. Leur instrumentation comprend un capteur de force placé sur le piston de charge, deux capteurs de déplacement vertical et trois VIT (variable impedance transducer) capteurs placés sur la membrane pour mesurer la déformation radiale.

L'éprouvette est compactée au moyen d'un compacteur spécial à pression et à pétrissage (à l'origine utilisé pour les bétons bitumineux) qui produit une éprouvette homogène sur toute sa hauteur. Sa teneur en eau de compactage est, en principe, celle de l'optimum Proctor.

Pour les essais sur des éprouvettes non gelées, la combinaison de la contrainte verticale et de la contrainte horizontale est choisie de manière à éviter toute déformation excessive (5% dans le sens vertical). Elle dépend de la teneur en eau et de la résistance estimée.

Pour les essais au gel, les éprouvettes sont gelées à diverses températures (par exemple : -7,0, -5,0, -3,0 ou -2,0° C). Pour cela une chambre climatique, à température variable, est placée par-dessus la cellule triaxiale.

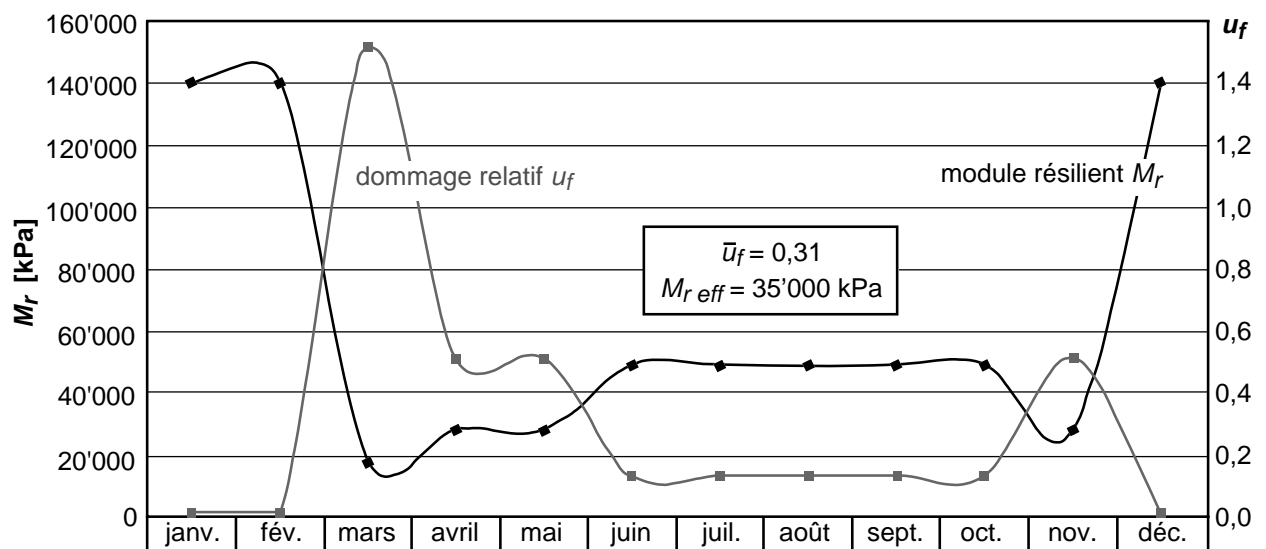
Le déviateur des contraintes cycliques est appliqué jusqu'à ce que la déformation verticale résiliente se stabilise, ce qui se produit pour 70 à 100 cycles de chargement. La formation de lentilles de glace par ségrégation d'eau n'est pas possible car le système est fermé, sans apport extérieur d'eau. Cet essai ne détermine donc pas le module résilient relatif à la diminution maximale de la portance. Ce point sera discuté plus loin. Lors des chargements, l'éprouvette peut cependant être drainée.

Lorsqu'un essai sur une éprouvette gelée est terminé, elle est dégelée et retestée dans un état dégelé et saturé. Pour les matériaux grossiers, l'éprouvette est ensuite drainée et retestée. Enfin, pour les matériaux des couches de fondation et de l'infrastructure, une succion croissante peut être appliquée pour de nouveaux essais.

10.6.6.2 Détermination d'un module résilient de dimensionnement

Pour dimensionner une superstructure de route ou de voie ferrée avec un module résilient de l'infrastructure, il faut définir ce que l'AASHTO (1996a) appelle un *module résilient effectif* (effective resilient modulus). Il est défini comme un module unique qui produit la même quantité annuelle de dommages que celui produit par la variation des modules résilients pendant une année.

La figure 10-23 est un exemple de détermination de ce module effectif.



10-23 Exemple de détermination du module résilient effectif $M_{r\text{ eff}}$

Adapté de Janoo et al. (1999)

La courbe en gris décrit les dommages relatifs (mensuels) subit par la route. Le dommage relatif u_f est déterminé par la relation :

$$u_f = 1,18 \cdot 10^8 \cdot M_r^{-2,32} \quad (10-23)$$

\bar{u}_f , la moyenne annuelle de ces dommages permet de calculer le module résilient effectif par la relation la relation :

$$M_{r\text{ eff}} = \left(\frac{\bar{u}_f}{1,18 \cdot 10^8} \right)^{-1/2,32} \quad (10-24)$$

$M_{r\text{ eff}}$ est le module résilient de dimensionnement.

10.6.7 Exemples

Les programmes nécessaires à l'usage du modèle mécanique du CRREL n'étant pas à notre disposition, l'exemple de la figure 10-8 ne peut pas être traité avec cette procédure.

Le CRREL a mis au point son modèle à l'occasion d'une vaste campagne d'essais en vraie grandeur connue sous le nom de « Mn/ROAD test » et réalisée par le Mn/DOT (Mn = Minnesota, DOT = « Department of Transportation ») en collaboration avec le CRREL. Cette campagne d'essais a été entreprise sur 23 tronçons de routes différents. Le lecteur trouvera de nombreux exemples dans la littérature consacrée à cette campagne d'essais : Bigl & Berg (1996a, 1996b, 1996c), Berg et al. (1996) et Janoo et al. (1999).

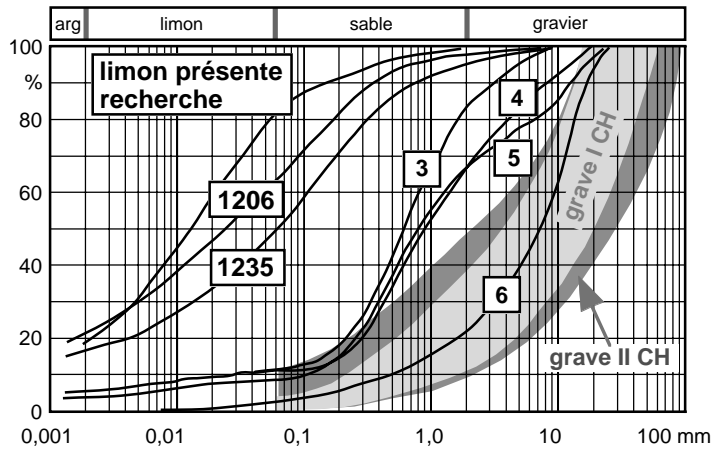
10.6.8 Quelques valeurs du module résilient de l'infrastructure et des couches de fondation

Au CRREL et dans d'autres laboratoires, de nombreux essais de détermination des modules résilients au gel et au dégel ont été réalisés. Ce paragraphe est un florilège de leurs résultats. Les figures 10-24 à 10-26 montrent les résultats des essais réalisés par le CRREL pour le « MN/ROAD Test ». La figure 10-24 résume les résultats des essais d'identification et de détermination de la SWCC selon la procédure de Ingersoll (1981). La gélivité des matériaux a été évaluée par la méthode proposée par Chamberlain (1987). La figure 10-25 résume ceux donnant la perméabilité en fonction de la succion (procédure Ingersoll, 1981) et la teneur en eau non gelée en fonction de la température déterminée par résonance magnétique nucléaire (NMR) (Tice et al., 1982). Enfin la figure 10-26 est un résumé des résultats des essais de détermination du module résilient M_r au dégel. On constate sur cette figure la grande dispersion des résultats des essais effectués à une température donnée.

Les résultats correspondant des essais entrepris pour le limon utilisé pour la recherche qui fait l'objet de ce rapport sont ajoutés aux figures 10-24 et 10-25. Sur cette dernière figure, la forme des relations teneur en eau vs température ne correspond pas à celle des essais du CRREL réalisés par NMR. Les essais de notre recherche ont été en effet réalisés avec une autre technique. L'asymptote verticale des essais par NMR n'a pas de sens physique car, pour les températures positives, la température devient constante (horizontale). Pour les autres relations, les résultats sont comparables.

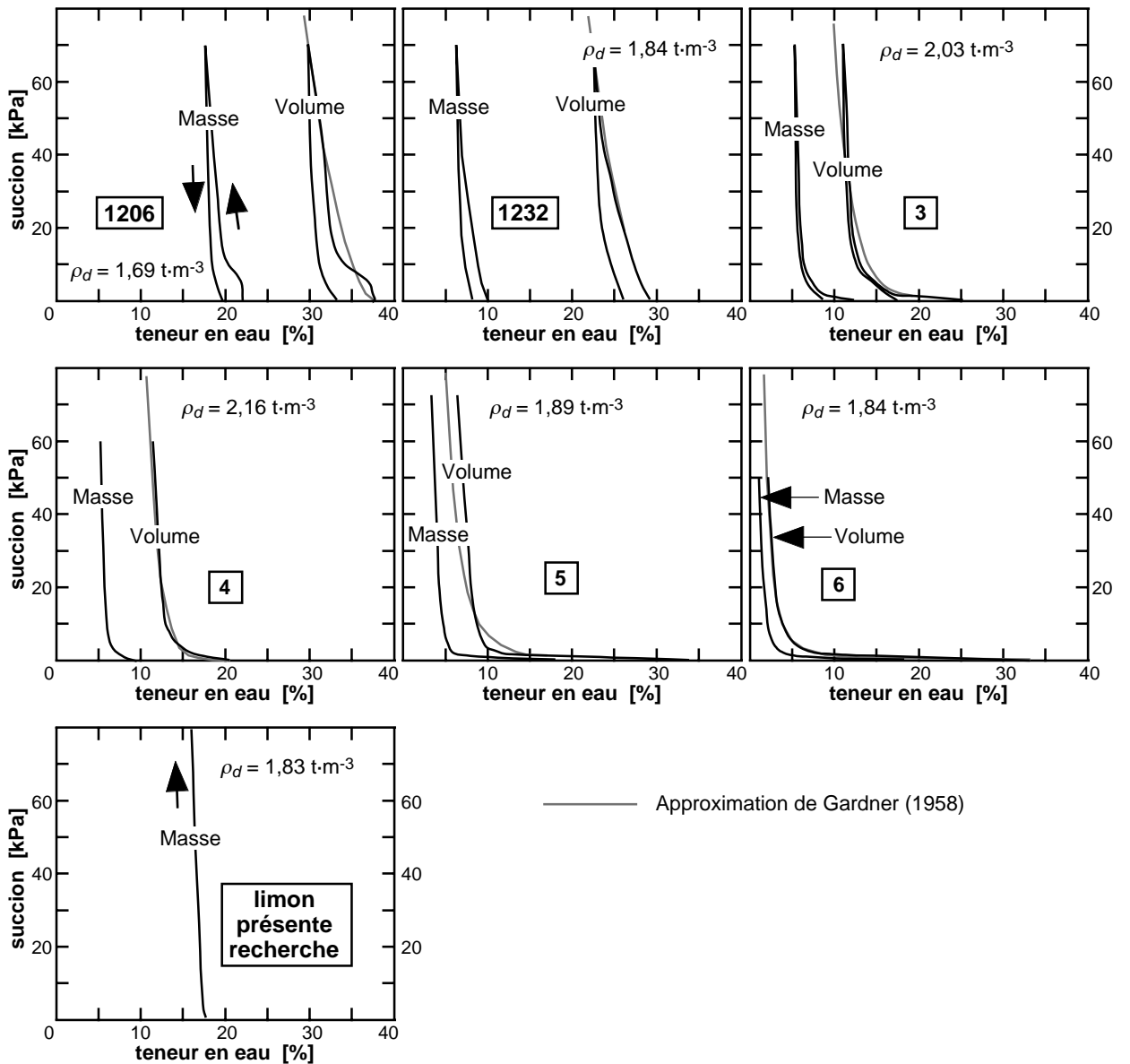
La figure 10-27 décrit quelques résultats des essais réalisés par Janoo et al. (1999) sur des sols du New Hampshire (USA.), ceci avec la procédure du CRREL. Il est intéressant de constater que les sols NH4 et NH5 présentent des modules résilients fortement différents avant le gel et après le dégel alors que ce n'est pas le cas pour les trois autres sols. Le tableau 10-28 recommande des modules résilients effectifs pour quelques sols d'infrastructure classés selon l'USCS.

Enfin, une récapitulation intéressante de tous les essais de détermination du module résilient au dégel est donnée par Janoo & Barna (2002) et fait l'objet du tableau 10-29. Elle donne, pour les sols d'infrastructure gélifs, le facteur de réduction au dégel du module résilient mesuré hors gel.

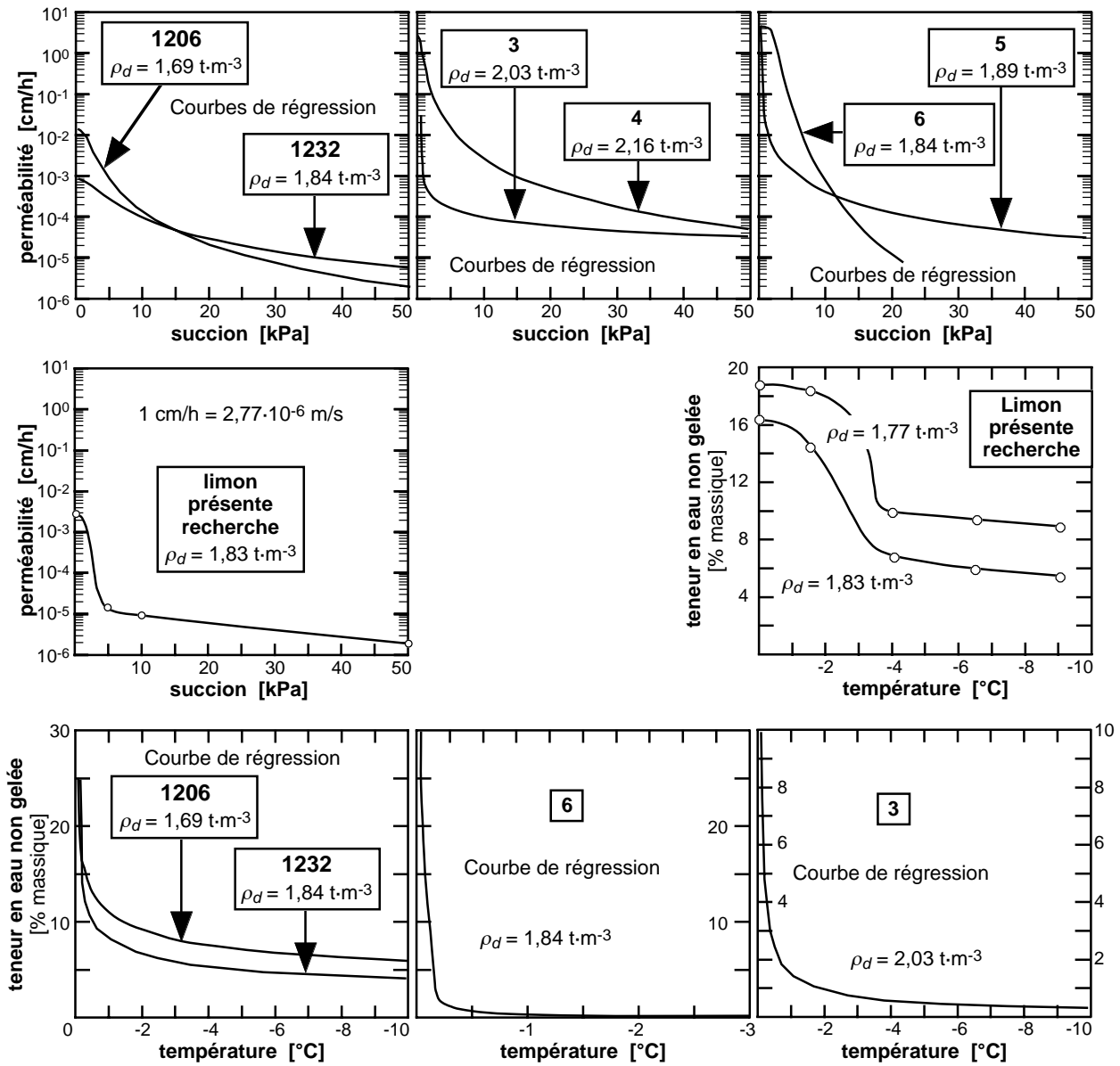


Matériau	USCS (1)	ρ_s [t·m ⁻³]	w_L [%]	I_P [%]	Gélimité
Infrastructure					
1206	CM	2,70	37,0	18,5	très forte
1232	CL	2,71	26,4	10,9	forte
Couches de fondation					
3	SW	2,69	17,0	1,2	forte
4	SM	2,73	—	—	forte
5	GW	2,81	23	3	moyenne
6	GW	2,74	—	—	faible
limon recherche	CL	2,70	27,5	12,6	très forte

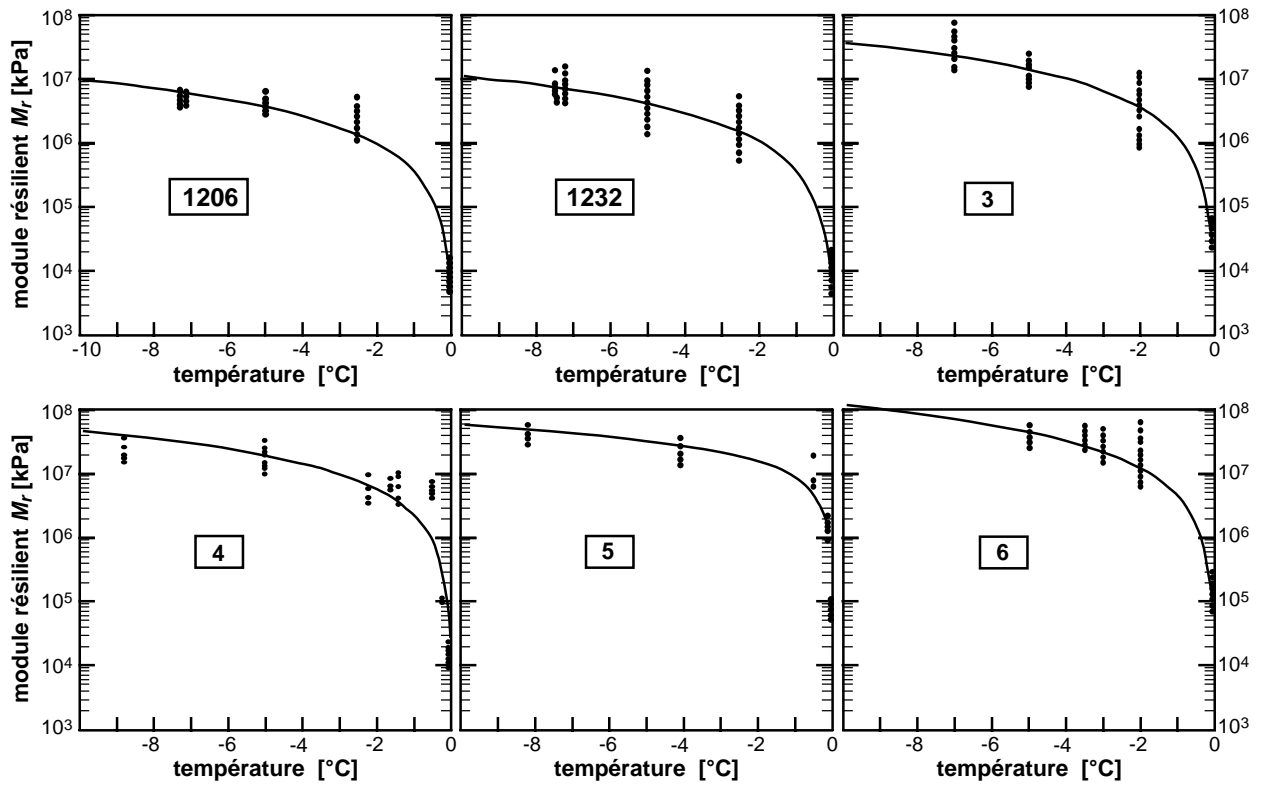
(1) selon SN 670 008a



10-24 Résultats des essais d'identification et de succion pour le Mn/ROAD Test
Adapté de Bigl & Berg (1996a)

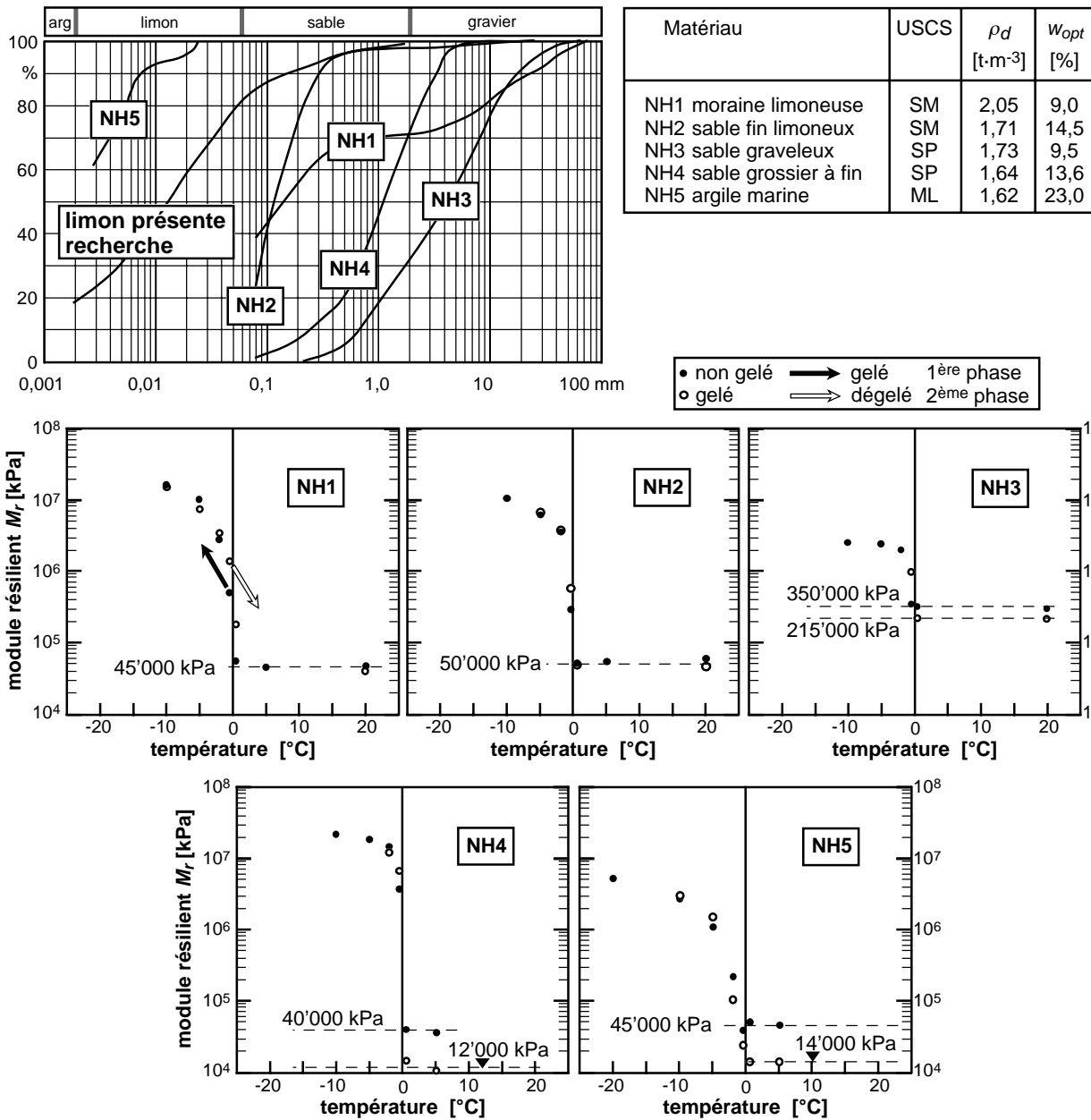


10-25 Résultats des essais de perméabilité et de teneur en eau non gelée pour le Mn/ROAD Test
Adapté de Bigl & Berg (1996a)



10-26 Résultats des essais de mesure du M_r au dégel pour le Mn/ROAD Test

Adapté de Bigl & Berg (1996a). Courbes de régression de la forme $M_r = K_I(w_u/w_t)^{K_2}$, w_u = teneur en eau non gelée, w_t = teneur en eau totale



10-27 Résultats des essais de mesure du M_r sur des sols du New Hampshire (USA)

Adapté de Janoo et al. (1999)

10-28 Modules résilients effectifs recommandés pour quelques sols

Adapté de Janoo et al. (1999)

Sol d'infrastructure	USCS	Module résilient effectif [kPa]
Limon, quelques sables fins, quelques graviers grossiers à moyens, traces de sable grossier à moyen (moraine) NH1	SM	45'000
Sable fin un peu limoneux, NH2	SM	62'000
Gravier grossier à fin, sable grossier à fin, traces de sable fin, NH3	SP	265'000
Sable grossier à moyen, un peu de sable fin, NH4	SP	26'000
Limon argileux (dépôt marin) NH5	ML	21'000

10-29 Facteurs de réduction au dégel des modules résilients hors gel
Adapté de Janoo & Barna (2002)

Groupe de gélivité (2)	Sol	% massique < 0,02 mm	USCS (1)	M_r hors gel [MPa] (3)	Facteur réduction [%]
Non gélif (NFS)	Gravier, pierres et roches concassées	0 – 1,5	GW, GP	70 à 300	100
	Sable	0 - 3	SW, SP	30 à 200	100
Eventuellement gélif (PFS)	Gravier, pierres et roches concassées	1,5 – 3	GW, GP	60 à 200	90
	Sable	3 - 10	SW, SP	30 à 200	90
Négligeable (S1)	Sols graveleux	3 - 6	GW, GP, GW-GM, GP-GM	50 à 200	75
Très faible (S2)	Sols sableux	3 - 6	SW, SP, SW-SM, SP-SM	30 à 100	70
Faible (F1)	Sols graveleux	6 - 10	GM, GW-GM, GP-GM	50 à 200	60
Faible à moyen (F2)	Sols graveleux	10 – 20	GM, GW-GM, GP-GM	40 à 200	50
	Sols sableux	6 - 15	SM, SW-SM, SP-SM	20 à 80	50
Moyen (F3)	Sols graveleux	> 20	GM, GC	30 à 200	30
	Sols sableux à l'exception des sables limoneux très fins	> 15	SM, SC	10 à 60	30
	Argiles, IP > 12	–	CL, CH	2 à 15	30
Fort (F4)	Limons		ML, MH	3 à 40	30
	Sables limoneux très fins	> 15	SM	20 à 80	30
	Argiles, IP < 12	–	CL, CL-ML	5 à 20	30
	Argiles varvées et autres sédiments fins varvés	–	CL, CH, ML, SM	2 à 10	30

(1) selon ASTM D-2487

(2) NFS, PSF, S1, S2, F1, F2, F3, F4 = désignation groupe gélivité selon US Army Corps of Engineers (fig. 10-15)
textes français = approximation selon norme SN 670 140b

(3) estimations

10.7 Comparaison avec les modules résilients de la halle fosses d'Écublens et avec ceux de la présente recherche

10.7.1 Comparaison

Nous allons comparer :

- les résultats de l'évaluation des modules résilients par la ré-exploitation des essais réalisés dans la halle fosses d'Écublens (chap. 9),
- les résultats du calcul des modules résilients par mesure des déformations dans les éprouvettes de la présente recherche au moyen des rayons X (chap. 6),
- les modules résilients déterminés par le CRREL sur des sols proches de ceux utilisés pour les essais dans la halle fosses et lors de la présente recherche, à savoir, les sols d'infrastructure numérotés 1206, 1232, NH2 et NH5 dans le paragraphe 10.6.8.

Cette comparaison fait l'objet du tableau 10-30. Sur cette figure, les modules résilients sont arrondis au MPa.

10-30 Comparaison des mesures des modules résilients

Origine	Essai / échantillon	vitesse dégel [mm·j ⁻¹]	Module résilient M_r [MPa]								
			44	25	12	9	5	2	-2	-12	-30
Niveau par rapport prof. max gel [cm] (1)			44	25	12	9	5	2	-2	-12	-30
Halle fosses Écublens CL $w_L = 31,4\%$ $I_P = 11,8\%$	VI 100 cycles de charge, moyenne	2,6	-	-	-	-	-	-	-	-	19'000
	VI tout le dégel		-	-	-	-	-	-	-	-	11
	VI par mesure déflexions, moyenne		69								
	IV 100 cycles de charge, moyenne	3,3	35'000	10'000	-	-	-	-	-	2'500	-
	IV tout le dégel		40	1	-	-	-	-	-	1	-
	IV par mesure déflexion, moyenne sans poinçonnement		55								
	IV par mesure déflexion, pendant poinçonnement (48 ^e jour)		7								
Présente recherche CL $w_L = 27,5\%$ $I_P = 12,6\%$	11 Radios 5 à 6	(2)	-	-	26	8	2	10	10	-	-
	11 Radios 7 à 8	(2)	-	-	4	6	4	3	4	-	-
	12 Radios 3 à 4	(2)	-	-	-	-	1	1	1	-	-
	12 Radios 6 à 7	(2)	-	-	-	-	42	6	2	-	-
Essais CRREL	1206 CM, $w_L = 37,0\%$, $I_P = 18,5\%$		9								
	1232 CL, $w_L = 26,4\%$, $I_P = 10,9\%$		10								
	NH2, SM		50								
	NH5, ML		14								
(1) négatif => sous le front de gel			(2) sans signification								

En examinant le tableau 10-30, la première constatation est que, pour les essais dans la halle fosses, la mesure pour 100 cycles de charge, à savoir le nombre approximatif des chargements dans l'essai du CRREL, donne des valeurs très élevées qui sont dues, très probablement, à la mise en pression de l'eau de fonte des lentilles de glace (module compressibilité K de l'eau = 2200 MPa).

Par contre les modules résilients mesurés pour tous les cycles de charge d'un essai dans la halle fosses ou lors de la présente recherche sont du même ordre de grandeur que ceux déterminés au CRREL. Il faut rappeler que les essais dans la halle fosses et ceux de la présente recherche sont des essais réalisés en système ouvert, à savoir avec possibilité à l'eau, sous le front de gel, de migrer vers ce dernier, alors que les essais réalisés avec la procédure du CRREL sont des essais en système fermé sans modification de la teneur en eau totale (gelée et non gelée). En outre, les sols nommés 1206, 1232, NH2 et NH5 sur le tableau 10-30, ne sont pas exactement les mêmes que le limon utilisé pour les essais effectués dans la halle fosses et lors de la présente recherche. Pour les essais dans la halle fosses d'Écublens, les modules résilients évalués par les mesures de déflexion donnent aussi des valeurs comparables à celles des essais du CRREL.

Comme les essais réalisés avec la procédure du CRREL sont effectués en système fermé, la vitesse du dégel n'entre pas en ligne de compte alors que les essais de la halle fosses d'Écublens ont clairement montré que cette vitesse jouait un rôle prépondérant dans les déformations de l'infrastructure après le dégel (fig. 9.9).

10.7.2 Commentaire

Un essai standard, avec chargement cyclique, en système ouvert et sur des éprouvettes de petites dimensions, prenant en compte la vitesse du dégel est quasiment impossible à réaliser. Ainsi, un essai avec une procédure proche de celle de l'essai du CRREL est le seul qui puisse conduire à des résultats exploitables pour le dimensionnement au dégel des voies de circulation, ceci malgré ses inconvénients.

10.8 Applications aux normes suisses

10.8.1 Constitution de la superstructure

Il n'y a rien à modifier dans les normes suisses en matière de routes, pour ce qui concerne les dispositions géométriques de leur superstructure prises pour le gel et le dégel. En effet et notamment, la couche horizontale de drainage sous la superstructure a été supprimée depuis de nombreuses années. La seule chose qui pourrait être un peu améliorée est une augmentation de l'importance donnée, dans ces normes, à la construction et à l'*entretien* des drainages latéraux : SN 640 039, SN 640 317b, SN 640 355, SN 640 360, SN 640 720c, SN 640 730b, SN 640 731b, SN 640 732a, SN 640 735a. En outre, une norme sur les drainages latéraux des routes secondaires semble manquer (voir Bernsten & Saarenketo, 2005).

10.8.2 Dimensionnement au gel et dégel

10.8.2.1 Petit historique du dimensionnement des superstructures routières en Suisse

Comme la plupart des pays européens, il y a beaucoup à faire en Suisse en matière de dimensionnement des superstructures routières. Les normes suisses de dimensionnement, en particulier les normes SN 640 317b, SN 640 320a et SN 640 324a, découlent indirectement des résultats de l'essai AASHO qui s'est déroulé durant les années 1960 (AASHO 1962, VSS 1963) et des modèles développés pour cette occasion. En fait, leur démarche est tout à fait empirique. Comme déjà dit plus haut, mais il est important de le répéter, avec des matériaux bien connus, les méthodes suisses comme la plupart des méthodes européennes conduisent à d'excellents résultats.

Cependant, lorsque l'on souhaite introduire un nouveau matériau, les procédures empiriques sont peu utiles et, dans ce cas, il faut procéder à une longue et coûteuse expérimentation en place ou sur des modèles en vraie grandeur. Les essais réalisés dans la halle fosses d'Écublens (chap. 9) sont un bon exemple de cette démarche. Une méthode plus rationnelle, notamment basée sur les lois de la mécanique du continu et les lois de comportement propres à chaque matériau constituant la superstructure et l'infrastructure des voies de circulation, serait la bienvenue. Les essais en vraies grandeurs seraient alors avantageusement remplacés par des essais en laboratoire sur des échantillons de petites dimensions. En outre, l'évaluation du comportement à long terme des superstructures des voies de communication serait immédiate.

10.8.2.2 Méthodes basées sur des modèles analytiques

On peut classer les différentes méthodes de dimensionnement des superstructures des voies de communication de la manière suivante (Doré, 2000) :

- règles basées sur l'expérience,
- approche empirique,
- approche analytico-empirique,
- approche analytique.

Les normes suisses de dimensionnement des routes sont un mélange de règles basées sur l'expérience et d'une approche empirique (essai AASHO). Elles sont surtout caractérisées par un catalogue de structures.

Il n'y a que peu de différences entre l'approche analitico-empirique et l'approche purement analytique. Elles se basent sur un calcul de la réponse théorique de la structure soumise à une sollicitation avec une association de cette réponse au comportement de chaussées d'essai. L'approche purement analytique se base sur des modèles d'endommagement (de performance) analytiques, alors que la démarche analitico-empirique se base plutôt sur une statistique de ces endommagements.

Ce sont ces dernières approches qui nous intéressent car elle vont être introduites à plus ou moins court terme en Europe (COST 333 1999, AMADEUS 2000) et en Amérique du nord (NCHRP, 2004). En Suisse, on en parle depuis longtemps, mais il y faudra encore plusieurs années pour que les normes de dimensionnement actuelles soient adaptées à la méthode analytique.

Nous allons ci-dessous voir comment introduire le dimensionnement au gel et surtout au dégel, discuté sans ce chapitre, à ces modèles analytiques. Pour le modèle général, nous allons utiliser les rapports COST 333 et AMADEUS. La figure 10-31 montre l'organigramme de ce modèle avec son adaptation au phénomène du gel et du dégel.

L'adaptation du modèle général au dimensionnement au gel et dégel découle principalement de la démarche du CRREL présentée au paragraphe 10.6. Cette démarche nous semble en effet rationnelle, pas trop compliquée et déjà largement expérimentée avec succès. L'organigramme de la figure 10-31 est en fait proche de celui de la figure 10-19. La seule différence est la séparation de la procédure particulière au gel et dégel des matériaux de la superstructure et de l'infrastructure, de la procédure générale proposée par COST 333 (1999) et AMADEUS (2000).

La *procédure générale* est complexe car, en particulier, les propriétés des matériaux sont souvent non linéaires et peuvent changer en fonction du temps t , du climat et de leur endommagement dû au trafic. Le calcul se fait par incrément de temps Δt . Les propriétés des matériaux peuvent changer chaque heure (ex. : module résilient du revêtement bitumineux), quotidiennement (ex. : module résilient de l'infrastructure gélive) ou par saison (ex. : module résilient des matériaux graveleux des couches de fondation et de l'infrastructure, par modification de leur teneur en eau). Le trafic peut changer quotidiennement ou par saison.

À chaque incrément de temps Δt un incrément de dommage ΔD est créé ; il peut modifier les propriétés des matériaux et, parfois, la géométrie de la superstructure (fissures dans le revêtement, épaisseurs des couches). L'incrément de dommage ΔD est additionné après chaque incrément de temps jusqu'à ce que sa somme atteigne la valeur correspondant à la durée de vie choisie de la superstructure (avant travaux de réfection). Cette durée de vie est en général de 20 ans. Un exemple de modèle d'endommagement est donné sur la figure 10-31 pour ce qui concerne l'effet du gel et du dégel.

Quant au programme de calcul des contraintes et déformations, AMADEUS (2000) en a analysé plusieurs. Une norme nationale de dimensionnement des superstructures de voies de

communication devrait n'en choisir qu'un et il faudrait qu'il soit largement disponible et le plus simple possible.

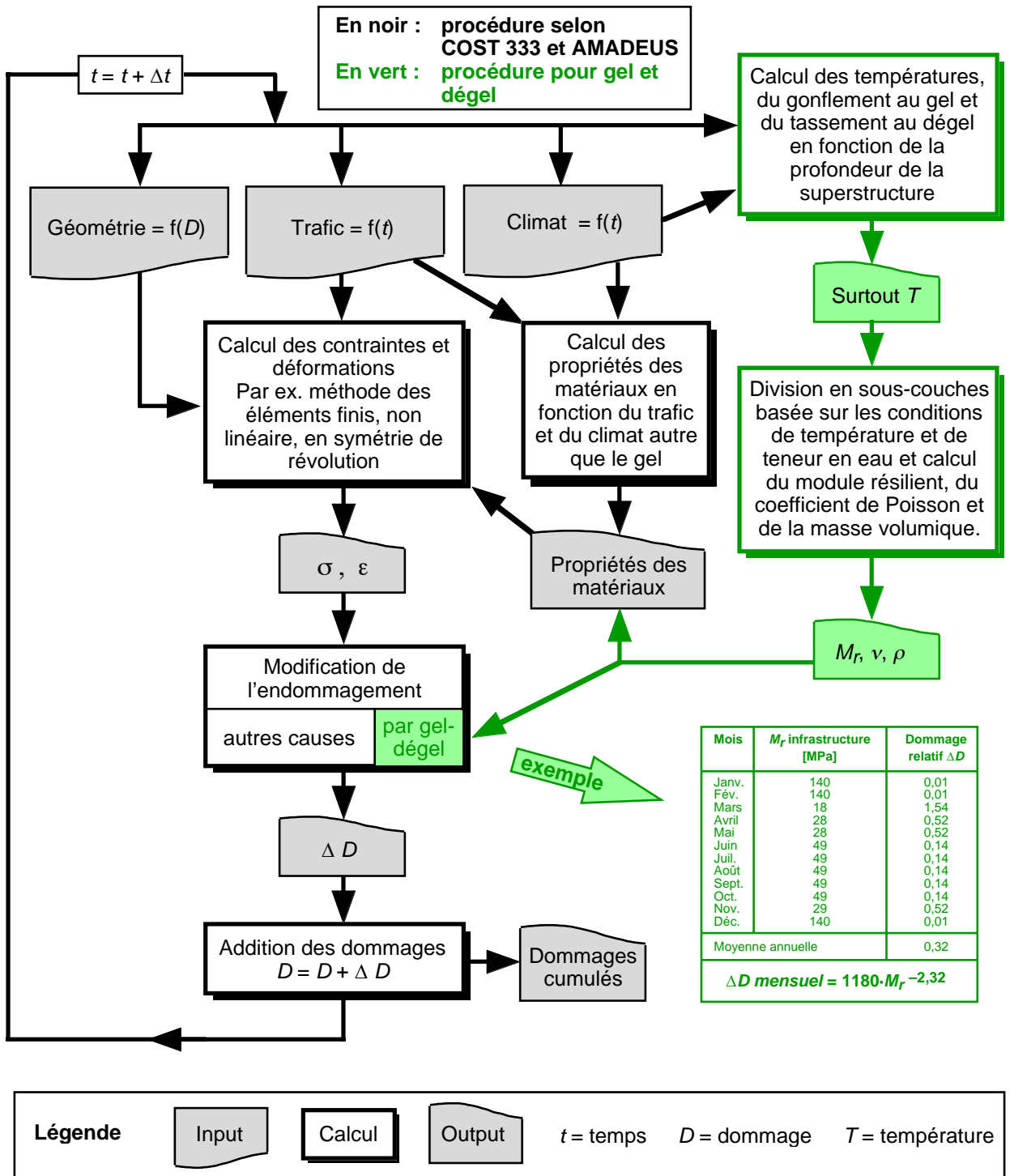
Pour la *procédure propre au gel et dégel* (couleur verte sur la fig. 10-31), les programmes utilisés par le CRREL : FROST et TRANSFORM (voir § 10.6) pourraient être utilisés en Suisse sans grandes modifications dans la procédure générale.

10.8.2.3 Application possible à la Suisse

L'application à la Suisse d'une méthode de dimensionnement analytique au gel et dégel des superstructures routières voire ferroviaires est tout à fait possible, d'autant plus que les paramètres nécessaires sont bien appréhendés dans ce pays. La méthode générale de dimensionnement analytique doit cependant être choisie et expérimentée auparavant. La Commission technique no 5 de la VSS a commencé à s'en occuper, mais, selon son président, il faudra encore plusieurs années pour qu'un premier projet voie le jour. C'est seulement après ce délai que la partie « dimensionnement au gel et dégel » pourra être greffée sur la méthode générale. Le choix et l'expérimentation de la méthode générale du dimensionnement analytique, comme ceux de sa partie consacrée au dimensionnement au gel et dégel, devront faire l'objet de mandats de recherche et leur attribution ne devrait pas trop tarder !

La procédure pour l'introduction en Suisse d'une méthode de dimensionnement analytique au *gel et dégel* pourrait être la suivante. Celle pour la méthode générale pourrait être un peu et en partie la même.

- *Acquisition ou développement des codes de calcul.* Le programme FROST du CRREL (§ 10.6) convient très bien au cas suisse. Quant à la division de la superstructure en sous-couches basée sur les conditions pendant le gel et le dégel et l'assignation à ces sous-couches d'un module résilient au temps t (programme TRANSFORM du CRREL), le code de calcul devra être adapté au code de calcul des contraintes et déformations de la méthode générale. Ainsi, il devra probablement être développé en Suisse. Ce code est cependant assez simple.
- *Mise au point d'un essai de laboratoire pour déterminer les modules résilients* des matériaux de la superstructure comme de l'infrastructure (terrain naturel), ceci *hors gel et pendant le gel*. L'essai choisi par le CRREL est assez simple et est très bien expérimenté. Il pourrait être introduit sans trop de modifications en Suisse. Il demande un appareillage particulier qui devrait être acquis et mise au point dans le cadre d'un mandat de recherche. Un seul dispositif d'essai devrait amplement suffire pour toute la Suisse. Cela implique cependant la réalisation des essais par un seul laboratoire, sans concurrence. Le choix d'un laboratoire d'une des Écoles polytechniques serait donc judicieux. C'est à ce laboratoire que devrait être confié le mandat de recherche.
- *Expérimentation de la méthode* sur des super- et infrastructures choisies parmi quelques routes suisses typiques (une dizaine ?) et avec deux ou trois hivers les plus rigoureux de ces trente dernières années (1984-85, 2004-05 par exemple). Elle peut être menée, en première étape, sur la seule partie « gel – dégel » de la méthode, mais devra absolument être réalisée, par la suite, sur l'ensemble de la méthode.



10-31 Procédure du dimensionnement d'une chaussée par un modèle analytique

La mise au point et l'introduction en Suisse d'une méthode de dimensionnement analytique des superstructures des voies de communication est un très gros travail qu'il ne faudrait pas trop tarder à entreprendre.

11

Applications aux pergélisols alpins

11.1 Introduction

Ce chapitre ne concerne que les pergélisols alpins, à savoir les pergélisols que l'on peut rencontrer dans des massifs montagneux, que ce soient les Alpes ou d'autres massifs montagneux du monde. Après quelques explications et discussions sur la formation des pergélisols alpins et des glaciers rocheux, et sur les problèmes de la fonte de ces pergélisols (compléments à l'état des connaissances actuelles), il va traiter de quatre applications, aux pergélisols alpins, des résultats de la recherche qui fait l'objet de ce rapport. Parmi elles, celle consacrée au rôle de la cryo-succion dans la formation des lentilles de glace, est la plus importante. La cryo-succion est le phénomène, lié à la désaturation du sol par congélation de l'eau interstitielle, qui se produit dans et sous la franche de gel (région de l'isotherme 0° C, voir chap. 2) et qui aspire l'eau nécessaire à la formation des lentilles de glace.

11.2 Formation des pergélisols alpins et des glaciers rocheux

La structure interne des pergélisols alpins était très mal connue jusqu'à la fin du 20^e siècle, où des constructions en haute montagne et des moyens financiers importants dévolus à des recherches scientifiques ont permis la réalisation de forages de reconnaissance dans des pergélisols alpins. Ces forages ont montré que la teneur en glace des pergélisols alpins était beaucoup plus importante que ce que l'on présumait précédemment. Par exemple, un forage exécuté dans une moraine pergelée, lors de la construction du téléphérique du Petit Cervin, a montré que la teneur en glace massive était comprise entre 50% et 80%.

Comment se forme un pergélisol alpin? Différentes théories existent. Pour certains, les pergélisols alpins sont les restes d'un retrait glaciaire, à savoir de la glace morte recouverte d'éboulis. Pour d'autres, c'est une formation propre à certaines conditions climatiques et géologiques et les plus prudents (les meilleurs scientifiques!) optent pour les deux modes de formation, combinés ou non. Par exemple, les moraines sont pergelées par contact avec le glacier (fig. 11-4).

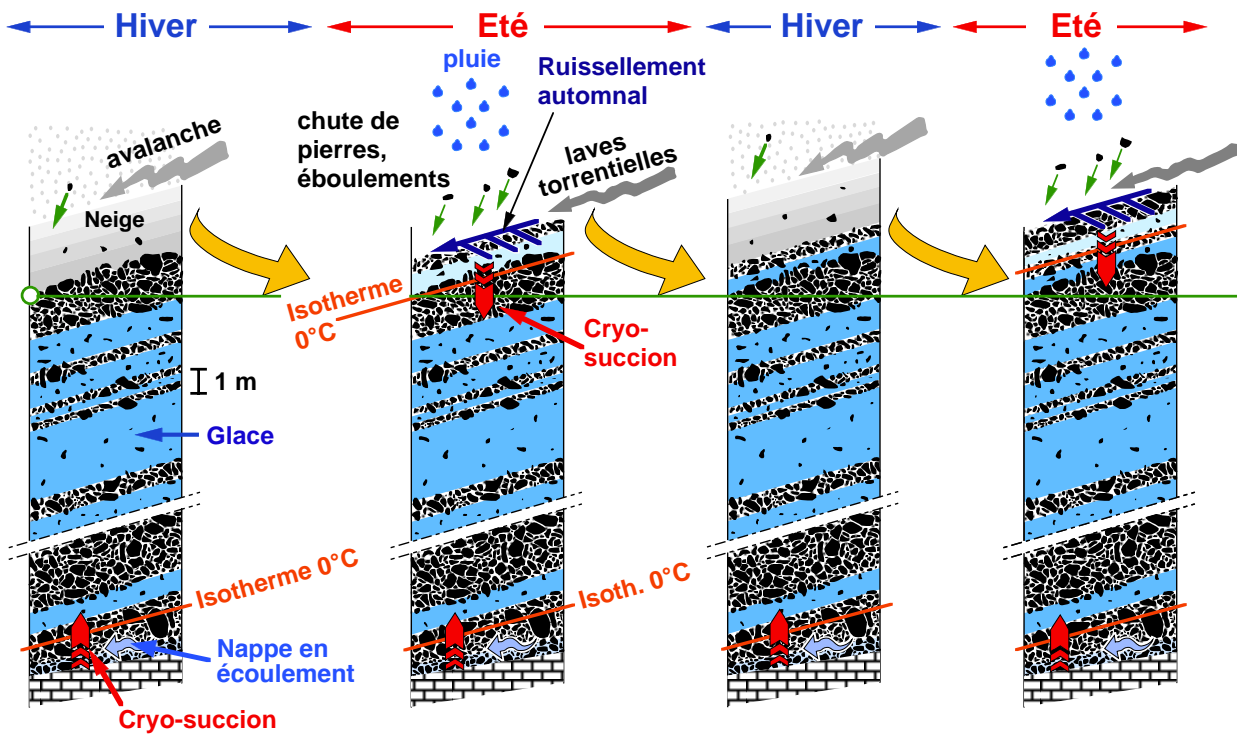
Les glaciers rocheux sont des pergélisols alpins qui fluent par gravité et peuvent prendre des formes qui s'apparentent à celles d'un glacier. Barsch (1996) définit surtout deux types de glaciers rocheux :

- Les glaciers rocheux de *talus* qui se développent au pied de parois rocheuses (zone de réception d'éboulis) et qui peuvent prendre des formes lobées ou en langue selon la topographie de la pente. Le mode de formation schématisé par la figure 11-1 est propre à ce type de glacier rocheux. C'est un des modes de formation possibles. Il n'est certainement pas le seul. Le rôle de la cryo-succion, signalée sur cette figure, sera discuté plus loin.

Pendant l'hiver, le pergélisol en formation est recouvert par les chutes de neige et les avalanches. Dès la fin du printemps et pendant l'été, les chutes de pierres, voire les laves torrentielles (fig. 11-2), à savoir des coulées de boue mélangée avec des blocs, pouvant dépasser le mètre cube, viennent recouvrir petit à petit la neige de l'hiver qui fond et qui se tasse. Si l'été n'est pas trop chaud et si les neiges de l'hiver et du printemps ont été assez

abondantes, une couche de neige reste emprisonnée sous les éboulis *qui la protègent du rayonnement solaire* comme de celui du sol vers le ciel, neige qui se transforme en glace après quelques années. Cette protection contre les radiations solaires permet aux pergélisols alpins de se développer à des altitudes bien inférieures à la zone d'accumulation des glaciers. Le même processus se répète année après année et le pergélisol se forme ainsi petit à petit. En été, dans la couche active, à savoir la couche dégelée pendant l'été, l'eau de fonte du névé et la pluie percolent et contribuent à la formation de la glace.

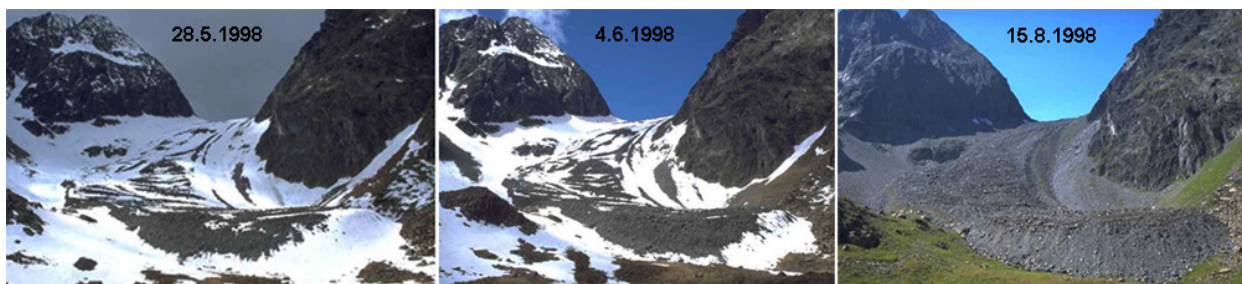
- Les glaciers rocheux de *débris glaciaires* qui transportent des matériaux d'origine glaciaire comme les moraines. La figure 11-4 montre l'évolution des températures dans une moraine suite à un retrait glaciaire. La moraine ne s'est pas encore transformée en véritable glacier rocheux, mais son fluage important a endommagé la cabane qui se trouvait à son sommet. Les photographies des figures 11-2 et 11-3 illustrent, dans une certaine mesure, les phénomènes décrits schématiquement sur la figure 11-1.



11-1 Un mode de formation possible des glaciers rocheux

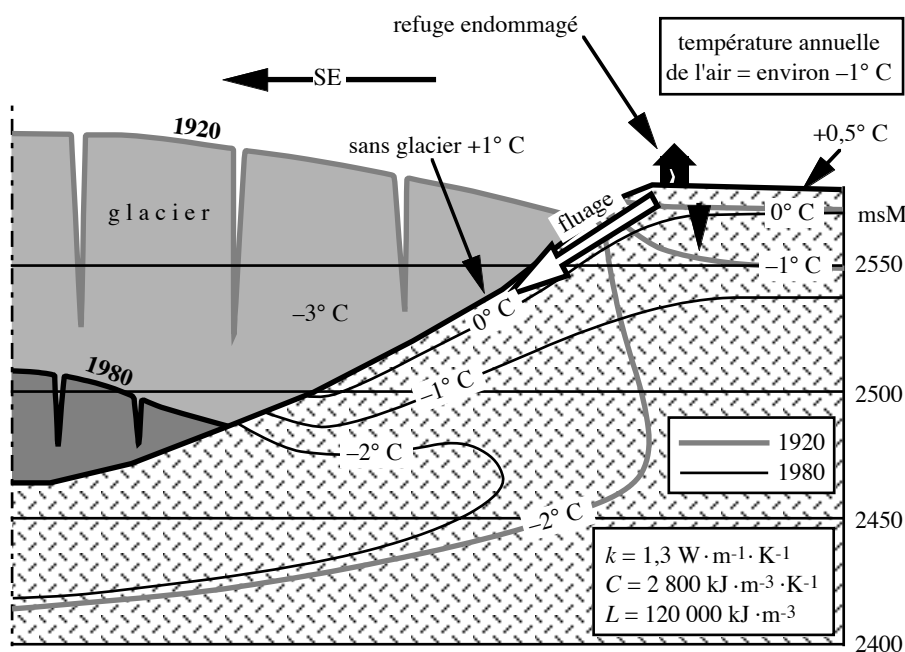


11-2 Laves torrentielles sur un névé (photo Dysli)



11-3 Glacier rocheux de Reichenkar (Autriche, ouest Alpes Stubai) du printemps à l'été

Photos Universität Innsbruck, Fakultät für Geo- und Atmosphärenwissenschaften, Geologie und Paläontologie



11-4 Effet d'un retrait glaciaire sur l'évolution d'un pergélisol alpin (Dysli, 1991)

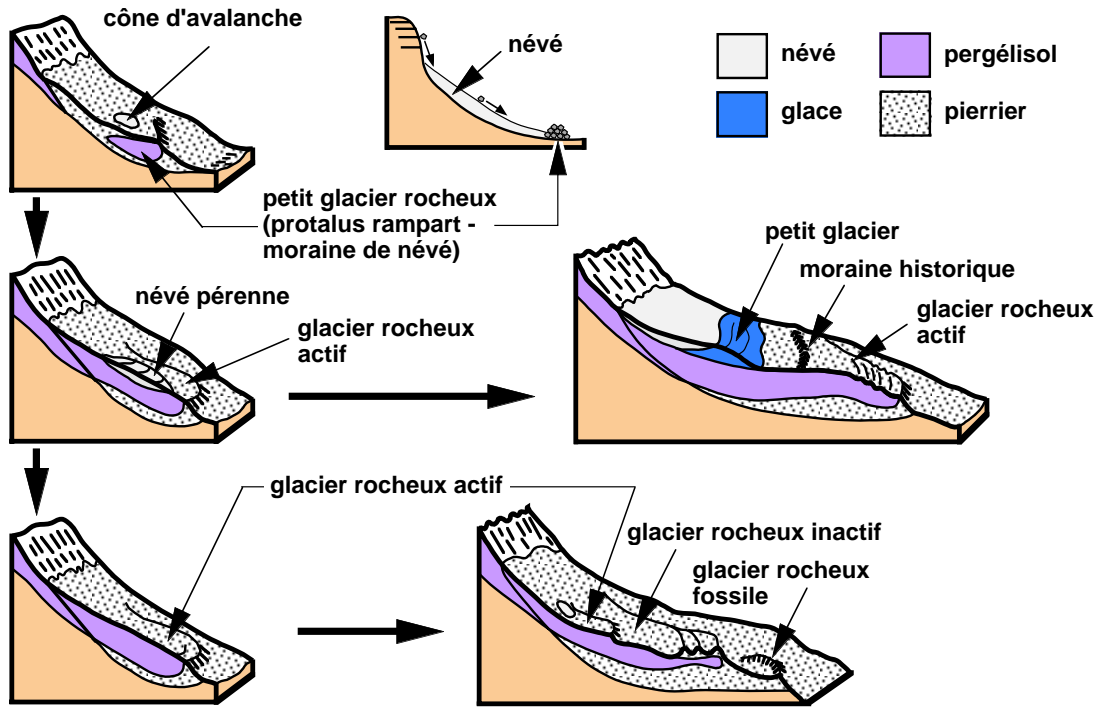
Dans les pergélisols alpins, l'épaisseur des lentilles de glace peut atteindre plusieurs mètres. Est-ce de la glace morte provenant d'un retrait glaciaire, une lentille de glace formée par cryosuccion (ségrégation) ou, par exemple, la transformation en glace d'une avalanche ? Tout est possible. Nous tenterons cependant d'y voir plus clair au paragraphe 11.6. De telles lentilles de glace sont rarement visibles dans les pergélisols alpins et ne peuvent être reconnues, le plus souvent, que par forage. Dans le Grand nord par contre, elles peuvent se trouver à la surface du sol (fig. 11-5).

Haerberli, 1983 a proposé un mode de formation des glaciers rocheux de talus décrit par la figure 11-6. Ce mode combine celui de la figure 11-1 avec le fluage du pergélisol vers l'aval.



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

11-5 Lentille de glace dans le Grand nord canadien
(photo Matthias Jacob)



11-6 Evolution des glaciers rocheux (selon W. Haeberli, 1983, avec ajout Dysli)

11.3 Fonte des pergélisols alpins par réchauffement du climat

Comme dit au chapitre 2, depuis la fin du Petit âge glaciaire (1350 à 1850 environ), le climat des régions alpines se réchauffe. C'est un fait incontestable. Pour les Alpes et des altitudes comprises entre 1600 et 2500 m, cet accroissement de température a été d'environ 1°C de 1900 à aujourd'hui. En altitude, la conséquence première de ce réchauffement est le retrait des glaciers et la fonte des pergélisols alpins, le premier pouvant être la cause du second. Par exemple, lors d'un retrait glaciaire provoqué par le réchauffement du climat, si la température moyenne annuelle de la surface du sol n'est que légèrement supérieure à 0° C, il faudra de nombreuses années pour que les températures à l'intérieur des moraines latérales deviennent positives et que toute l'eau en excès sous forme de glace s'élimine. Des fluages, des tassements et des laves torrentielles seront le résultat de ce passage du pergélisol au gélisol, phénomène dont pâtiront, par exemple, les constructions érigées sur ces moraines ou sur le passage des laves torrentielles. La fonte de la glace contenue dans les pergélisols alpins peut être brutale. Cela provient de la chaleur latente de fusion de la glace qui doit être entièrement «consommée» pour qu'elle fonde. Cette fonte rapide peut engendrer, si la pente est forte, des laves torrentielles. Ces laves peuvent avoir des conséquences catastrophiques. Cela n'a heureusement pas été le cas à la Fouly (CH-VS) où les laves torrentielles du 10 juillet 1990 n'ont provoqué que des dégâts mineurs. Dans le cas de la Fouly, la fonte d'un pergélisol n'est que *probablement* la cause de ces laves torrentielles, probablement car il n'est pas certain que la moraine ait été pergelée (Lugon et al. 2000). La figure 11-7 montre, à gauche, la zone d'arrachement des laves (sommet à environ 2650 msM) dont le volume a été estimé à environ 30'000 m³ et, à droite, l'étalement des laves sur le plateau de la Neuvaz.



11-7 Fonte pergélisol moraine du Dolent

Gauche : niche arrachement (photo J-D Rouiller), Droite : bas laves torrentielles (Photo Dysli)

11.4 Fonte des pergélisols alpins sous les constructions

Les constructions établies sur les pergélisols alpins (refuges destinés à la pratique de l'alpinisme, gares supérieures d'installations de remontée mécanique, pylônes de ces installations, ouvrages d'aménagements hydroélectriques comme des prises d'eau, etc.) apportent de la chaleur sur leur fondation. Elle peut provenir d'un chauffage intérieur ou de la radiation solaire reçue par ces constructions. Cette chaleur fait fondre le pergélisol, ce qui peut avoir des conséquences néfastes pour leur pérennité. Des solutions techniques adaptées aux pergélisols de montagne doivent donc être trouvées si l'on veut éviter des désordres dans ces constructions.

Dans les Alpes, pour des altitudes comprises approximativement entre 2400 et 3000 m, il n'est pas facile de savoir, lors du projet de la construction, si l'on est en présence ou pas d'un pergélisol. Bien des constructeurs s'en sont seulement rendu compte lors de l'exécution des travaux et ont dû adapter leurs projets en conséquence, ce qui n'a pas été sans mal pour le devis de construction! Dans le doute, il vaut mieux admettre que l'on est en présence d'un pergélisol que de devoir adapter au dernier moment sa construction ou pâtir pendant toute sa durée d'exploitation de dégâts provoqués par la lente fonte des lentilles de glace sous l'action de la chaleur produite par ces constructions ou par le réchauffement du climat.

Les refuges de haute montagne et les constructions de même type devraient avoir une structure (fondations et murs) très rigide, en béton armé, permettant d'atténuer les effets des tassements différentiels dus à la fonte du pergélisol. Une telle structure est aussi plus résistante à l'avalanche que celle, encore classique, dont les murs sont édifiés en pierres de taille jointoyées. Pour des constructions légères, en général préfabriquées en plaine, des solutions inspirées de celles pratiquées dans le Grand Nord sont recommandées (voir Dysli 1991).

11.5 Applications des résultats de la recherche aux pergélisols alpins

Le but principal de cette recherche expérimentale n'est pas son application aux pergélisols alpins. Il est surtout dévolu aux infrastructures routières et ferroviaires. Cependant, ses résultats ainsi que tous ceux obtenus précédemment par les nombreuses recherches sur l'effet du gel et du dégel, surtout dans le domaine routier (voir en particulier Dysli 1991), peuvent avantageusement être utilisés pour comprendre un peu mieux ce qui se passe dans les pergélisols alpins.

Ils peuvent notamment :

- tenter d'expliquer le rôle de la cryo-succion dans la formation des lentilles de glace des pergélisols alpins et
- contribuer à la modélisation numérique de la fonte des pergélisols alpins par le réchauffement du climat.

11.6 Cryo-succion

11.6.1 Mésestimation de son rôle

Un pergélisol alpin peut croître par cryo-succion de son fond, limité par une isotherme 0° C, vers le haut comme de sa surface vers le bas, cependant dans une moindre mesure. Ce phénomène n'est pas très connu et n'a pas encore fait l'objet d'études importantes. Il en est de même pour les pergélisols des régions arctiques ou sub-arctiques, notamment pour la formation des très épaisses lentilles de glace que l'on rencontre dans leur partie supérieure (fig. 11-5). Des auteurs connus comme French (1996) pensent que ces lentilles pourraient être formées par ségrégation de l'eau interstitielle mais ne disent pas comment. D'autres, comme la plupart des Russes, admettent que ces lentilles sont des restes des dernières glaciations. Nous avons cependant trouvé une publication (Fowler & Noon 1997) qui démontre qu'elles sont formées par le même phénomène qui produit les lentilles dans les gélisols (cryo-succion) et qui est bien connu depuis les publications de Taber (1929) et Beskow (1935).

Les éléments de glace massifs contenus dans les pergélisols peuvent cependant avoir d'autres origines comme les anciennes calottes glaciaires du Pléistocène (fin vers 11'000 ans BP).

11.6.2 Revue de quelques résultats de sondages et excavations

Pour tenter d'expliquer le rôle de la cryo-succion dans la formation des lentilles de glace des pergélisols alpins et de leurs glaciers rocheux, nous allons utiliser, entre autres, les résultats de forages exécutés dans ces derniers. Il s'agit des forages exécutés :

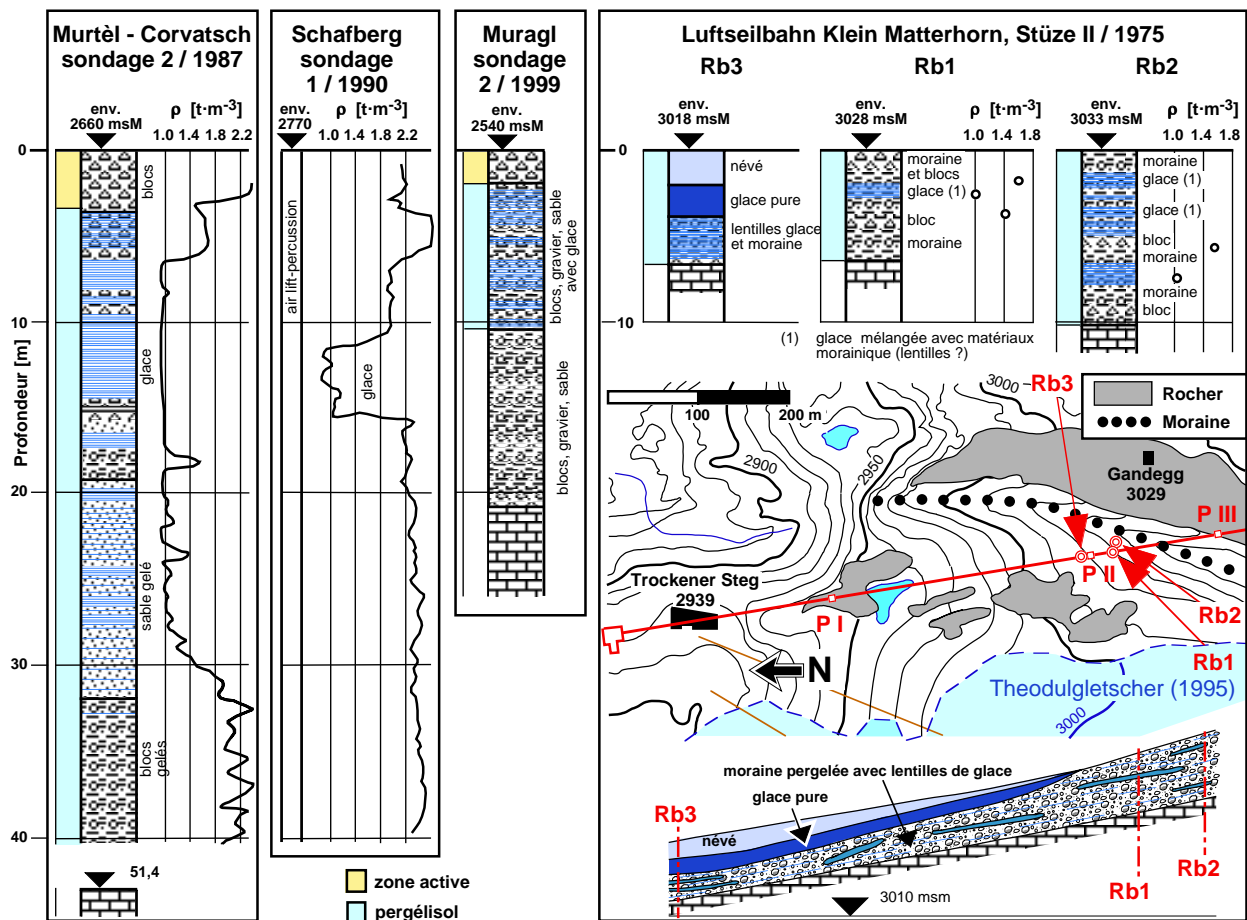
- dans les glaciers rocheux de Gruben au-dessus de Randa (CH-VS), (Barsch et al., 1979) – figure 11-13,
- dans le glacier rocheux de Murtèl-Corvatsch (CH-GR), (entre autres : Haeberli 1995) – figures 11-8, 11-10 et 11-13,
- dans le glacier rocheux de Muragl (CH-GR), (Arenson et al., 2002) – figures 11-8, 11-10 et 11-13,
- dans le glacier rocheux du Schafberg près de Pontresina (CH-GR), (Vonder Mühl, 1992) – figure 11-8
- et dans la moraine pergelée pénétrée par la fondation du pylône no II du téléphérique du Petit Cervin (CH-VS), (documents non publiés aimablement transmis par GEOTEST) – figures 11-8, 11-9 et 11-11.

Nous allons aussi utiliser le modèle graphique présenté au chapitre 2 et mis en oeuvre au chapitre 3 pour le limon utilisé pour les essais de cette recherche. Ce modèle permet d'expliquer ce qui se passe lors du gel saisonnier (gélisol) de divers types de sols, mais aussi comment se forme un pergélisol alpin.

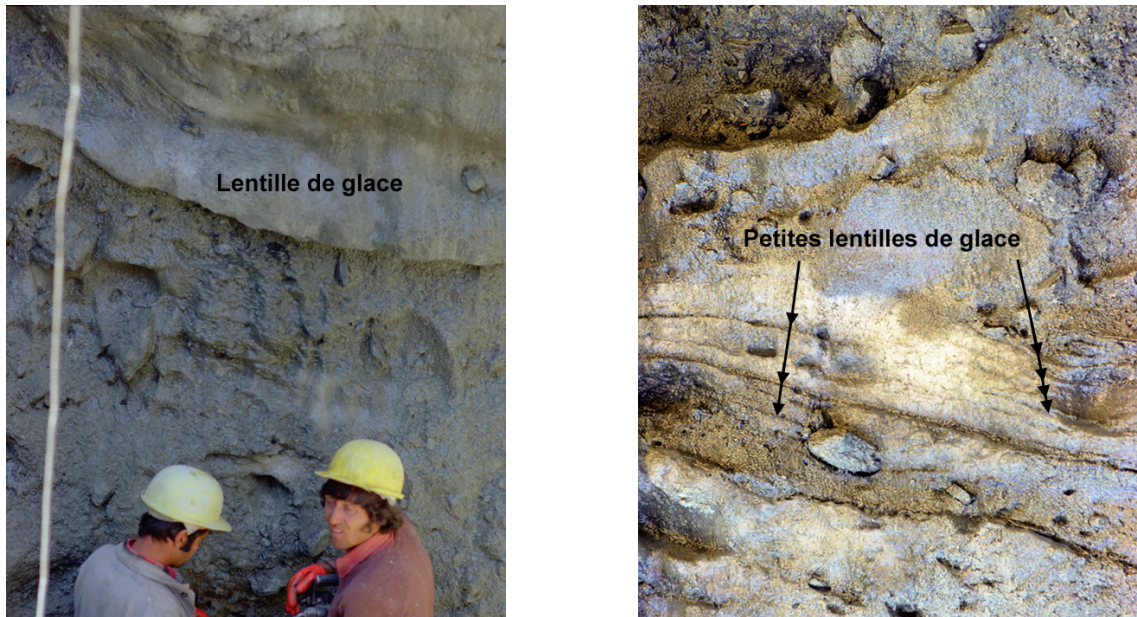
Les résultats des forages dans le glacier rocheux de Gruben, très bien documenté par Barsch et al. (1979), ont permis d'établir, pour les matériaux prélevés, des courbes granulométriques et un classement selon des critères géotechniques (fig. 11-13). Les forages dans le glacier rocheux de Murtèl-Corvatsch sont bien connus et ont déjà été souvent exploités. Le forage no 2, qui est reproduit sur la figure 11-8, a notamment montré des lentilles de glace de forte épaisseur et un

écoulement d'eau au contact avec le rocher à 51 m de profondeur. Il sera utilisé plus loin pour expliquer le phénomène de la cryo-suction dans les pergélisols alpins. Une granulométrie de ce forage ainsi que le classement du sol selon des critères géotechniques sont montrés sur la figure 11-13. Les températures en fonction de la profondeur sont données sur les figures 11-10 et 11-15.

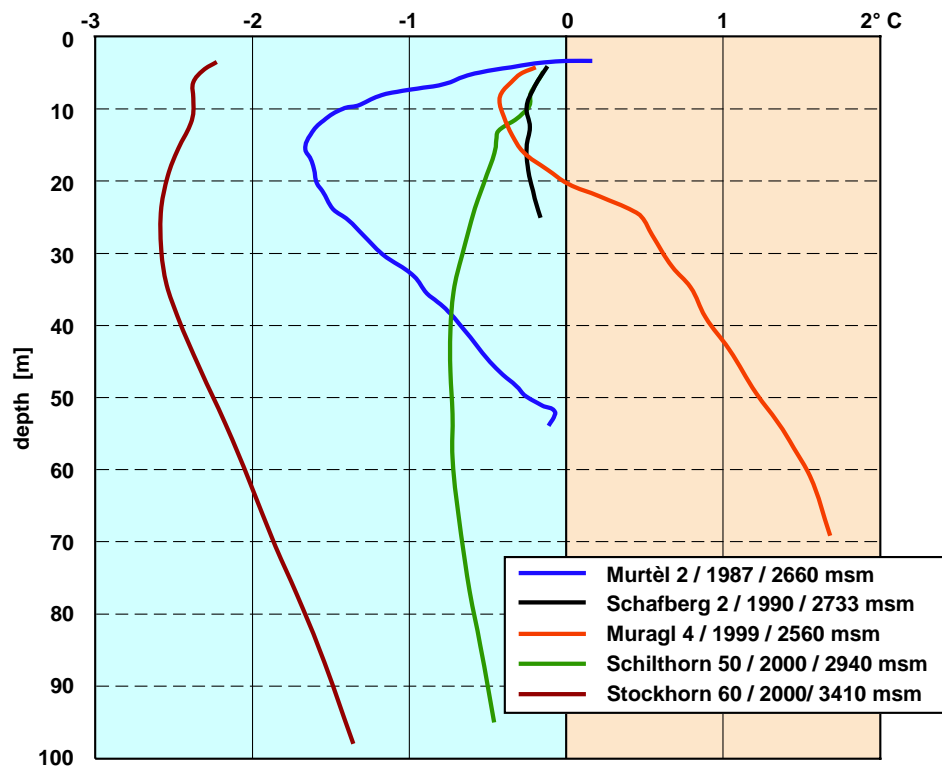
Les forages dans le glacier rocheux de Muragl, dont le no 2 est montré sur la figure 11-8, concernent un pergélisol de basse altitude dont les températures sont juste négatives (fig. 11-10). Il contient aussi des lentilles de glace de bonnes épaisseurs. Une granulométrie de ce forage ainsi que le classement de ce sol selon des critères géotechniques sont montrés sur la figure 11-13. Ils sont proches de ceux du glacier rocheux de Murtèl-Corvatsch. Pour ce forage, les températures en fonction de la profondeur sont données sur la figure 11-10. Comme pour le forage no 2 de Murtèl-Corvatsch, une isotherme 0° C est présente sous le pergélisol.



11-8 Loggings de 6 forages dans des pergélisols alpins



11-9 Photographies de la moraine pergelée du pylone no II du téléphérique du Petit Cervin



11-10 Températures de quelques pergélisols alpins

Adapté de Vonder Mühl et al. (2004)

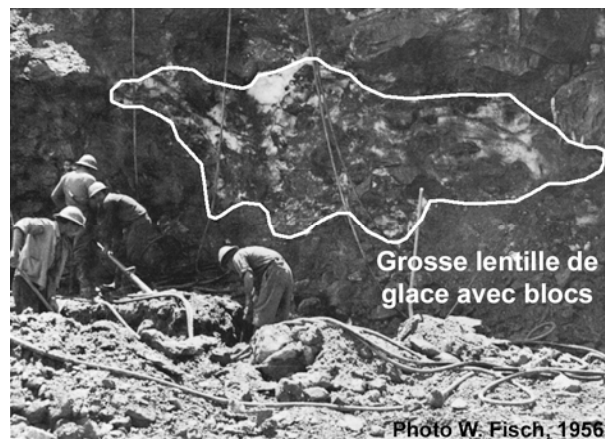
Les forages réalisés dans la région du pylône no II du téléphérique du Petit Cervin sont très intéressants. Ils le sont, tout d'abord, parce qu'ils n'ont jamais été publiés en détail (pour description générale voir : Rieder, Keusen & Amiguet (1981) ou Keusen & Haerberli (1983)). En outre, il concerne une moraine (glacier du Théodule) pergelée dont la constitution est moins connue que celle des glaciers rocheux. On trouve, sous le pylône no II, une couche de glace pure

puis de la moraine contenant de nombreuses lentilles de glace qui sont décrites par les loggings des forages, la coupe de la figure 11-8 et les photographies de la figure 11-9 prises pendant l'excavation de la fouille du pylône. Les résultats des essais en laboratoire réalisés sur les échantillons prélevés dans ces forages font l'objet du tableau 11-11. Les deux photographies montrent clairement des lentilles de glace, celle de gauche, une lentille de quelque 30 cm d'épaisseur et celle de droite, des lentilles de faible épaisseur réparties dans la moraine. À propos de ces lentilles, il est important de comparer la grosse lentille de 30 cm d'épaisseur (photo de gauche) dont la surface horizontale paraît assez étendue, avec les petites lentilles (photo de droite) qui n'ont pas de grandes continuités horizontales.

La comparaison des caractéristiques géotechniques obtenues pour la moraine du Petit Cervin avec celles de moraines non gelées est pleine d'enseignement. En comparant les degrés de saturation sans et avec glace, on voit facilement qu'un tel pergélisol est supersaturé ($S_r > 100\%$). Cette supersaturation sera traitée plus en détail au paragraphe 11.9.

11-11 Caractéristiques des échantillons prélevés dans les forages du téléphérique du Petit Cervin

Sondage	Rb 1	Rb 1	Rb 1	Rb 2	Rb 2	Moraines non gelées
Prof. échant. [m]	1,80-2,00	3,45-3,75	2,45-2,60	5,70-5,85	7,40-7,85	
w [% massique]	47	80	545	56	180	5 – 14
ρ [$t \cdot m^{-3}$] échant. gelé	1,59	1,43	1,03	1,56	1,19	2,10 – 2,30
ρ_d [$t \cdot m^{-3}$]	1,08	0,79	0,16	1,00	0,42	1,90 – 2,10
S_r (eau sans glace) [%]	84	89	93	89	90	70 – 100
S_r (eau et glace) [%]	178	188	196	187	189	–
e [-]	1,5	9,8	15,9	1,7	4,41	0,20 – 0,60

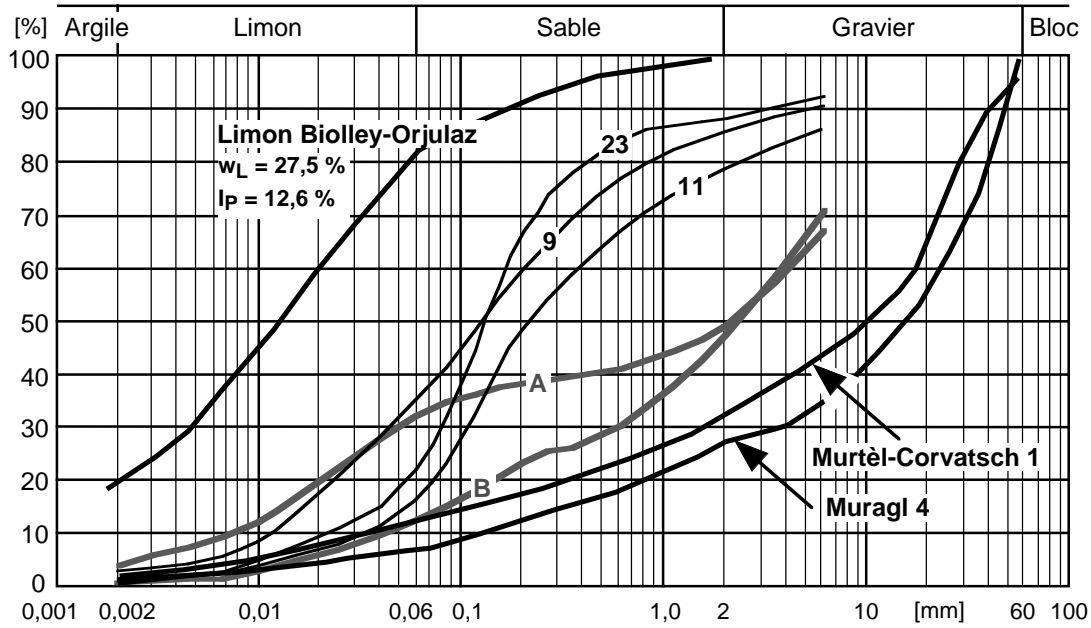


11-12 Lentille de glace dans la moraine de Prafleuri
Fisch, Fish & Haeberli (1978)

Pour le forage exécuté dans le pergélisol du Schafberg (fig. 11-8) seule la courbe donnant la masse volumique en fonction de la profondeur est donnée car la technique utilisée n'a pas permis d'extraire des carottes. Cette courbe permet de localiser une importante lentille de glace entre 11,5 et 15,5 mètres de profondeur.

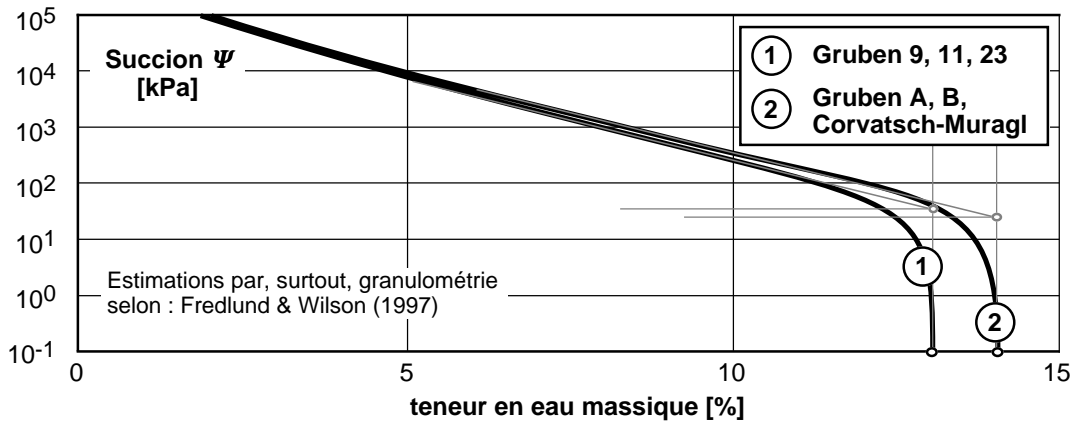
Lors de la construction du barrage de la Grande Dixence (CH-VS) de 1952 à 1961, les matériaux pour la fabrication du béton ont été en partie prélevés dans le front latéral d'un glacier rocheux de la combe de Prafleuri qui contenait d'importantes lentilles de glace. La photographie de la figure 11-12 montre une de ces lentilles reconnue lors des excavations.

La figure 11-10 montre la variation des températures en fonction de la profondeur pour quelques pergélisols alpins. Comme on pourrait s'en douter, l'altitude joue un rôle important. L'exposition du glacier rocheux aux radiations solaires joue aussi un rôle important dans ces courbes de variation de la température en fonction de la profondeur (§ 2.5.3). La courbe du forage no 2 du glacier rocheux de Murtèl-Corvatsch peut sembler un peu anormale. Cela provient d'un écoulement d'eau sur le bedrock qui limite la profondeur de la zone pergelée.



Gruben	1979	9, 11, 23 : 2 à 3 m	(Barsch et al, 1979)
		A, B : surface	
Muragl 4	1999	15 m	(Arenson et al, 2002)
Murtèl-Corvatsch 1	2000	21 m	(Arenson et al, 2002)

Degré de gélivité selon SN 670140b et classification USCS selon SN 670008a						
Gruben	9	G3	SC	Muragl 4	G2-G3	GP-GC
	11, 23	G2	SM	Murtèl-Corvatsch 1	G2-G3	GP-GC
	A	G3-G4	GC	Biolley-Orjulaz	G3-G4	CL
	B	G2-G3	GW-GC			
G1 = négligeable		G2 = faible		G3 = moyen		G4 = fort



11-13 Granulométries et courbes caractéristiques sol-eau de deux pergélisols alpins

11.6.3 Démonstration de son rôle

11.6.3.1 Modèle graphique

Le modèle graphique de la figure 11-14 va maintenant permettre de démontrer que des lentilles de glace à l'intérieur des pergélisols alpins peuvent être formées par cryo-succion. Le graphique du haut de la figure donne les relations entre la température T et la teneur en eau non gelée w_u de quelques sols caractéristiques. La courbe qui est la plus plausible pour la démonstration qui va utiliser le forage no 2 du glacier rocheux de Murtèl-Corvatsch est celle du limon argileux CL. Les relations établies pour le limon de Biolley-Orjulaz, qui a été utilisé pour les essais en laboratoire de cette recherche, figurent sur ce graphique. Sur ce dernier, nous avons aussi ajouté la relation $w_u = f(T)$ du forage exécuté au Schilthorn (CH-BE) dans le cadre du projet PACE (entre autres : Harris (2001) et Harris et al. (2001)), déterminée par l'étude de Hauck (2002). Ce dernier a établi des corrélations entre la résistivité mesurée in situ et la teneur en eau non gelée, au moyen de la relation :

$$S_{ru} = \exp\left(\frac{b(T_f - T)}{1 - n}\right) \quad \text{ou} \quad w_u = \exp\left(\frac{b(T_f - T)}{1 - n} + \ln(w_{sat})\right) \quad (11-1)$$

avec : S_{ru} = degré de saturation en eau non gelée [-]
 T_f = température du point de congélation de l'eau [°C ou K]
 T = température du pergélisol [°C ou K]
 b, n = constantes
 w_u = teneur en eau massique non gelée [-]
 w_{sat} = teneur en eau du sol saturé [-].

La courbe montrée sur le graphique du haut de la figure 11-14 (Schilthorn) est une moyenne entre la relation établie pour des échantillons saturés ($b = 0,73 \text{ K}^{-1}$) et celle établie pour des échantillons non saturés ($b = 0,27 \text{ K}^{-1}$). Nous avons en outre utilisé, pour cette moyenne, les relations avec $n = 2$ qui donnaient les résultats les plus plausibles. Cette courbe paraît, à première vue, pas trop fautive ! Pour la démonstration, seule la partie supérieure du graphique sera utilisée. La présentation des relations $w_u = f(T)$ jusqu'à -10°C nous a paru cependant intéressante.

Le graphique du milieu de la figure 11-14 donne les relations entre la succion capillaire et la teneur en eau non gelée (SWCC) pour quelques sols caractéristiques. Comme pour le graphique du haut, les relations de quelques sols caractéristiques sont données : celles des trois sols CH, CL et SM, celles du limon de Biolley-Orjullaz ainsi que celle du sol du glacier rocheux de Murtèl-Corvatsch que nous avons pu établir grâce aux granulométries (fig. 11-13) et les équations de Fredlund et Wilson (1997).

Le graphique du bas de la figure 11-14 donne les relations entre la perméabilité et la teneur en eau non gelée pour les trois sols CH, CL et SM et le limon de Biolley-Orjullaz.

Procédons maintenant à la démonstration qui utilisera les relations du sol CL de la figure 11-14 et le glacier rocheux de Murtèl-Corvatsch représenté par la figure 11-15. Sur cette figure, on a dessiné les variations en fonction de la profondeur de plusieurs paramètres : les températures mesurées à différentes périodes, la masse volumique qui décrit parfaitement les zones de lentilles

de glace, les matériaux du glacier rocheux *ainsi que la pression interstitielle résultant du modèle graphique.*

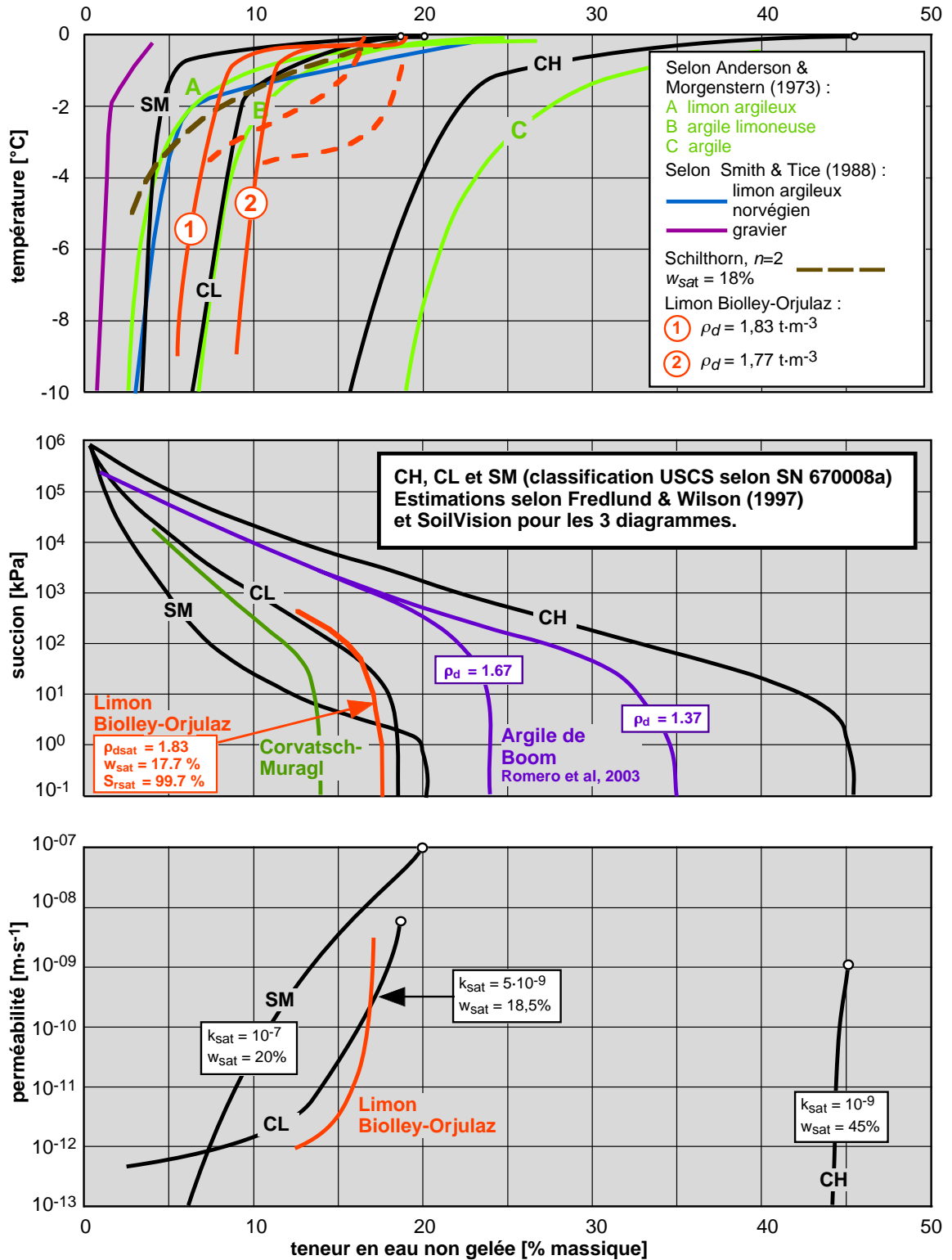
11.6.3.2 Partie inférieure du glacier rocheux de Murtèl-Corvatsch

Dans la partie inférieure du glacier rocheux de la figure 11-15, la géométrie du gel et de la formation des lentilles de glace est parfaitement identique à celle des gélisols. La zone gelée se trouve au-dessus de la frange de gel (isotherme 0°C) et la succion capillaire engendrée par le gel de l'eau interstitielle (eau transformée en glace avec forte diminution de la teneur en eau non gelée : graphique du centre de la figure 11-14) provoque l'aspiration vers le haut de l'eau contenue dans le sol non gelé au-dessous de l'isotherme 0°C . Le phénomène est ainsi exactement le même que dans un gélisol et *les lentilles de glace ne peuvent se former que par la cryo-succion* car, notamment, la perméabilité des sols gelés au-dessus est beaucoup trop élevée pour permettre un écoulement de l'eau par gravité (10^{-11} à $10^{-12}\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), ceci relativement à celle des sols sous la frange de gel (env. $10^{-8}\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ si l'on considère que le sol à cet endroit est le CL de la figure 11-14).

Considérons, sur le graphique du haut de la figure 11-14 un point juste au-dessus du front de gel où la température est de $-0,5^{\circ}\text{C}$ (température choisie un peu arbitrairement car elle varie fortement dans cette zone). À cette température correspond une teneur en eau non gelée de quelque 14% massique. La succion engendrée par cette teneur en eau est alors de quelque 150 kPa (graphique du milieu). Cette succion va aspirer vers le haut l'eau interstitielle contenue dans les blocs au-dessus du bedrock. Cependant, le coefficient de perméabilité (bas du graphique) chute parallèlement de quelque $5\cdot 10^{-9}$ (sol non gelé) à $10^{-11}\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. C'est l'*antinomie* du phénomène du gel des sols et de la formation de lentilles de glace : une augmentation de la succion est toujours contrecarrée par une diminution de la perméabilité. Cependant, au-dessous du front de gel et pour les sols constituant la majorité des pergélisols alpins, cette diminution ne va restreindre qu'un peu le débit de l'eau aspirée, du bas vers le haut. Ce type de sol est dit gélif. Le degré de gélivité de quelques sols provenant de pergélisols alpins suisses est donné sur la figure 11-13. Elle montre que tous les sols provenant de ces pergélisols ont un degré de gélivité moyen à fort, ceci à l'exception d'un seul dont le degré de gélivité est faible. Dans un pergélisol alpin, il est clair que plus le sol est gélif, plus la vitesse de formation ou d'accroissement des lentilles de glace sera élevée.

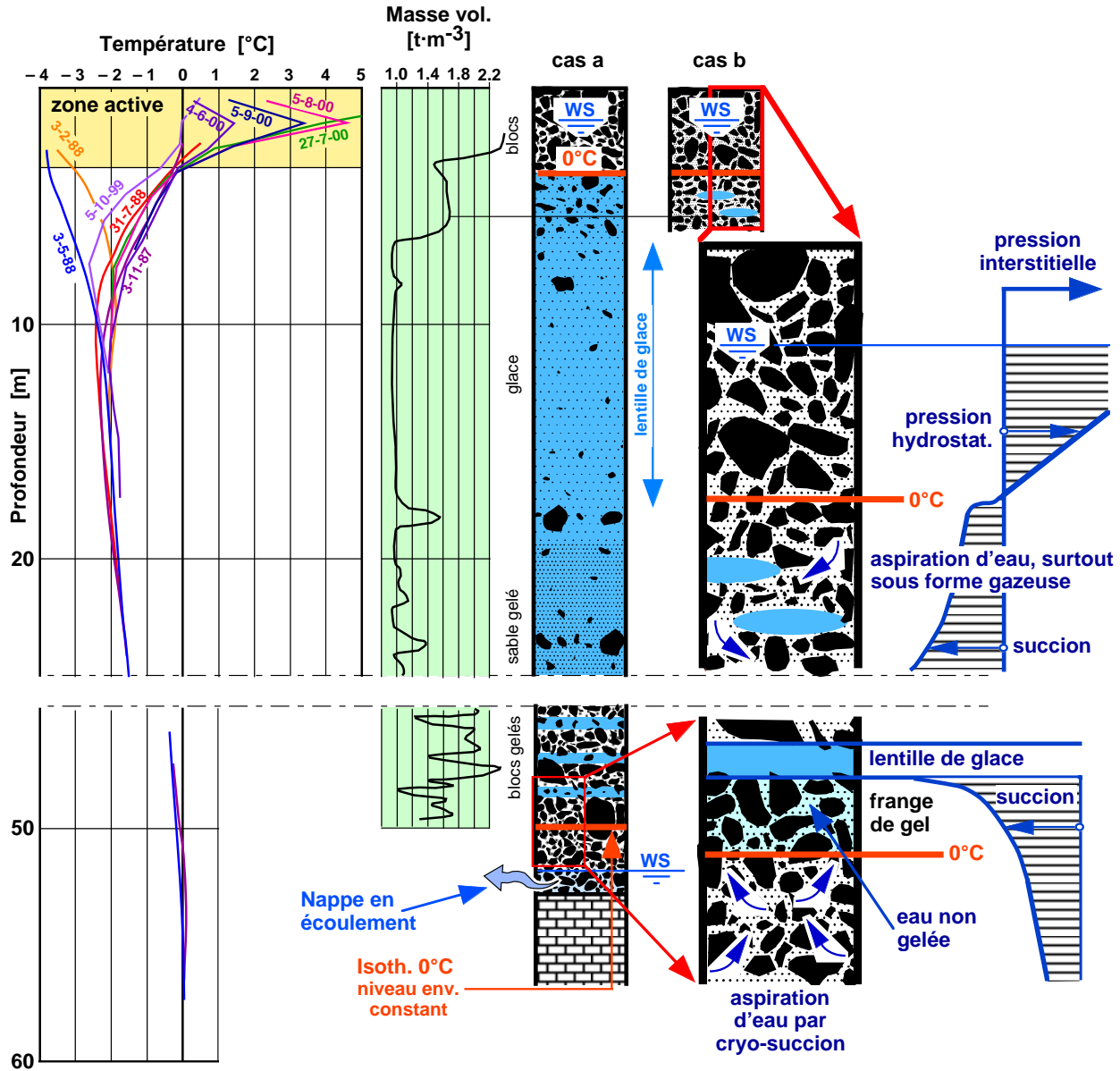
Avec une isotherme 0°C présente dans la partie inférieure du pergélisol et dont l'altitude est relativement stable, les lentilles se forment au-dessus pendant toute l'année et provoquent un gonflement vers le haut comme, pendant l'hiver, sous une route fondée sur des sols gélifs. Cependant est-ce que la contrainte verticale n'est pas supérieure à la pression limite de gonflement (voir chapitre 2) ? Sous le glacier rocheux de Murtèl-Corvatsch la contrainte verticale est de quelque 750 kPa (sondage no 2, $\gamma_{\text{moyen}} = 15\text{ kN}\cdot\text{m}^{-3}$, $h = 50\text{ m}$) alors que la pression limite de gonflement, déterminée par la relation approximative de Radd & Oertle (1973) $p_{\text{glim}} = -1140\cdot T$, avec la température T donnée en $^{\circ}\text{C}$, est d'environ 1100 kPa pour une température moyenne multi-annuelle du pergélisol à cet endroit d'environ -1°C . La pression limite de gonflement n'est pas dépassée, mais de peu. Sous des glaciers rocheux ou, d'une

manière générale, des pergélisols d'une plus grande épaisseur que celui de Murtèl-Corvatsch, la pression limite de gonflement peut annuler la croissance des lentilles de glace. Cette croissance se produit alors plus haut où la température inférieure détermine une pression limite plus faible que la contrainte verticale.



11-14 Modèle graphique du gel appliqué aux pergélisols

Traité (1) et (2) : voir chapitre 3



11-15 Formation des lentilles de glace par cryo-succion

11.6.3.3 Partie supérieure du glacier rocheux de Murtèl-Corvatsch

Dans la partie supérieure de ce glacier rocheux pergélé, vers sa surface, pendant l'été et l'automne, le front de gel se stabilise au niveau inférieur de la couche active. C'est à ce moment que les lentilles de glace du sommet du pergélisol peuvent croître ou se former. Deux cas sont à considérer : la croissance de lentilles d'assez grande étendue horizontale et la croissance ou le développement de lentilles horizontalement peu étendues.

Dans le premier cas (cas « a » de la figure 11-15), à savoir la croissance de lentilles d'assez grande étendue horizontale (par exemple, photo de gauche de la figure 11-9), l'eau de fonte du névé et l'eau de pluie sont confinées au-dessus de la lentille qui est imperméable et gèle au contact de la face supérieure de cette dernière dès que l'isotherme 0° C se déplace vers le haut. Ce cas est le résultat d'un phénomène très simple qui ne nécessite pas de développement particulier. Il se combine au mode de formation décrit par la figure 11-1. Ces lentilles de grande

surface horizontale et, aussi, de grande épaisseur, ont été par exemple trouvées dans le forage no 1 du pergélisol du Schalberg et dans le forage no 2 du glacier rocheux de Murtèl-Corvatsch (fig. 11-8).

Dans le *deuxième cas* (cas « b » de la figure 11-15), dont un exemple fait l'objet de la photo de droite de la figure 11-9, il n'y a pas de continuité horizontale des lentilles et de l'eau peut circuler vers le bas autour de ces dernières. Cette cryo-succion se produit cette fois avec une géométrie inverse de celle du bas du glacier rocheux. Le sol entre ces lentilles non continues est soumis à la succion capillaire selon les graphiques du haut et du milieu de la figure 11-14. L'eau de fonte du névé ou de pluie est alors aspirée vers le bas, probablement en partie sous la forme de vapeur d'eau, et peut contribuer à la croissance de petites lentilles existantes ou à la formation de nouvelles. Cependant, au-dessous de la zone active, les pentes des relations donnant la température en fonction de la profondeur, sont généralement élevées ce qui induit, selon la figure 11-14, des perméabilités très faibles, donc des débits d'eau non gelée tout aussi faibles. Ce mode de formation doit ainsi être très lent. Ce cas est typique des « jeunes » glaciers rocheux en formation. Un phénomène un peu semblable se produit sous les revêtements des routes fondées sur des sols gélifs : Pendant et encore après la formation de lentilles de glace dans le sol gélif sous la fondation de la route, de l'eau, surtout sous forme de vapeur, est aspirée – cette fois du bas vers le haut – au travers de la fondation et vient former de très minces lentilles sous le revêtement de la route.

Enfin, après des hivers froids, des restes de la couverture neigeuse ou d'avalanches peuvent subsister sur le pergélisol après l'automne, et contribuer à sa formation (fig. 11-1), mais il est difficile de dire quelle est l'importance de ce phénomène par rapport à la croissance des lentilles de glace par contact avec l'eau non gelée de la zone active pendant l'été et l'automne ou par cryo-succion dans les zones du pergélisol où les lentilles ne sont pas continues.

11.6.3.4 Glacier rocheux de Muragl

Sous le glacier rocheux de Muragl (fig. 11-8), avec une isotherme 0° C inférieure à quelque 20 m de profondeur (sondage 4, fig. 11-10), on se trouve dans une situation tout à fait comparable avec, en plus, une contrainte verticale plus faible que celle du glacier rocheux de Murtèl-Corvatsch. La cryo-succion doit donc y être la cause de la formation de lentilles de glace dans la partie inférieure de ce glacier rocheux. En fait c'est le cas de tous les pergélisols alpins car, dans leur partie inférieure et à une profondeur qui est fonction de l'altitude, on trouve toujours une isotherme 0° C et, au-dessous, dans le bedrock il y a toujours des circulations d'eau, à savoir de l'eau non gelée qui est aspirée en direction de cette isotherme (voir en particulier : Dubois 1992, Maréchal 1998, Bayard 2003, Stähli et al. 2004).

11.6.3.5 Moraine du pylone no II du téléphérique du Petit Cervin

Le cas de la moraine pergélée du pylône no II du téléphérique du Petit Cervin, n'est pas traité par le modèle graphique appliqué au glacier rocheux de Murtèl-Corvatsch. Il est cependant très intéressant et va faire l'objet des lignes qui suivent.

Cette moraine a été formée par le glacier du Théodule avant de son apogée (fin du Petit âge glaciaire). Ce glacier s'est ensuite retiré et, aujourd'hui (2005), cette moraine se trouve à quelque

50 m en altitude au-dessus. Quand les lentilles de glace se sont-elles formées ? Lorsque le glacier était à son apogée, un front de gel (isotherme 0° C) ne devait exister qu'aux environs de la crête de la moraine et pendant une courte période estivale. Le pylône no II se trouve bien au-dessous de cette crête et, à cet endroit, un front de gel ne devait pas exister même pendant de très courtes périodes. Il est ainsi probable que les lentilles de glace découvertes lors des forages de reconnaissance et dans la fouille du pylône ne se soient développées qu'après la fin du Petit âge glaciaire, à savoir dès 1850 AD. Cela expliquerait leur faible épaisseur.

Quant à savoir si elles se sont développées du bas du pergélisol vers le haut, ou à sa surface, nous ne nous hasarderons pas à émettre un avis !

11.7 Brutalité de la fonte des lentilles de glace

La fonte des lentilles de glace formées, dans les sols gélifs, après un gel saisonnier ou, dans les pergélisols, après un gel continu est un phénomène brutal qui ne dure que quelques jours. Ce sont les constructeurs de routes qui l'ont tout d'abord observé, ceci il y a presque deux siècles (Mac Adam, 1816), et y ont remédié par la construction de superstructures capables de supporter cette fonte rapide ou par l'introduction de barrières de dégel, à savoir la limitation du poids des véhicules pendant la période de dégel.

Dans les pergélisols alpins, leur dégel brutal est surtout la conséquence du réchauffement du climat. Il peut conduire à la formation de laves torrentielles. Une tentative de modélisation numérique de ce phénomène fera l'objet de la section 11.8.

La brutalité de la fonte des lentilles de glace peut très bien être expliquée par l'équation de la diffusion thermique :

$$k \cdot \nabla^2 T = -q_{\text{int}} + C(T) \frac{\partial T}{\partial t} \quad (11-2)$$

avec : ∇^2 = laplacien

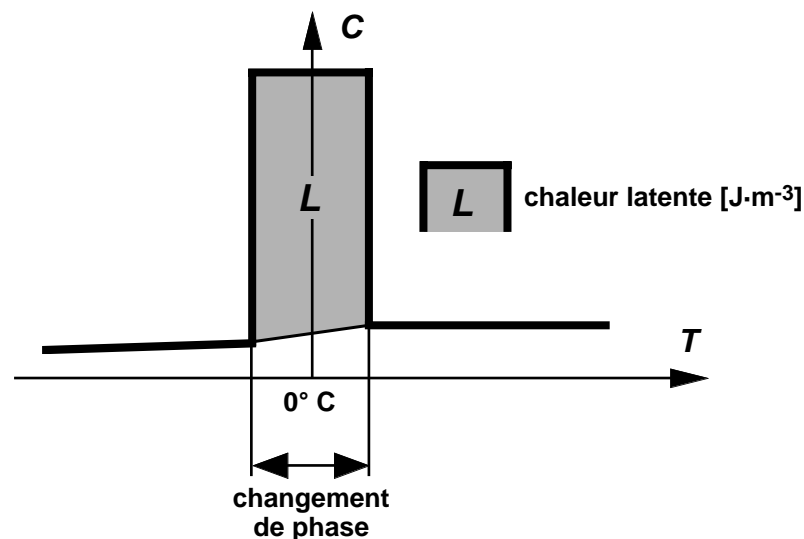
T = température [°C]

k = conductivité thermique [$\text{J}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]

q_{int} = flux thermique volumique sans effet de capacité thermique [$\text{J}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-3}$]

C = capacité thermique volumique [$\text{J}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$]

La chaleur latente de fusion de la glace se cache dans la capacité thermique C qui est fonction de la température T . Cette relation avec la température décrit l'anomalie de la capacité thermique lors du changement de phase. Elle peut schématiquement être décrite par la figure 11-16.

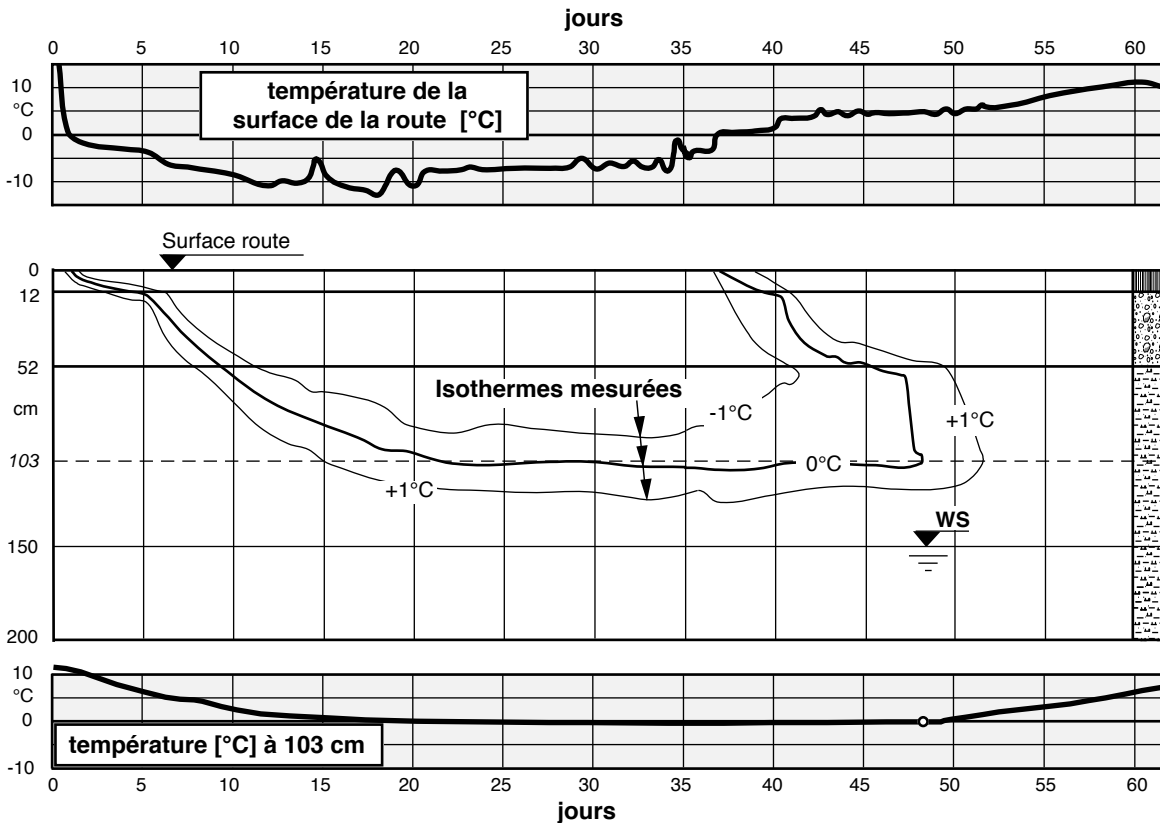


11-16 Chaleur latente

Au moment du dégel, toute l'énergie accumulée lors du gel doit être consommée avant que les lentilles de glace ne fondent.

Trois exemples de ce phénomène vont être maintenant présentés. Le premier concerne la fonte des lentilles de glace sous une route et il est tiré des essais réalisés dans la halle fosses d'Écublens (Dysli & Bourdeau, 1984) et il est illustré par la figure 11-17. Au chapitre 10, ces essais ont déjà été exploités pour tenir compte de la brutalité de la fonte des lentilles dans le domaine des voies de communication, mais ceci uniquement sur un plan pratique.

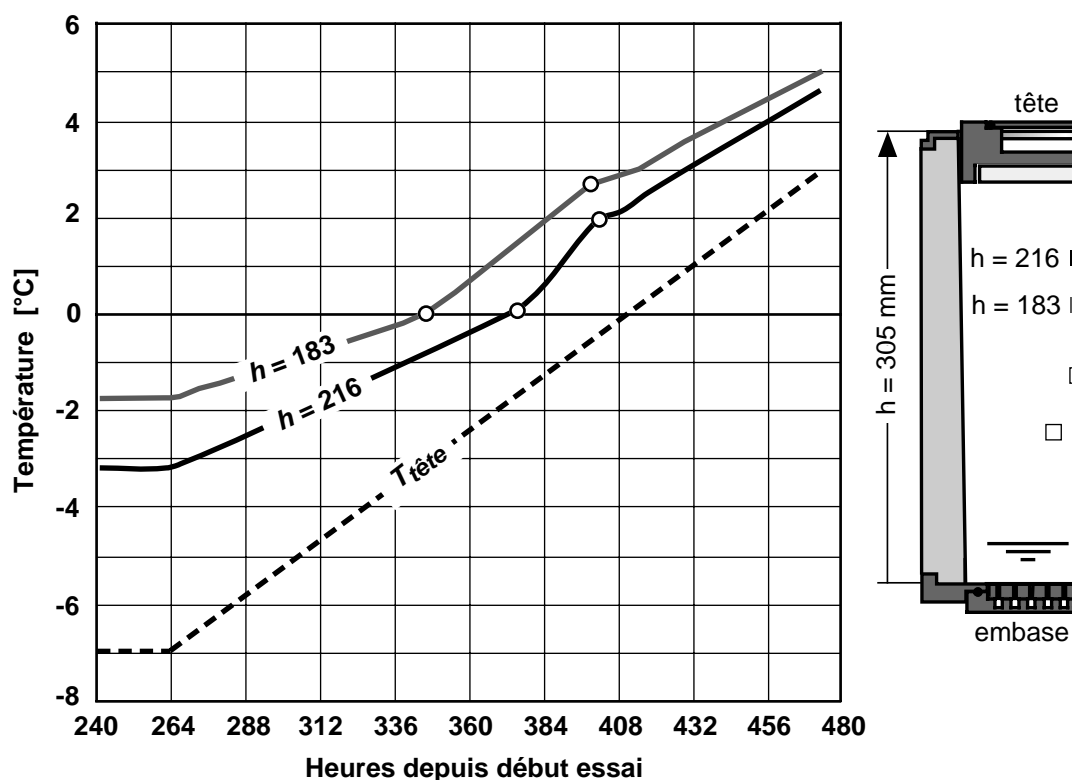
Sur la figure 11-17, on remarque très bien la fermeture brutale de l'isotherme 0° C ainsi que la cassure caractéristique de la courbe donnant les températures à 103 cm de profondeur. Avant cette dernière, la température ne varie pour ainsi dire pas.



11-17 Fonte des lentilles de glace sous une route

Le deuxième exemple est tiré des résultats de la présente recherche. Il s'agit de l'essai no 6 pendant lequel les températures ont été, entre autres, mesurées sur l'axe de l'éprouvette par des thermistances placées lors de son compactage. Ces températures en fonction du temps font l'objet de la figure 11-18. Seules celles correspondant aux thermistances placées dans la zone des lentilles de glace et à la tête de l'éprouvette sont dessinées sur la figure.

Les anomalies dues à la chaleur latente de fusion de la glace sont visibles sur la figure. Leurs limites sont signalées par de petits ronds. Comme la température de la tête de l'éprouvette variait fortement, ces anomalies sont cependant moins marquées que sur les figures 11-17 et 11-19.

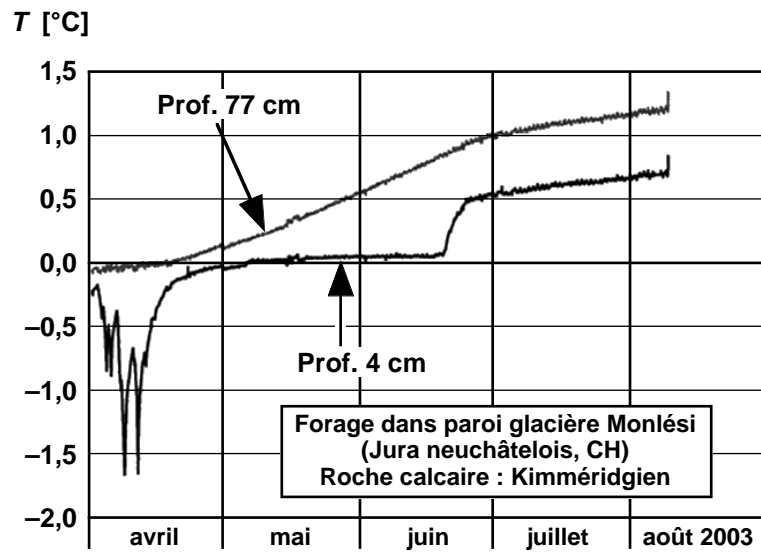


11-18 Essai no 6: Effet de la chaleur latente

Enfin, le dernier exemple est un peu particulier, mais montre cependant toujours l'importance de la chaleur latente de fusion de la glace, même si cette dernière est en quantité très faible. Il s'agit d'un des résultats des mesures réalisées par Luetscher (2005), lors de sa thèse¹, dans une glacière du Jura. Il est illustré par la figure 11-19. Ces mesures de températures ont été réalisées dans un forage exécuté approximativement perpendiculairement à une des parois verticales de la glacière de Monlési (Jura neuchâtelois, CH). La roche est un calcaire du Kimméridgien.

À 77 cm de profondeur (horizontalement), la température est quasiment toute l'année supérieure à 0°C. Sa variation en fonction du temps ne présente ainsi aucune anomalie. À 4 cm de profondeur, la température est nettement négative jusqu'à la fin du mois d'avril. Ensuite, on constate l'anomalie caractéristique de l'effet de la chaleur latente de fusion de la glace. Il est très intéressant d'observer que, même avec une teneur en eau très faible (porosité et micro-fissuration de la roche), l'énergie accumulée dans la glace lors du gel, sous forme de chaleur latente, conduit à une fonte rapide de la glace après qu'elle ait été consommée par le réchauffement de la roche encaissante.

¹ L'auteur du présent rapport a fait partie du groupe de suivi de cette thèse.



11-19 Fonte de la glace dans une roche
Adapté de Luetscher (2005)

11.8 Modélisation numérique de la fonte d'un pergélisol alpin

C'est la deuxième application des résultats de la recherche aux pergélisols alpins. C'est surtout la fermeture brutale de l'isotherme 0°C lors du dégel, fermeture confirmée par les mesures en laboratoire, qui fait l'objet de cette application.

Le processus de fonte d'un pergélisol alpin peut être modélisé comme celui de la diminution de la portance de l'infrastructure d'une voie de communication lors d'un dégel printanier (voir chap. 9). La seule différence ou presque est la durée des périodes de gel et de dégel. Dans les Alpes, le début du gel permanent peut correspondre au début du Petit âge glaciaire (1350 AC environ) et le début du dégel à la fin de cet âge (1850 AC environ), à savoir au commencement de la période de réchauffement actuel du climat.

Si dans le cas des fondations de routes nous possédons des résultats précis de mesures des températures pendant le gel et le dégel, ce n'est pas le cas pour les pergélisols alpins. De telles mesures devraient en effet couvrir plusieurs siècles et être réalisées sous la couverture neigeuse et à grande profondeur !

Il faut donc passer par les températures de l'air qui sont mesurées dans certaines stations de mesures alpines depuis 1900 environ et, avant ces premières mesures, estimées sur la base de différents critères. Il faut ensuite soit :

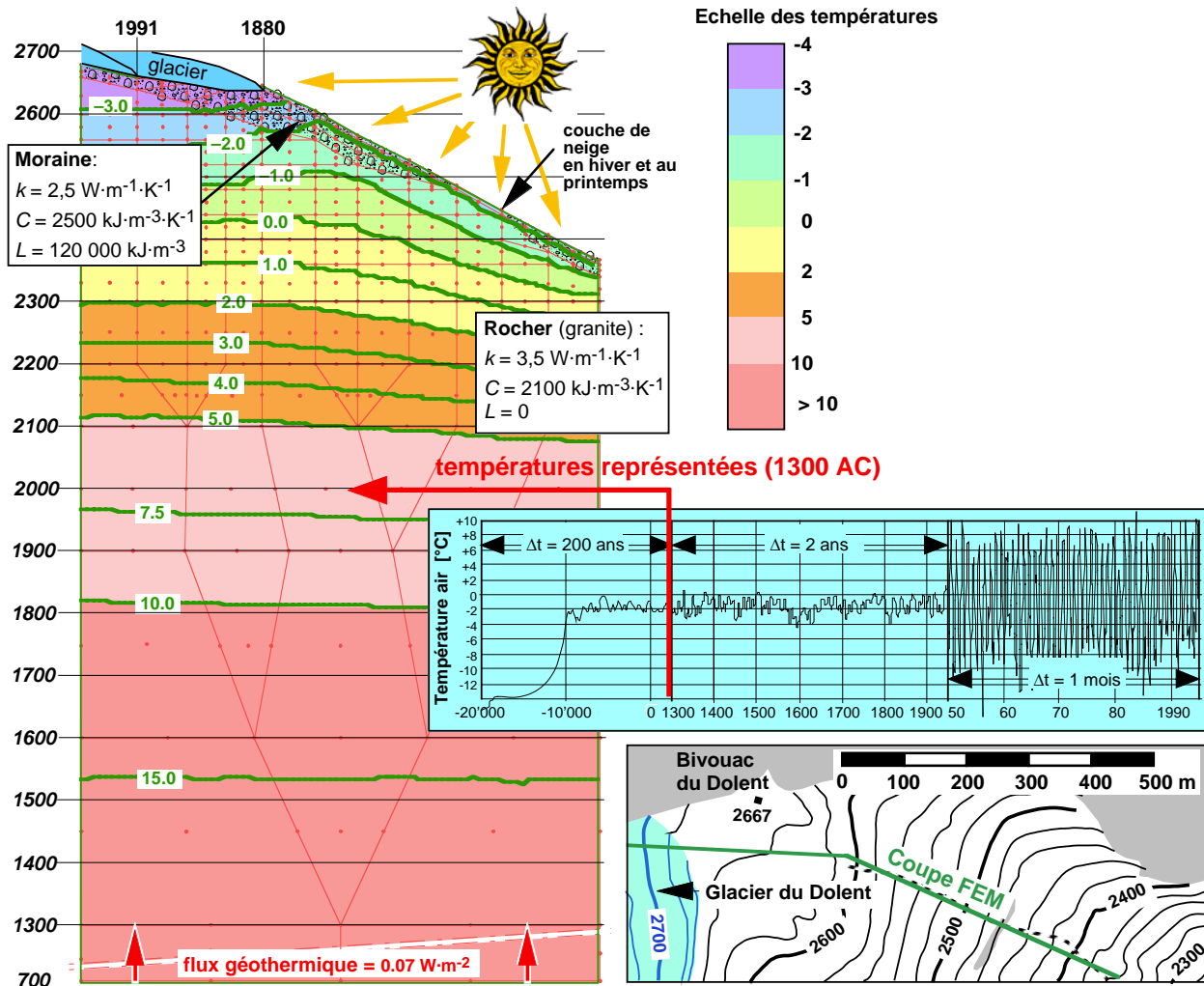
- faire différentes hypothèses pour estimer la température sous la couche de neige (BTS) ou celle sous les glaciers s'ils ont recouvert la station analysée ;
- utiliser la température de l'air et introduire l'effet de la couche neigeuse et des radiations solaires.

Ces deux solutions ont été utilisées pour l'exemple qui fait l'objet de la figure 11-20, exemple choisi à l'endroit d'où sont parties les laves torrentielles décrites par la photographie de la figure 11-7.

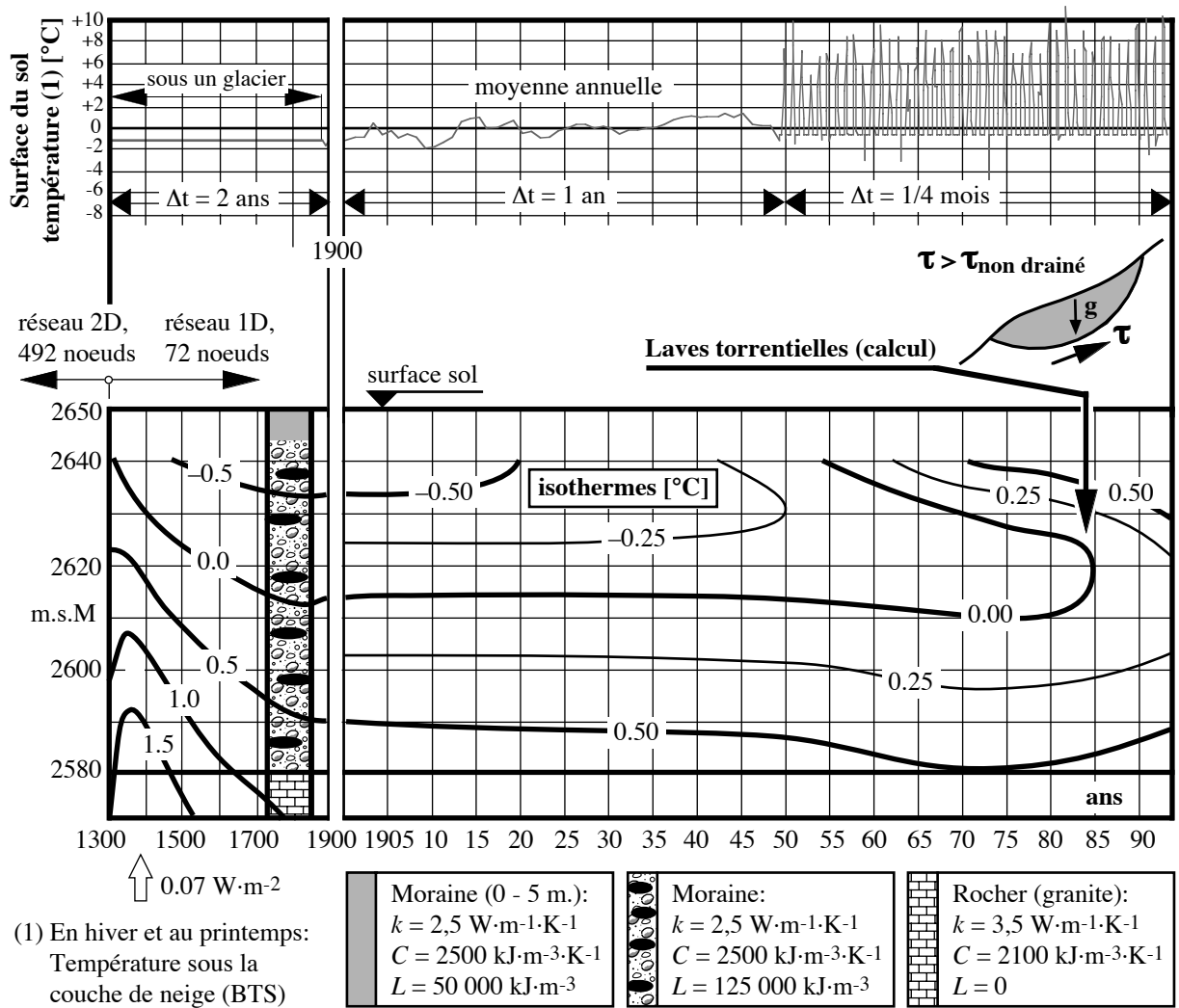
La modélisation numérique a été réalisée au moyen du même code de diffusion thermique que celui utilisé pour celle du gel et du dégel sous une chaussée (voir section 9.6) avec, en plus, la prise en compte du flux géothermique. Un résumé de son résultat fait l'objet de la figure 11-21. Sur cette figure, seule la partie supérieure du réseau d'éléments finis est représentée; il a en effet 2000 mètres de profondeur. Les premiers calculs de calage ont été réalisés à 2 dimensions (fig. 11-20) ; ensuite, un réseau à une dimension a été utilisé pour la fin de l'analyse. Toujours comme sous une chaussée, on a admis que la fermeture de l'isotherme 0 °C correspondait à la fonte rapide des lentilles de glace et que l'accroissement résultant de la teneur en eau pouvait conduire à la rupture du sol par cisaillement : contrainte de cisaillement plus grande que la résistance non drainée du sol.

Le résultat de cette modélisation numérique montre que, si l'on fait abstraction de l'échelle du temps, le phénomène est le même que sous une route et que l'on retrouve cette brutalité dans la fonte de la glace contenue dans le pergélisol alpin due à la chaleur latente de fusion de la glace contenue dans le pergélisol. La modélisation numérique montre que la rupture de la moraine et la formation des laves torrentielles devraient se dérouler en 1985. En réalité la rupture s'est

produite en 1990. Il est cependant important de signaler que cette analyse a été réalisée a posteriori et que les ajustements entrepris lors des calculs de calage sont un peu responsables de cette bonne concordance !



11-20 Données et un des résultats du calcul de calage 2D



11-21 Résultat de la simulation numérique

11.9 Quantification de la supersaturation des pergélisols

Durant la recherche, et quoique cela ne fasse pas directement partie de ses buts, la question de la quantification de la supersaturation des pergélisols s'est posée à l'occasion d'une discussion avec le Professeur W. Haeberli. L'auteur de la recherche a alors tenté de la définir comme l'est la saturation des sols non gelés. Cette petite étude a déjà fait l'objet d'une publication récente (Dysli, 2003). Seuls ses résultats principaux seront présentés ci-dessous car le détail peut être trouvé dans la publication.

Les termes « supersaturation » ou « pergélisol supersaturé » sont utilisés pour définir un pergélisol qui contient un volume de glace plus important que le volume d'eau avant le gel du sol (par exemple French (1996), p. 87, Haeberli & Vonder Mühll (1996) ou Barsch (1996)). Ces termes ne sont cependant pas numériquement définis. En mécanique des sols, le degré de saturation S_r de sols non gelés est clairement défini en se basant sur le schéma (système fermé) de gauche de la figure 11-22. Il ne peut dépasser 100% (ou 1). Dans un pergélisol (et aussi dans un gélisol soumis au gel saisonnier) le système utilisé doit être ouvert car il y a addition d'eau (de glace) par cryo-succion. On parle alors de glace de ségrégation. Un tel système est défini par la partie de droite de la figure 11-22 qui permet de définir un degré de supersaturation égal au rapport entre le volume V_{ip} de la glace et de l'eau non gelée après la formation du pergélisol, et le volume des vides V_v avant la formation du pergélisol ou du gélisol. En négligeant l'eau non gelée dont le volume est faible, le degré de supersaturation S_{rp} peut être donné par l'équation (11-3) :

$$S_{rp} = \frac{V_{ip}}{V_v} = \frac{w_{ip} \cdot \rho_s}{e \cdot \rho_i} \quad (11-3)$$

avec :

- V_{ip} = volume de la glace après la formation du pergélisol
- V_v = volume des vides avant la formation du pergélisol
- w_{ip} = teneur massique en glace après la formation du pergélisol
- ρ_s = masse volumique des particules solides
- ρ_i = masse volumique de la glace ($0,9168 \text{ t}\cdot\text{m}^{-3}$ vers 0°C)
- e = indice des vides avant la formation du pergélisol.

En fonction de la teneur en glace volumique $\theta_{ip} = V_{ip} / V_p$, l'équation (11-3) devient :

$$S_{rp} = \frac{V_{ip}}{V_v} = \frac{\theta_{ip}(1 + e_p)}{e} = \frac{\theta_{ip} \cdot \rho_s}{e(\rho_p - \theta_{ip} \cdot \rho_i)} \quad (11-4)$$

où e_p est l'indice des vides du pergélisol et ρ_p la masse volumique du sol après la formation du pergélisol, mesurée, par exemple, au moyen d'un gamma-gamma logger.

Pour les pergélisols, c'est l'équation (11-4) qui est la plus pratique.

Nous avons admis pour établir les équations (11-3) et (11-4) que le sol avant congélation avait été formé par des éboulis ou par n'importe quel autre phénomène géologique et que, seulement après sa formation, il avait été soumis au gel. En fait, la formation et le gel du sol se produisent

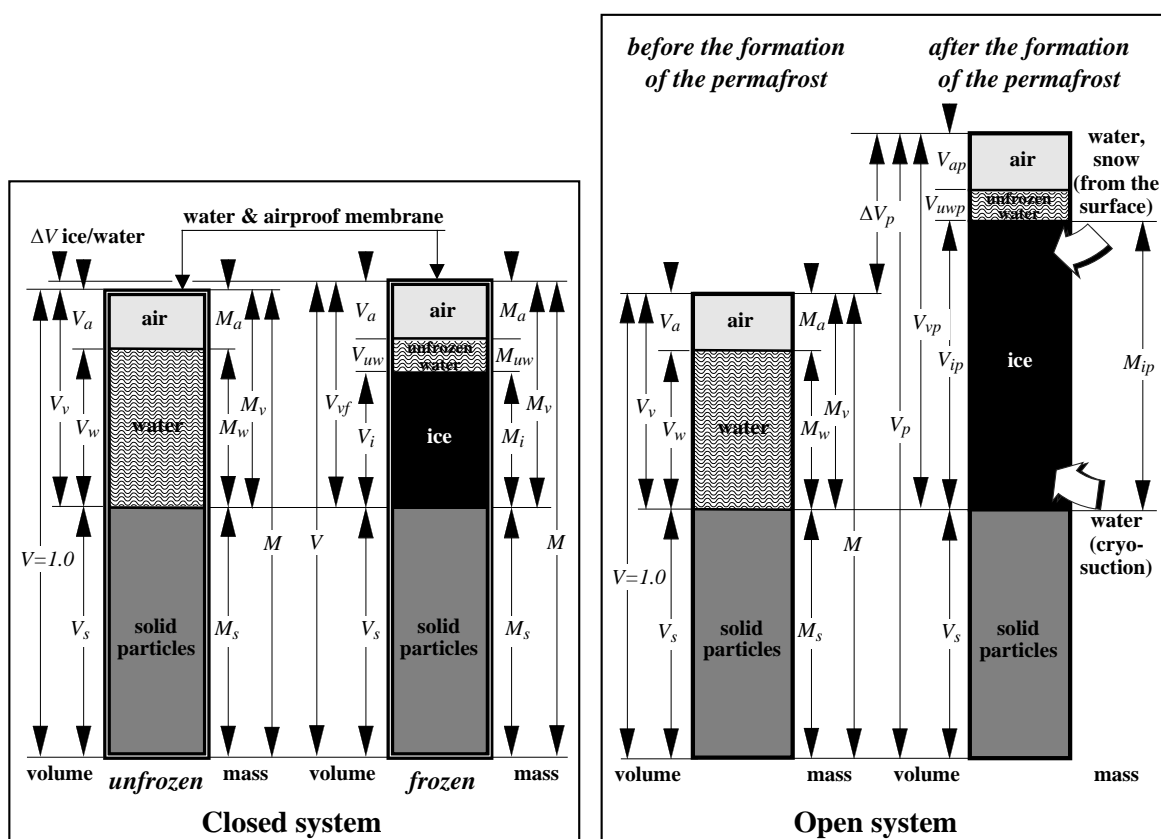
le plus souvent en même temps. Ainsi, la limite du temps défini par « avant la formation du pergélisol » et « après la formation du pergélisol » est un peu abstraite.

Pour calculer le degré de supersaturation, il faut connaître :

- La teneur en glace du pergélisol ; ce qui ne pose pas trop de problèmes car il existe plusieurs méthodes pour la déterminer in situ.
- La masse volumique de la glace ρ_i qui est connue et la masse volumique du sol ρ_s qui peut être facilement estimée (entre 2,65 et 2,80).
- L'indice de vide du sol e avant la formation du pergélisol.

C'est la détermination de cette dernière valeur qui pose problème. Cependant, il est bien connu que la plupart des sols naturels normalement consolidés (consolidés sous la gravité) ont une masse volumique proche de celle obtenue par un essai Proctor standard ($0.6 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-3}$) ρ_{dopn} (AFNOR P 94-093, ASTM D 698, BS 1377 4/3, DIN 18127 et SN 670 330). L'indice de vide avant la formation du pergélisol est donné simplement par la relation (11-5).

$$e = \frac{\rho_s - \rho_{dopn}}{\rho_{dopn}} \tag{11-5}$$



11-22 Système fermé et système ouvert

Tiré de Dysli, 2003

On peut aussi estimer l'indice de vide au moyen de valeurs trouvées dans la littérature comme dans la norme suisse SN 670 010.

L'indice de vide avant formation du pergélisol peut être corrigé pour tenir compte du mode de formation du sol avant la congélation. Par exemple, une surcharge ou une dessiccation

conduisent à une surconsolidation du sol qui détermine un indice de vide moins élevé que celui obtenu par l'essai Proctor. Cependant quel que soit le mode de détermination du degré de supersaturation d'un pergélisol choisi, son résultat sera toujours approximatif.

Appliquée à une couche entre 4 et 6 m de profondeur du glacier rocheux de Gruben (Barsch et al. 1979) et avec :

- une teneur en glace volumétrique θ_{ip} de 0,6 obtenue par un neutron-neutron logger,
- une masse volumique du sol ρ_p de $1,6 \text{ t}\cdot\text{m}^{-3}$ obtenue par un gamma-gamma logger,
- un indice de vide e avant la formation du pergélisol estimé au moyen de la norme SN 670 010b : sable limoneux SM, à savoir $e = 0,61 \pm 0,35$ ($\pm 0,35 = \text{écart type}$), $\rho_{dopn} = 2,05 \pm 0,25$ d'où $e = (2,70 - 1,90) / 1,90 = \text{environ } 0,4$,

l'équation (11-4) donne $S_{rp} = 0,6 \cdot 2,7 / 0,40(1,6 - 0,6 \cdot 0,917) = 3,86$ (386%).

Appliquée, par exemple, à la zone des grosses lentilles de glace ($h = 166$ à 180 mm), 280 heures après le début de l'essai no 8 de la présente recherche (fig. 5-61), avec :

- $\theta_{ip} = 0,36$ déterminée par le calcul de la surface relative des lentilles de glace sur les photographies prises au moyen de l'endoscope,

$$\rho_s = 2,7,$$

- $e = 0,46$ après compactage dans l'éprouvette,
- $\rho_p = \rho_0 \cdot h_0 / h_p = 2,12 \cdot 14 / 28 = 1,06$ avec ρ_0 la masse volumique après compactage de l'éprouvette, $h_0 = 14 \text{ mm}$ la hauteur initiale de la zone considérée et $h_p = 28 \text{ mm}$ la hauteur après 280 heures (on admet ainsi que le gonflement n'a eu lieu que dans la zone des grosses lentilles, ce qui n'est pas tout à fait exact),

l'équation (11-4) donne : $S_{rp} = 0,36 \cdot 2,7 / 0,46(1,06 - 0,36 \cdot 0,917) = 2,89$ (289%).

Le degré de saturation initial, S_{r0} était de 0,86.

11.10 Conclusions

Après quelques paragraphes généraux qui complètent l'état des connaissances actuelles du chapitre 2, quatre applications des résultats de la recherche aux pergélisols alpins sont présentées (sections 11.6 , 11.7, 11.8 et 11.9).

La première, consacrée au rôle de la cryo-succion dans la formation des pergélisols, est la plus importante. Elle a démontré que ce phénomène, encore peu connu dans les milieux scientifiques qui s'occupent de pergélisols, était une des causes de la formation des lentilles de glace dans les pergélisols alpins. Ce phénomène est aussi probablement la cause de la formation de ces lentilles dans n'importe quel type de pergélisols.

La deuxième application a confirmé le rôle de la chaleur latente de fusion des lentilles de glace, et de la glace en général, dans la brutalité de la fonte de cette glace. Cette brutalité peut être la cause de la ruine de fondations de voies de communication ainsi que de l'initiation de laves torrentielles dans les pergélisols alpins, laves aux effets destructeurs.

Les deux dernières applications sont moins importantes. La troisième a tenté de démontrer que des modèles numériques assez simples, utilisés notamment dans le domaine routier, permettent d'évaluer, certes très approximativement, l'époque de la fonte d'un pergélisol alpin. En pratique, une telle modélisation peut, dans une certaine mesure, aider à la prévision de ce phénomène.

La quatrième et dernière application, à savoir la détermination quantitative de la supersaturation en glace des pergélisols, est certainement utile. Elle sort cependant un peu du cadre de cette recherche. Elle a été incluse dans ce rapport, car elle a été développée durant cette recherche.

Les applications aux pergélisols alpins des résultats de la recherche qui fait l'objet de ce rapport apportent de nombreux éléments qui pourront être utiles, dans la pratique comme dans la recherche scientifique.

12

Remarques finales et conclusions

12.1 Introduction

Ce chapitre conclut une longue recherche, surtout expérimentale, sur les phénomènes du gel et du dégel des sols. Ses résultats vont être examinés, de manière critique, en fonction des objectifs fixés à son début. Ces objectifs n'ont pas tous pu être atteints complètement, ceci pour différentes raisons qui seront expliquées ci-dessous.

D'une manière générale, et grâce à un dispositif expérimental très élaboré, la recherche a permis de réaliser de nombreuses mesures de tous les paramètres décrivant les phénomènes du gel et du dégel des sols avec, pour certains, des méthodes qui n'avaient jamais été utilisées auparavant. Elles n'ont été réalisées que sur un seul limon très gélif car la grande durée de chaque essai n'a pas permis l'étude de plusieurs sols. Des limons un peu semblables se rencontrent cependant fréquemment dans tout l'Arc alpin. L'exploitation des mesures a conduit à des applications novatrices dans le domaine de la construction des superstructures des voies de communication et dans le domaine des pergélisols alpins.

12.2 Explication du phénomène physique du gel

La présente recherche avait pour objectif général l'étude fondamentale du phénomène physique du *dégel* des sols gélifs, à savoir des sols pouvant former des lentilles de glace. En effet et bien curieusement, le dégel n'a fait l'objet que de rares études alors qu'il est la cause des dégâts aux constructions les plus importants. Comment fondent les lentilles de glace et comment intervient la chaleur latente de fusion de la glace ? Pourquoi cette fonte est si brutale ? Où va l'eau de fonte de ces lentilles ? Sur le plan mécanique, comment agit cette eau sur la déformabilité du sol, en particulier qu'elle est l'importance et les conséquences de la surpression interstitielle engendrée par le trafic routier ou ferroviaire ?

L'expérimentation très élaborée a permis de mesurer avec précision et fiabilité les nombreux paramètres qui interviennent dans les phénomènes du gel et du dégel des sols fins. Le plus grand apport à la bonne connaissance de ces phénomènes a été la visualisation de la formation et de la fonte des lentilles de glace par un endoscope, visualisation à l'intérieur de l'éprouvette, ce qui n'avait jamais été fait auparavant. L'endoscope et son informatique associée ont permis de créer des animations qui montrent très bien comment se forment et comment fondent les lentilles de glace dans un sol presque naturel, avec ses hétérogénéités causées par le mode de compactage de l'éprouvette.

Toutes les mesures, et notamment celles réalisées au moyen de l'endoscope, ont permis de :

- montrer que toute l'eau de fonte des lentilles est réaspirée vers la zone où elle avait été prélevée lors du gel,
- évaluer les modules de déformations résilients au dégel, modules qui ont été comparés avec succès avec ceux mesurés lors des essais dans la halle fosses d'Écublens,
- mieux expliquer le rôle de la chaleur latente de fusion de la glace et son effet sur la brutalité du phénomène de la fonte des lentilles.

Tous les objectifs initiaux n'ont cependant pu être réalisés, notamment en matière de modélisation numérique, ceci surtout dans le domaine du couplage hydro-thermique. Faute de temps (l'expérimentation a pris beaucoup plus de temps que prévu) et de moyens informatiques, cet objectif n'a pu être mené à bien. Cela reste à faire et pourra être le sujet d'une autre recherche innovante basée, en particulier, sur les recherches en matière de sols non saturés menées depuis de nombreuses années par le Laboratoire de mécanique des sols de l'EPFL (par ex. Lyesse Laloui *et al.*, eds, 2005).

12.3 Application à des infrastructures de voies de communication

Dans le domaine du *dimensionnement au gel et dégel des voies de communication*, la recherche a montré que l'usage d'un module résilient au dégel, avec des méthodes numériques modernes de dimensionnement, était tout à fait possible. Les tendances en matière de dimensionnement des superstructures routières vont en effet dans le sens de l'usage de méthodes plus rationnelles que les méthodes empiriques à la base de la plupart des normes de dimensionnement actuelles. Ces nouvelles méthodes simulent le comportement de la route par les lois de la mécanique du continu et des lois de comportement propres à chaque matériau constituant la superstructure et l'infrastructure d'une chaussée ; le module résilient de l'infrastructure – comme ceux de tous les matériaux des couches de la chaussée – est un des paramètres importants utilisés par ces nouvelles méthodes. La recherche a permis de donner quelques valeurs de ce module *au gel et dégel* :

- pour le limon utilisé lors des essais réalisés dans la halle fosses d'Écublens entre 1975 et 1985 (Dysli & Pfister 1982, Dysli 1991a, Dysli 1991b, Dysli 1999),
- pour différents sols gélifs, valeurs tirées de la littérature et, en particulier, des essais réalisés par le CRREL (par ex. Berg *et al.*, 1996),
- et surtout, pour le limon utilisé pour cette recherche, qui est semblable à celui utilisé dans la halle fosses d'Écublens, par une méthode expérimentale élaborée.

Toujours dans ce domaine, elle a aussi montré comment utiliser ce module résilient dans les nouvelles méthodes et comment le déterminer en laboratoire. Cependant, l'intégration de la vitesse du dégel dans l'évaluation du module résilient ne semble pas possible car elle demande des techniques d'essai beaucoup trop compliquées. Un essai plus simple, semblable à celui du CRREL, devra être mis au point pour son usage en Suisse.

Les résultats de la recherche seront ainsi d'une grande utilité dans les travaux de la commission qui va très prochainement s'atteler à la révision des normes suisses de dimensionnement des super- et infrastructures routières voire ferroviaires.

Dans le domaine de la *construction* des voies de communication, comme l'avait déjà démontré en partie Dysli (1993), et comme déjà dit dans la section 12.2, cette recherche a confirmé que l'eau de fonte des lentilles de glace s'écoulait vers la tranche de sol où elle avait été prélevée lors du gel. Tout dispositif de drainage de la forme de la fondation est ainsi inutile.

12.4 Application à la formation et à la fonte des pergélisols alpins

Les résultats expérimentaux de cette recherche et son état des connaissances actuelles ont été utilisés dans le domaine des pergélisols, surtout alpins. Les phénomènes physiques propres à ces sols gelés en permanence sont les mêmes que ceux des sols soumis au gel saisonnier. Pour la *formation* des pergélisols, cette recherche a démontré l'importance du régime des succions capillaires, importance qui n'avait pas encore été bien mise en évidence. Pour la *fonte des pergélisols alpins par réchauffement du climat* et pour l'initiation de laves torrentielles, cette recherche a montré que l'usage de modèles numériques de diffusion thermique un peu élaborés permettait une certaine prévision de la période à laquelle cette fonte pouvait se produire. Un tel usage est cependant difficile à utiliser et ne peut être considéré comme un outil pratiquement utilisable. Enfin, la recherche a donné un moyen pratique pour évaluer le *degré de supersaturation* des pergélisols et aussi de la zone des lentilles de glace d'un gélisol après un gel saisonnier.

13

Bibliographie

13.1 Articles et ouvrages

- AASHO, 1962, *Special Report 61A-61G : AASHO Road Test*. HRB, National Research Council, Washington DC.
- AASTHO, 1962, *Highway Research Board*, Special report 61^E (1 to 5) and 73.
- AGUIRRE-PUENTE J., FREMOND M., 1975, Congélation d'un milieu poreux de texture fine, saturé d'eau, considéré comme un couplage de plusieurs phénomènes élémentaires, *XIVe Congrès Int. du Froid*, Moscou.
- AKAGAWA S., 1988, Experimental study of frozen fringe characteristics. *Cold Regions Science and Technology*, **15**: 209-223.
- AKAGAWA S., 2000, A method for controlling stationary frost heaving, *Proc. of the Int. Symp. on Ground Freezing and Frost Action in Soils, Louvain/Belgium*, p. 63-68, Balkema Rotterdam.
- ALLEY R.B., BENDER M.L., 1998, Greenland ice cores : Frozen in time, *Scientific American*, **278(2)** : 80-85.
- ANDERSEN K.K., AZUMA N., BARNOLA J.-M., BIGLER M., BISCAYE P., CAILLON N., CHAPPELLAZ J., CLAUSEN H.B., DAHL-JENSEN D., FISCHER H. FLÜCKIGER, J., FRITZSCHE D., FUJII Y., GOTO-AZUMA K., GRØNVOLD K., GUNDESTRUP N.S., HANSSON M., HUBER C., HVIDBERG C.S., JOHNSEN S.J, JONSELL U., JOUZEL J., KIPFSTUH S., LANDAIS A., LEUENBERGER M., LORRAIN R., MASSON-DELMOTTE V., MILLER H., MOTOYAMA H., NARITA H., POPP T., RASMUSSEN S.O., RAYNAUD D., ROTHLISBERGER R., RUTH U., SAMYN D., SCHWANDER J., SHOJI H., SIGGARD-ANDERSEN M.-L., STEFFENSEN J.P., STOCKER T., SVEINBJÖRNSDOTTIR A.E., SVENSSON A., TAKATA M., TISON J.-L., THORSTEINSSON TH., WATANABE O., WILHELMS F., WHITE J.W.C., 2004, High-resolution record of Northern Hemisphere climate extending into the last interglacial period, <http://www.gfy.ku.dk/~www-glac/ngrip/papers/pdfs/201.pdf>.
- ANDERSLAND O.B., LADANYI B., 2004, *Frozen Ground Engineering*, 2nd Edition, John Wiley & Sons, Inc.
- ANDERSON D.M., MORGENSTERN N.R., 1973, Physics, chemistry and mechanics of frozen ground: A review, *North Am. Contrib. 2nd Conf. on Permafrost, Yakutsk, USSR. Washington D.C.: National Academy of Sciences*, p. 257-288.
- AMADEUS, 2000, Advanced Models for Analytical Design of European Pavement Structures, Final Report, European Commission under Transport.
- ARENSEN L., HOEZLE M., SPRINGMAN S., 2002, Borehole deformation measurements and internal structure of some rock glaciers in Switzerland, *Permafrost and Periglacial Processes* **13**: 117-135.
- ARYA L.M., PARIS J.F., 1981, A physicoempirical model to predict the soil moisture characteristic from particle-size distribution and bulk density data, *Soil Science Society of America Journal*, **45**: 1023-1030.
- BALDUZZI F., 1959, Experimentelle Untersuchung über den Bodenfrost, *Mitt. VAWE-ETHZ*, No 44.

- BALTENSPERGER U., GÄGGLER H., GLOOR M., HOEHN E., KEIL R., 1990, Chemical composition. In Pilot Analyses of Permafrost Cores from the Active Rock Glacier Murtèl, Piz Corvatsch, Eastern Swiss Alps, A Workshop Report. Haeberli W (ed.). *Arbeitsheft VAW/ETHZ* 9, p. 24–26.
- BARSCHE D., 1969, Studien und Messungen an Blockgletschern in Macun, Unterengadin, - Z. Geomorphol. N.F., Suppl., **8**: 11-30, 10 Abb., 1 Tab., Berlin.
- BARSCHE D., 1987, The problem of the ice-cored rock glacier, In: *Giardino, Shroder, Vitek (eds) Rock Glaciers*, Allen & Unwin, Boston, p. 45-64.
- BARSCHE D., 1988, Rockglaciers, In: *Clark (ed), Advances in periglacial geomorphology*, John Wiley & Sons, New York, p. 69-90.
- BARSCHE D., 1996, *Rockglaciers – Indicators for the Present and Former Geoecology in High Mountain Environments*, Springer-Verlag Berlin.
- BARSCHE D., FIERZ H., HAEBERLI W. 1979, Shallow core drilling and borehole measurements in permafrost of an active rock glacier near the Grubengletscher, Wallis, Swiss Alps, *Art. Alp Res* **11**: 215-228.
- BATHE K.J., 1982, *Finite element procedures in engineering analysis*, Prentice Hall, Hertfordshire.
- BAYARD D., 2003. *The effect of seasonal soil frost on the alpine groundwater recharge including climate change aspects*. Thèse Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne N° 2709.
- BERG R.L., AITKEN G.W., 1973, Some passive method of controlling geocryological conditions in roadway construction, *Permafrost 2nd int. conf.*, Yakutsk, USSR, p. 581-586, NAS, Wash., D.C.
- BERG R.L., BIGL S.R., STARK J.A., DURELL G.D., 1996, *Resilient Modulus Testing of Materials from Mn/Road, Phase I*, Report 96-19, Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Hanover, N.H. USA, CRREL.
- BERNHARD L., SUTTER F., HAEBERLI W., KELLER, F., 1998, Processes of snow/permafrost-interactions at high mountain site, Murtèl/Corvatsch, eastern Swiss Alps, *The 7th International Permafrost Conference, Yellowknife, Canada*: p. 35–41.
- BERTSEN G., SAARENKETO T., 2005, *Drainage on low traffic volume roads*, Roadex II Project, The Highland Council, Transport, Environmental & Community Service, HQ, Inverness, Scotland.
- BESKOW G., 1935, Soil freezing and frost heaving with special application to roads and railroads, *Swed. Geol. Society, Serie C* 375, No 3.
- BIGL S.R., BERG R.L., 1996a, *Material Testing and Initial Pavement Design Modeling, Minnesota Road Research Project*, Report 96-14, Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Hanover, N.H. USA, CRREL.
- BIGL S.R., BERG R.L., 1996b, *Testing of Materials from the Minnesota Cold Regions Pavement Research Test Facility*, Report 96-20, Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Hanover, N.H. USA, CRREL.

- BIGL S.R., BERG R.L., 1996c, *Modeling of Mn/Road Test Sections with the CRREL Mechanistic Pavement Design Procedure*, Report 96-21, Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Hanover, N.H. USA, CRREL.
- BISHOP A.W., BLIGHT G.E., 1963, Some aspects of effective stress in saturated and partly saturated soils, *Geotechnique*, **13**.
- BISHOP A.W., WESLEY L.D., 1975, A hydraulic triaxial apparatus for controlled stress path testing, *Geotechnique* **25**, **4**: 657-670.
- BLACK J.N., 1956, The Distribution of Solar Radiation Over the Earth's Surface, *Arch. Metr. Geophysics Bioclimatol.*, **7**: 165-189.
- BLACK P.B., 1995a, *Applications of the Clapeyron equation to water and ice in porous media*, CRREL Report 95-6.
- BLACK P.B., 1995b, *RIGIDICE model of secondary frost heave*, CRREL Report 95-12.
- BÖHM R., AUER I., BRUNETTI M., MAUGERI M., NANNI T., SCHÖNER W., 2001, Regional temperature variability in the European Alps, 1760-1998, from homogenized instrumental time series, *Int. J. of Climatology*, **21**: 1779-1801.
- BOLSENGA S.J., 1964, Daily Sums of Global Radiation for Cloudless Skies, *CRREL RR 760*, Hanover, NH.
- BOURDEAU P.L., RECORDON E., 1988, Application de la radiographie à l'étude des déformations en mécanique des sols, *Int. Conf. on Measurements and Texting, Lyon*, **2**: 387-395.
- BROECKER W.S., 1995, Chaotic climate, *Scientific American*, Nov. : p. 44-50.
- BROWN R.J.E., PÉWÉ, T.L., 1973. Distribution of permafrost in North America and its relationship to the environment, a review 1963 – 1973, In: F.J. Sanger and P.J. Hyde (Editors), 2nd International Conference on Permafrost. Proceedings, National Academy of Sciences, Washington D.C., Yakutsk, USSR, p. 71-100.
- BRUNT D., 1932, Notes on Radiation in the Atmosphere, *Quarterly J. Roy. Met. Soc.*, **58**: 389-420.
- BUCKINGHAM E., 1907, Studies on the movement of soil moisture, *US Depart. of Agriculture, Bur. of soils, Bull. No 38*.
- CHAIX A., 1923, Les coulées de blocs du Parc national de l'Engadine, *Le Globe, LXII, Mém.*
- CHAMBERLAIN E.J., 1980, Overconsolidation effects of ground freezing, *2nd Int. Symp. on Ground Freezing*, Trondheim.
- CHAMBERLAIN E.J., 1987, *A freeze thaw test to determine the frost susceptibility of soils*, USA CRREL, special report 87-1.
- CHEN X.B., WANG Y.Q., 1988, Frost heave prediction for clayey soils, *Cold Region Science and Technology*, **15**(3): 233-238.
- CLAPEYRON B.P.E., 1834, *Mémoire sur la puissance de la chaleur*, Paris, École Centrale des Travaux Publics, afterwards École Polytechnique, Journal polytechnique, etc. [1795, etc.] 4°.

- COETZEE N.F, CONNOR B.G., 1990, *Fatigue characteristics of Alaska pavement mixes*, Transportation Research Record No 1269, Transportation Research Board, National Research Council, Washington D.C., p. 168-175.
- COLE D.M., BENTLEY D., DURELL G.D., JOHNSON T.C., 1986, *Resilient modulus of freeze-thaw affected granular soils for pavement design and evaluation*, Reports 86-4 and 86-12, Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Hanover, N.H. USA.
- COLE D.M., DURELL G.D., CHAMBERLAIN E.J., 1985, Repeated load triaxial testing of frozen and thawed soils, *Geotechnical Testing Journal*, **8**(4), p. 166-170.
- COST 333, 1999, *Development of new bituminous pavement design method*, European Commission Directorate General Transport, Final report of the action, Brussels, ISBN 92-828-6796-X.
- COUMOULOS D.C., 1967, *A radiographic study of soils*, Thesis Cambridge University, September.
- DANSGAARD W., 1952, The ^{18}O abundance in fresh water, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **6**: 241-260.
- DANSGAARD W., JOHNSEN S.J., CLAUSEN H.B., GUNDESTRUB N., 1973, Stable isotope glaciology, *Medd. Gronl.*, **197**: 1-53.
- DARCY H., 1856, *Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon*, Dalmont, Paris, 647 p. & atlas.
- DAVIES M.C.R, HAMZA O., HARRIS C., 2003, Physical modelling of permafrost warming in rock slopes, *Proc. 8th Int. Conf. on Permafrost, Zurich*, eds M. Phillips, S.M. Springman and L.U. Arenson, Balkema, Lisse, Netherlands p. 169-173.
- DEACON E.L., 1949, Vertical Diffusion in the Lowest Layer of the Atmosphere, *Quarterly J. Roy. Met. Soc.*, **75**: 88-103.
- DJABALLAH-MASMOUDI N., AGUIRRE-PUENTE J., 1998, Modelling and experimentation of the transfer mechanism in porous media during freezing, *Proc. of Int. Conf. Permafrost and actions of natural or artificial cooling*, p. 154-161, Paris-Orsay, France.
- DORÉ G., 2000, *Analyse et conception des chaussées, Module 2: Conception des chaussées*, Cours GCI-65180, Département de génie civil de l'Université Laval, Québec, Canada.
- DUBOIS J.-D., 1992, *Typologie des aquifères du Cristallin: exemple des massifs des Aiguilles rouges et du Mont-Blanc*, Thèse Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne no 950.
- DUQUENNOI C., FREMOND M., LEVY M., 1989, Modelling of thermal soil behaviour, *Int. Symp. on Frost in Geotech. Eng.*, Saariselkä, Finland.
- DYSLI M., 1978, La nouvelle halle fosses et l'École polytechnique fédérale de Lausanne, *Bull. Tech. Suisse Romande*, No 7.
- DYSLI M., 1979, *Influence du milieu ambiant sur la force portante d'une chaussée, Rapport final, 1^{ère} partie*, Départ. féd. des transports, des communications et de l'énergie. Office des Routes.
- DYSLI M., 1981, *Influence du milieu ambiant sur la force portante d'une chaussée, Rapport final, 2^{ème} partie*, Départ. féd. des transports, des communications et de l'énergie. Office des Routes.

- DYSLI M., 1982, Swiss philosophy and developments concerning the loss of bearing capacity during thaw, *Int. Symp. on bearing Capacity of Roads and Airfields*, Trondheim.
- DYSLI M., 1985, The practical use of coupled models in soil mechanics, *Computers & Structures*, **21**.
- DYSLI M., 1987, *Révision des normes de dimensionnement au gel*, Rapport de rech. No 145 du Départ. Féd. des Transp., des Commun. et de l'Énergie, Office des Routes.
- DYSLI M., 1991a, *Le gel et son action sur les sols et les fondations*, Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 250 p.
- DYSLI M., 1991b, Resilient modulus of freeze-thaw or resilient frost heave, *6th Int. Symp. on Ground Freezing, Beijing*.
- DYSLI M., 1993, Where does the water go during ice lenses thaw ? *Proc. 2nd Int. Symp. on Frost in Geotechnical Engineering*, Anchorage, Alaska, p. 45-50.
- DYSLI M., 1995, Statistical analysis of glacial soils, *Proc. of the XI European Conf. on Soil Mech. and Foundation Engineering*, Copenhagen, 1, p. 103-108.
- DYSLI M., 1998, Loss of bearing capacity of roads during thaw and debris flows in mountain permafrost: the same phenomenon, *Proc. Int. Symp. Permafrost and actions of natural and artificial cooling*, Paris-Orsay, p. 208-216.
- DYSLI M., 1999a, Le dimensionnement du terrain et de l'infrastructure; la révision de la norme SN 640 317b, *Route et Trafic* no 2/99.
- DYSLI M., 1999b, Quelques nouveautés en matière d'effet du gel sur les chaussées et les constructions, *Sommet mondial de la nordicité, Ministère des transports du Québec*, Canada.
- Dysli M., 2000, 25 ans de développements en matière de gel, *Publ. de la Société Suisse de Mécanique des Sols et des Roches* no 141.
- DYSLI M., 2001, Evolution des normes de dimensionnement au gel, *Route et Trafic* 5.
- DYSLI M., 2001, Recherche bibliographique et synthèse des corrélations entre les caractéristiques des sols, Rapport de recherche no 496, Office Fédéral des Routes, Berne.
- DYSLI M., 2003, Scaling of the supersaturation by a simple test, *Proc. 8th Int. Conf. on Permafrost, Zurich*.
- DYSLI M., ALLENBACH T., 1988, *Normalisation de l'essai de gonflement au gel et révision de l'essai CBR₃*, Rapport de rech. No 156 du Départ. Féd. des Transp., des Commun. et de l'Énergie, Office des Routes.
- DYSLI M., BOCCARD T., 1991, *Synthèse essais en vraie grandeur et normes sur le gel*, Rapport no 230 de l'Office fédéral des routes suisses; Berne.
- DYSLI M., BOURDEAU P.L., 1984, *Influence du milieu ambiant sur la force portante d'une chaussée*, Rapport de recherche No 79 du Départ. féd. des transports, des communications et de l'énergie, Office des Routes.
- DYSLI M., ENGEL T., 1982, Einfluss des Mikroklimas auf den Oberbau, *Strasse und Verkehr*, Nr. 8.

- 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*, p. 3-23.
- DYSLI M., PFISTER R., 1980, Tentative de quantification de la perte de portance au dégel, *Route et Trafic*, No 10.
- DYSLI M., PFISTER R., 1981, *Influence du milieu ambiant sur la force portante d'une chaussée, Rapport final, 2^{ème} partie*, Départ. féd. des transports, des communications et de l'énergie, Office des Routes, Rapport no 33.
- DYSLI M., PFISTER R. 1982, Test of bearing capacity during thaw, *Frost I Jord (Norway)* **24**: 14-21.
- DYSLI M., PIGOIS M., JACCOT A., 1982, Méthodes de mesure et d'interprétation pour les essais routiers en vraie grandeur, *Colloque Int. Essais Routiers en Vraie Grandeur*, Zurich.
- DYSLI M., RYBISAR J., 1992, Statistique sur les caractéristiques des sols suisses, Rapport de recherche no 244 de l'Office fédéral des routes, Berne.
- EIGENBROD K.D., KNUTSSON S., SHENG D., 1996, Pore-water pressures in freezing and thawing fine-grained soils, *J. of Cold Regions Engineering*, June, p.77-92.
- FISCH W. SEN, FISH W. JUN., HAEBERLI W., 1978, Electrical D.C. resistivity soundings with long profiles on rock glaciers and moraines in the Alps of Switzerland, *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*, **13/1/2** (1977): 239-260.
- FOWLER A.C., NOON C.G., 1997, The formation of massive ice in permafrost, *Proc. Ground Freezing & Frost Action in Soils*, Luleå, Sweden, Balkema Rotterdam, p. 81-85.
- FRAUENFELDER R, HAEBERLI W, HOELZLE M, MAISCH M., 2001, Using relict rock-glaciers in GIS-based modelling to reconstruct Younger Dryas permafrost distribution patterns in the Err-Julier area, Swiss Alps, *Norwegian Journal of Geography*, **55**(4): 195–202.
- FREDLUND M.D., FREDLUND D.G., WILSON G.W, 1997, Prediction of the Soil-Water Characteristics curve from grain-size distribution and volume-mass properties, *3rd Brazilian Symposium on Unsaturated Soils, Rio de Janeiro*, p. 22-25.
- FREMOND M., MIKKOLA M., 1991, Thermodynamical modelling of freezing soil, *Int. Symp. on Ground Freezing*, p. 17-24, Beijing.
- FRENCH H.M., 1996, *The periglacial environment*, Longman Harlow.
- FUKUDA M., 1982, Experimental studies of coupled heat and moisture transfer in soils during freezing, *Contribution no 2528 from Institute of Low Temperature Science*, Hokkaido University, Sapporo, Japan, p. 35-91.
- FUKUDA M., NAKAGAWA S., 1985, Numerical analysis of frost heaving based upon the coupled heat and water flow model, *4th Int. Symp. on Ground Freezing*, p. 109-117, Sapporo, Japan.
- GARDNER W.R., 1958, Some steady state solutions of the unsaturated flow equation with application to evaporation from a water table, *Soil Science*, **88**: 228-232.
- GERDEL R.W., DIAMOND M., WALSH K.J., 1954, Nomographs for Computation of Radiation Heat Supply, *SIPRE Research Paper*, No. 8.
- GIBBS J.W., 1892, *Thermodynamische Studien*, aus dem engl. durch W. Ostwald, Leipzig.

- GILPIN R.R., 1980, A model for the prediction of ice lensing and frost heave in soils, *Water Res. Res.* **16**: 918-930.
- GORELIK J.B., KOLUNIN V.S., 2000, Generalized model of heat and mass transfer for freezing and thawing soils under load, *Proc. of the Int. Symp. on Ground Freezing and Frost Action in Soils, Louvain/Belgium*, September, Balkema Rotterdam.
- GRAB S. W., 1996, The occurrence of a Holocene Rock Glacier on Mount Kenya: some Observations and Comments, *Permafrost and Periglacial Processes*, **7**: 381-389.
- GUYMON G., BERG R., HROMADKA T., 1980, A one-dimensional frost heave model based upon simulation of simultaneous heat and water flux, *Cold Regions Science and Technology*, **3** (nos 2 & 3): 253-263.
- GUYMON G., BERG R., HROMADKA T., 1993, Mathematical model of frost heave and thaw settlement in pavements, *CRREL Report 93-2*.
- GUYMON G.L., HARR M.E., BERG R.L., HROMADKA T.V., 1981, A probabilistic-deterministic analysis of one-dimensional ice segregation in a freezing soil column, *Cold Regions Science and Technology*, **5**: 127-140.
- HAEBERLI W., 1975, *Untersuchungen zur Verbreitung von Permafrost zwischen Flüelapass und Piz Grialetsch (Graubünden)*, Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH, Zürich, **17**, 221 p.
- HAEBERLI W., 1983, *Creep of mountain permafrost*, Mitteilungen Nr. 77, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETHZ.
- HAEBERLI W., 1989, Glacier ice-cored rock glaciers in the Yukon Territory Alaska?, *J. Glaciol.*, **35**: 294-295.
- HAEBERLI W., 1995, Permafrost und Blockgletscher in den Alpen, *Vierteljahrsschrift der Natur Gesellschaft in Zürich* **140/3**: 113-121.
- HAEBERLI W., VONDER MÜHLL D., 1996, On the characteristics and possible origins of ice in rock glacier permafrost, *Z. Geomorph. N.F., Suppl.-Bd 104*, pp. 43-57, Berlin & Stuttgart.
- HAEBERLI W., KÄÄB A., WAGNER S., GEISSLER P., HAAS JN., GLATZEL-MATTHEIER H., WAGENBACH D., VONDER MÜHLL D., 1999. Pollen analysis and ¹⁴C-age of moss remains recovered from a permafrost core of the active rock glacier Murtèl/Corvatsch (Swiss Alps): geomorphological and glaciological implications. *Journal of Glaciology* **45**(149): 1-8.
- HAEBERLI W., HALLET B., ARENSON L., ELCONIN R., HUMLUM O., KÄÄB A., KAUFMANN V., LADANYI B., MATSUOKA N., SPRINGMAN S., VONDER MÜHLL D., 2006, Permafrost Creep and Rock Glacier Dynamics, *Permafrost and Periglac. Process.* **17**: 189-214.
- HARLAN R.L., 1973, Analysis of coupled heat-fluid transport in partially frozen soil, *Water Resour. Res.* **9**: 1314-1322.
- HARRIS C. (Ed.), 2001, Permafrost and Periglacial Processes, Special Volume Permafrost and Climate in Europe (PACE), *Permafrost and Periglacial Processes*, **12**(1).
- HARRIS C., HAEBERLI W., VONDER MÜHLL D., KING L., 2001, Permafrost monitoring in the high mountains of Europe: The PACE Project in its global context, *Permafrost and Periglacial Processes*, **12**(1): 3-12.

- HARTIKAINEN J., MIKKOLA M., 1997, General thermomechanical model of freezing soil with numerical application, *Proc. of the Int. Symp. on Ground Freezing and Frost Action in Soils, Luleå/Sweden*, Balkema Rotterdam.
- HASTENRATH, S., 1973, Observation on the periglacial morphology of Mts Kenya and Kilimanjaro, East Africa, *Zeitschrift für Geomorphologie, Supplementband*, **16**: 161-179.
- HAUCK C., 2002, Frozen ground monitoring using DC resistivity tomography, *Geophysical Research Letters*, Vol. 29.
- HOBBS P.V., 1974, *Ice Physics*, Clarendon Press, Oxford.
- HOLDEN J.T., JONES R.H., DUDEK S., 1980, Heat and mass flow associated with freezing front, *Ground Freezing, Dev. in Geot. Eng.*, No 28, Elsevier.
- HOPKE S.W., 1980, A model for frost heave including overburden, *Cold Regions Sci. Tech.*, **14**: 13-22.
- IBRAHIM H., 1978, *Energy Exchange at Atmosphere-Earth Interface*, Master of Science Thesis, Univ. of Ottawa, Ottawa, Canada.
- INGERSOLL J., 1981, *Method for coincidentally determining soil hydraulic conductivity and moisture retention characteristics*, USA CRREL, Special report 81-2.
- INGOLFSSON O., LOKTANTZ H, 2003, Massive ground ice body of glacial origin at Yugorski Peninsula Arctic Russia, *Permafrost and Periglacial Processes*, **14**: 199-215.
- INSTITUTE FOR GEOLOGY AND PALEONTOLOGY UNIVERSITY OF INNSBRUCK, 2002, Rock Glaciers - An introduction with examples from the Austrian Alps, www.uibk.ac.at/projects/rockglacier/rockglacier_intro.html.
- IRWIN L., SPECK D., 1986, *NELAPAV user's guide*, Cornell Univ., Ithaca, New York, Cornell Univ. Local Road Program Report No 86-1.
- JANOO V.C., BAYER JR J.J., DURELL G.D., SMITH JR CH.E., 1999, *Resilient Modulus for New Hampshire Subgrade Soils for Use in Mechanistic AASHTO Design*, Report 99-14, Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Hanover, N.H. USA.
- JANOO V.C., BARNA L., 2002, *Pavement performance during thaw weakening*, 9th International Conference on Design of Asphalt Pavements, Copenhagen.
- JANSSON P.E., HALLDIN S., 1979, Model for the annual water and energy flow in layered soil, In : S. Halldin (ed) Comparison of Forest and Energy Exchange Models, *Society for Ecological Modeling Copenhagen*, p. 145-163.
- JOHANSEN O., 1975, Thermal conductivity of soils, Ph.D. thesis. Trondheim, Norway.
- JOHNSON T.C., MCROBERTS E., NIXON J.F., 1984, Design implication of suggrade thawing, *Frost Action and its Control*, ed. Berg R.L. and Wright E.A., New-York: Technical Council on Cold Regions Engineering, ASCE, p. 45-103.
- KAPLAR C.W., 1974, Freezing test for evaluating relative frost susceptibility of various soils, *US Army Cold Regions Research and Eng. Lab., Techn. report*, 250 p..
- KELLER F., TAMAS M., 2003, Enhanced ground cooling in periods with thin snow cover in the Swiss National Park, *Proc. 8th Int. Conf. on Permafrost, Zurich*, eds M. Phillips, S.M. Springman and L.U. Arenson, Balkema, Lisse, Netherlands.

- KEUSEN H.R., HAEBERLI W., 1983. Site investigation and foundation design aspects of cable car construction in alpine permafrost at the "Chli Matterhorn", Wallis, Swiss Alps, *Proc. of the Fourth International Conference on Permafrost*, p. 601-605.
- KHANZODE R.K., FREDLUND D.G., VANAPALLI S.K., 2000. A new test procedure to measure the soil-water characteristic curves using a small centrifuge, *Proc. of Asian Conference on Unsaturated Soils (UNSAT-ASIA 2000)*, p. 345-350.
- KHARCHAFI M., DYSLI M., 1991, *Géotextiles utilisés en tant qu'armatures : approche expérimentale sur modèle réduit du renforcement des talus et des soutènements par géotextiles*, Rapp. de rech. No 232 du Dép. Féd. des Transp., des Comm. et de l'Énergie, Office des Routes.
- KNUTSON Å., 1973, *Frost action in road OECD, Symposium*, Paris.
- KONRAD J.-M., 1988, Influence of freezing mode on frost heave characteristics, *Cold Regions Science and Technology*, **15**: 161-175.
- KONRAD J.-M., 1989, Influence of cooling rate on the temperature of ice lens formation in clayey silts, *Cold Regions Science and Technology*, **16**: 25-36.
- KONRAD J.-M., 1999, Frost susceptibility related to soil index properties, *Canadian Geotechnical Journal*, **36**: 403-417.
- KONRAD J.-M., MORGENSTERN N.R., 1980, A mechanistic theory of ice formation in fine grained soils, *Canadian Geotechnical Journal*, **17**: 473-486.
- KONRAD J.-M., MORGENSTERN N.R., 1981, The segregation potential of a freezing soil, *Canadian Geotechnical Journal*, **18**: 482-491.
- KONRAD J.-M., NIXON J.F., 1994, Frost heave characteristics of a clayey silt subjected to small temperature gradients, *Cold Regions Science and Technology*, **22**: 299-310.
- KUJALA K., 1997, Estimation of frost heave and thaw weakening by statistical analyses and physical models, *Proc. of the Int. Symp. on Ground Freezing and Frost Action in Soils, Luleå/Sweden*, Balkema Rotterdam.
- KULIESHIUS V., 1991, *Frost heave problems in geotechnical engineering*, Vilnius Technical University, Vilna, 79 p.
- LADANYI B., 1994, *La conception et la réhabilitation des infrastructures de transport en régions nordiques*, Manuel préparé pour le Ministère des Transports du Québec.
- LADANYI B., SHEN M., 1989, Mechanics of freezing and thawing in soils, *Int. Symp. on Frost in Geotech. Eng.*, Saariselkä, Finland.
- LALOU L., CHARLIER R., PIJAUDIER-CABOT G., EDS, 2005, Coupled multiphysics processes in geomechanics, *Revue européenne de génie civil* Vol. 9 N° 5-6.
- LAPLACE P.S. DE, 1782, *Mémoire sur l'attraction des sphéroïdes*, Bibliothèque Nationale de France.
- LEFEBVRE H., DYSLI M., 1988, *Effet du gel sur les superstructures routières avec fondation en matériaux concassés*, Rapport de rech. No 165 du Départ. Féd. des Transp., des Commun. et de l'Énergie, Office des Routes.
- LOCH J.P.G, 1979, Influence of the heat extraction rate on the ice segregation rate of soils, *Frost i Jord*, No 20, Oslo.

- LUETSCHER M., 2005, *Processes in ice caves*. Phd thesis, Geography Department of University of Zurich.
- LUETSCHG M., BARTELT P., LEHNING M., STOECKLI V., HAEBERLI W., 2003, Numerical simulation of the interaction processes between snow cover and alpine permafrost, *Proc. 8th Int. Conf. on Permafrost, Zurich*, eds M. Phillips, S.M. Springman and L.U. Arenson, Balkema, Lisse, Netherlands.
- LUGON R., GARDAZ J.M., VON DER MÜHLL D., 2000. The partial collapse of the Dolent moraine (Mont Blanc Range, Swiss Alps). *Z. Geomorph. N.F., Suppl.-Bd*, **122**:191-208.
- LUNARDINI V.J., 1977, Geothermal Aspects of N-Factor and Calculation Methods, *Internal Report NRC*, Contract 032-579, Ottawa, Canada.
- LUNARDINI V.J. 1981, Heat transfer in cold climates, Van Nostrand Reinhold Co.
- LUSCHER U., AFIFI S.S., 1973, Thaw consolidation on Alaskan silts and granular soils, *Proc. 2nd Int. Conf. on Permafrost*, p. 325-334.
- MAC ADAM J., 1816, *Remarks on the present system of road making with observations, deduced from practice and experience, with a view to an introduction of improvement in the method of making, repairing and preserving roads, and defending the roads funds from misapplication*, 1st ed., 1816.
- MARÉCHAL J.-C., 1998, *Les circulations d'eau dans les massifs cristallins et leurs relations avec les ouvrages souterrains*, Thèse École Polytechnique Fédérale de Lausanne no 1769.
- MASSON-DELMOTTE V., AUGUSTIN L., 2002, A la recherche de la dernière période interglaciaire dans les glaces du Groenland: les surprenants résultats du forage profond de NorthGRIP, *Rapport annuel 2002 Institut Polaire Paul Emile Victor*.
- MICHALOWSKI R.L., 1992, A constitutive model for frost susceptible soils, *Proc. Numerical Model in Geomechanics, NUMOG II*, Prague, p. 159-167.
- MILLER E.E., MILLER R.D., 1956, Physical theory for capillary flow phenomena, *Journ. Applied Physics*, Vol. 27, No 4, p. 324-332.
- MILLER R.D., 1963, Phase equilibrium and soil freezing, *Proc. Permafrost Int. Conf. Nat Acad. Sci-Nat., USA, Res. Council Publ.*, No 1287, 1966, p. 193-197.
- MILLER R.D., 1972, Freezing and heaving of saturated and unsaturated soils, *Highway Res. Rec. 393 (USA)*, p. 1-11.
- MILLER R.D., 1973, Soil freezing in relation to pore water pressure and temperature, *Proc. 2nd Int. Conf. Permafrost*, Nat. Acad. Sci. USA, p. 344-352.
- MILLER R.D., 1978, Frost heaving in non-colloidal soils, *Proc. 3rd Int. Conf. Permafrost*, Edmonton, I, p. 708-713.
- MILLER R.D., BAKER J.H., KOLAIAI J.H., 1960, Particle size, overburden pressure, porewater pressure and freezing temperature of ice lenses in soil, *Proc. 7th Int. Congress of Soil Science, Madison, Wisconsin*, p. 122-129.
- MILLER R.D., KOSLOW E.E., 1980, Computation of rate of heave versus load under quasi-steady state, *Cold Region Science and Technology*, **3**: 243-251.
- MITTAZ C., HOELZLE M., HAEBERLI W., 2000, First results and interpretation of energy flux measurements over alpine permafrost, *Annals of Glaciology* **31**: 275-280.

- MIYATA Y., 1997, A macroscopic frost heave theory – Coupling equations and criteria for creation of new ice lens, *Proc. of the Int. Symp. on Ground Freezing and Frost Action in Soils, Luleå/Sweden*, Balkema Rotterdam.
- MORGENSTERN N.R., NIXON J.F., 1971, One-dimensional consolidation of thawing soils, *Can. Geotech. J.*, **8**(4): 558-565.
- MORGENSTERN N.R., SMITH L.B., 1973, Thaw-consolidation tests on remoulded clays, *Can. Geotech. J.*, **10**(1): 25-40.
- MURTON J.B., HARRIS C., 2003, The experimental simulation of ice-wedge casting, *Proc. 8th Int. Conf. on Permafrost, Zurich, eds M. Phillips, S.M. Springman and L.U. Arenson, Balkema, Lisse, Netherlands*, p. 807-810.
- NAKANO Y., 1997, A mathematical model called M1 and the Gilpin model of soil freezing, *Proc. of the Int. Symp. on Ground Freezing and Frost Action in Soils, Luleå/Sweden*, Balkema Rotterdam.
- NIXON J.F., MORGENSTERN N.R., 1973, The residual stress in thawing soils. *Can. Geotech. J.*, **10**(4): 571-580.
- NIXON J.F., LADANYI B., 1978, Thaw consolidation - Chap. 4, in *Geotechnical Engineering for Cold Regions*, ed. Andersland and Anderson, New-York, McGraw-Hill, p. 164-215.
- NORDAL R.S., REFSDAL G., 1989, Frost protection in design and construction, *Proc. Int. Symp. on Frost in Geotechnical Engineering*, Saariselkä, Finland, p. 127-163.
- O'NEIL K., MILLER R.D., 1982, Numerical solution for a rigid-ice model of secondary frost heave, *CRREL Report 82-13*, Hanover, NH.
- O'NEIL K., MILLER R.D., 1985, Exploration of a rigid-ice model of frost heave, *Water Resour. Res.* **21**: 282-296.
- OKAMOTO T., MIYATA Y., MINAMI Y., 1997, Frost heave analysis by finite element method, *Proc. of the Int. Symp. on Ground Freezing and Frost Action in Soils, Luleå/Sweden*, Balkema Rotterdam.
- PADILLA F., VILLENEUVE J.-P., 1992, Modelling and experimental studies of frost heave including solute effects, *Cold Regions Sci. And Tech.* **20**: 183-194.
- PENNER E., 1957, Soils Moisture tension and ice segregation, *HRB Bull.*, **168**: 50-64.
- PENNER E., 1963, Frost heaving in soils, *Proc. 1st Int. Conf. Permafrost*, Purdue, p. 197-202.
- PENNER E., 1977, Fundamental aspects of frost action, *Proc. Int. Symp. on Frost Action in Soils*, **2**: 17-18, Luleå, Sweden.
- PENNER E., 1986, Aspect of the ice lens growth in soils, *Cold Regions Science and Technology* **13**: 91-100.
- PFISTER R., DYSLI M., RECORDON E., 1979, *Influence du milieu ambiant sur la force portante d'une chaussée*, rapport final, 1e partie, Rapport de rech. du Départ. Féd. des Transp., des Commun. et de l'Énergie, Office des Routes.
- PHILLIPS M., SCHWEIZER J., 2004, On the relation between mountain permafrost and snowpack stability, *Int. Snow Science Workshop, American Avalanche Institute*, Jackson Hole, Wyoming, USA.

- POISSON S.D., 1833, *Traité de mécanique*, Bibliothèque Nationale de France.
- POTTER N. JR, 1972, Ice-cored rock glacier, Galena Creek, Northern Absaroka Mountains, Wyoming, *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **83**: 3021-3058.
- RADD F.J., OERTLE D.H., 1973, Experimental pressure studies on frost heaving mechanism and growth-fusion behavior of ice in soils and glaciers, *Permafrost, 2nd. Int. Conf. North Am.*, p. 337-384.
- RAWLS W.J., BRAKENSIEK D.L., 1989, Estimation of soil water retention and hydraulic properties, *H.J. Morel-Seytoux (ed.), Unsaturated Flow in Hydrologic modeling Theory and Practice*, Kluwer Academic Publisher Very good booklet, Beltsville, MD, p. 275-300.
- RICHARDS L.A., 1932, *Physics*.
- RIEDER U., KEUSEN H.-R., AMIGUET J.-L., 1981, Problèmes géotechniques lors de la construction du téléphérique du Petit Cervin, *Ingénieurs et Architectes suisses, 25 juin*, p. 207-210.
- ROENTGEN W.C., 1896, *Eine neue Art von Strahlen*, SA aus Sitzgsberichte der Würzburger physik.-med. Gesellsch. 1895.
- ROMERO E., GENS A., LLORET A., 2003, Suction effects on a compacted clay under non-isothermal conditions, *Geotechnique*, **53**(1): pp. 65-81.
- ROSCOE K.H., 1970, The influence of strain in soil mechanics, 10th Rankine lecture, *Geotechnique*, **20**(2): 129-179.
- ROWE P.W., BARDEN L., 1966, A new consolidation cell, *Geotechnique*, **16** : 162-170.
- RUCKLI R., 1943, *Gélimité des sols et fondations des routes*, Thèse École d'Ingénieurs de l'Université de Lausanne.
- RUCKLI R., 1950, *Der Frost im Baugrund*, Springer Verlag, Wien.
- SAARELAINEN S., 2000, Frost heave design of pavements, the Finnish approach, *Proc. Int. Conf. on Ground Freezing and Frost Action in Soils, Louvain-La-Neuve, Belgium*, Ed. Balkema, Rotterdam, p. 243-250..
- SCHEINOST A.C., SINOWSKI K., AUERSWALD K., 1997, Regionalization of soil water retention curve in a highly variable soilscape, I. Developing a new pedotransfer function, *Geoderma*, **78**: 129-143.
- SCHMIDT R.J., 1975, Use of ASTM tests to predict low temperature stiffness of asphalt mixes, *Transportation Research Record 544*, Transportation Research Board, National Research Council, Washington D.C., p. 35-45.
- SCOTT R.F., 1957, Estimation of the Heat Transfer Coefficient Between Air and the Ground Surface, *Trans. Am. Geophys. Union*, **38**: 2532.
- SETO J.T.C., KONRAD J.-M., 1994, Pore pressure measurements during freezing of an overconsolidated clayey silt, *Cold Regions Science and Technology*, **22**: 319-338.
- SHENG D., 1994, Thermodynamics of freezing soils - Theory and application, *Doctoral thesis*, Luleå University of Technology.
- SHEPPARD M., KAY B., LOCH J., 1978, Development and testing of a computer model for heat and mass flow in freezing soils, *Proc. 3rd Int. Conf. On Permafrost*, Vol. 1, p. 76-81, Edmonton, Alberta, Canada.

- SHOFIELD R.K., 1935, The pF of the water in soil, *Trans. 3rd Int. Cong. of Soil Sci.*, Vol. 2, Discussion 3.
- SMITH M.W., TICE A.R., 1988, Measurement of the unfrozen water content of soils - Comparison of NMR and TDR Methods, *CRREL Report* 88-18.
- SPEER T.L., WATSON G.H., ROWLEY R.K., 1973, Effects of ground ice variability and resulting thaw settlements on buried warm-oil pipelines, *North Am. Contrib. 2nd Int. Conf. on permafrost*, Yakutsk, USSR, Washington D.C., National Academy of Sciences, p. 746-752.
- STÄHLI M., BAYARD D., WYDLER H., FLÜHLER H. 2004. Snowmelt Infiltration into Alpine Soils Visualized by Dye Tracer Technique. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, **36**(1): 128-135.
- STEIG E.J., FITZPATRICK J.J., POTTER N. JR, CLARK D.H., 1998, The geochemical record in rock glaciers, *Geografiska Annaler, Serie A, Physical Geography*, **80**(3/4): 277-286.
- STENBERG L., 1989, Laboratorieutrustning för tjällyftningsstudier, *VTI meddelande* 609, Linköping, 29 p.
- STOCKER-MITTAZ C., HOELZLE M., HAEBERLI W., 2002, Modelling alpine permafrost distribution based on energy-balance data : a first step, *Permafrost and Periglacial Processes* **13**: 271-282.
- SUGITA A., ISHIZAKI T., FUKUDA M., 1997, Characteristics of soil-structures of frozen soils, *Proc. of Int. Symp. on Ground Freezing and Frost Action in Soils*, Luleå/Sweden, p. 165-169.
- SWINBANK W.C., 1964, The Exponential Wind Profile, *Quarterly J. Roy. Met. Soc.*, **90**: 119 p.
- TABER J.M. 1929, Frost heaving, *Journal of Geology*, **37**(5): 428-461.
- TABER S., 1930, The mechanism of frost heaving, *Journ. of Geology*, **38**(4).
- TAKAGI S., 1965, Principles of frost heaving, *CRREL Report*, No 14.
- TAKAGI S., 1982, Initial stage of the formation of soilladen ice lenses, *Proc. 3rd Int. Symp. on Ground Freezing*, Hanover, New Hampshire / USA.
- TAKASHI T., YAMAMOTO H., OHRAI T., MASUDA M., 1978, Effect of penetration rate of freezing and confining stress on the frost heave ratio of soil, *3rd Int. Permafrost Conf.*, p. 737-742.
- TAKEDA K., OKAMURA A., 1997, Microstructure of freezing front in freezing soils, *Proc. of Int. Symp. on Ground Freezing and Frost Action in Soils*, Luleå/Sweden, p. 171-178.
- TALAMUCCI F., 1997, Some recent mathematical results on the problem of soil freezing, *Proc. of the Int. Symp. on Ground Freezing and Frost Action in Soils*, Luleå/Sweden, April, Balkema Rotterdam.
- TAYLOR G.S., LUTHIN J.N., 1978, A model for coupled heat and moisture transfer during soil freezing, *Canadian Geotechnical Journal*, p. 548-555.
- THE ASPHALT INSTITUTE, 1982, *Research and development of the Asphalt Institute's thickness design manual* (MS-1), ninth edition, Maryland, Research Report No 82-2.

- THOREL L., DYSLI M., 1990, *Normalisation d'un nouvel essai de détermination de la sensibilité au gel*, Rapp. de rech. No 207 du Dép. Féd. des Transp., des Comm. et de l'Énergie, Office des Routes.
- TICE A.R., OLIPHANT J.L., NAKANO Y., JENKINS T.F., 1982, *Relationship between the ice and unfrozen water phases in frozen soil as determined by pulsed nuclear magnetic resonance and physical absorption data*, USA CRREL, report 82-15.
- TOPP G.C., DAVIS J.L., 1985, Measurement of soil water content using time domain reflectometry (TDR), *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **49**:19-24.
- TSYTOVITCH N.A., SUMGIN M.I., 1937, Principles of mechanics of frozen ground, USSR Acad. Sci. *US Army CRREL Transl. 19*, Hanover, NH.
- TYLER S.W., WEATCRAFT S.W., 1989, Application of fractal mathematics to soil water retention estimation, *Soil Science Society of America Journal*, **53**(4): 87-996.
- ULLIDTZ P., 1987, Pavement Analysis, In *Developments in Civil Engineering*, Vol. 19, Amsterdam, Elsevier Science Publisher.
- VANAPALLI S.K., FREDLUND D.G., PUFAHL, D.E., 1999, The influence of soil structure and stress history on the soil-water characteristics of a compacted till, *Geotechnique*, **49**:143-159.
- VERECKEN H.J., MAES J., FEYEN J., DARIUS P., 1989, Estimating of the soil moisture retention characteristic from texture, bulk density and carbon content, *Soil Science*, **148**(6): 389-403.
- VONDER MÜHLL D., 1990, Borehole logging in Alpine permafrost, upper Engadin, Swiss Alps, *Permafrost and Periglacial Processes* **3**: 125-132.
- VONDER MÜHLL D., 1993, *Geophysikalische Untersuchungen im Permafrost des Oberengadins*, Mitteilungen Nr. 122, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETHZ.
- VONDER MÜHLL D., NÖTZLI J., MAKOWSKI K., DELALOYE R., 2004, Permafrost in Switzerland, *2000/2001 and 2001/2002 glaciological Report (Permafrost) No 2/3*.
- VSS, 1963, Der AASHO Strassentest, Kurzfassung der Schlussberichte, *Strasse und Verkehr*, Juli.
- VUORIO M., 1979, *Terrassement et construction de chaussées*, Rapport finlandais du XVIe Congrès Mondial de la Route, Vienne.
- WAHRHAFTIG C., COX A., 1959, Rock glaciers in the Alaska Range, *Geol. Soc. Am. Bull.*, **70**: 383-436.
- WATANABE K., MIZOGUCHI M., ISHIZAKI T., FUKUDA M., 1997, Experimental study on microstructure near freezing front during soil freezing, *Proc. of Int. Symp. on Ground Freezing and Frost Action in Soils*, Luleå/Sweden, p. 187-192.
- WATANABE K., MUTO Y., 2000, A model for the formation of ice lenses in an unconfined, water-saturated, porous medium consisting of spherical particles, *Proc. of the Int. Symp. on Ground Freezing and Frost Action in Soils*, Louvain/Belgium, Balkema Rotterdam.
- WILLIAMS P.J., 1966, Pore pressures at a penetration frost line and their prediction, *Geotechnique*, **16**(3): 187-208.

- WILLIAMS P.J., 1967, Properties and behaviour of freezing soils, *NGI Publ.*, No 72, Oslo.
- WILLIAMS P.J., 1976, Volume change in frozen soils, *L. Bjerrum Memorial Vol.*, NGI, p. 233-246.
- WILLIAMS P.J., 1977, Thermodynamical conditions for ice accumulation in freezing soils, *Proc. Int. Symp. on Frost Action in Soils*, p. 42-53, Luleå, Sweden.
- WITCZAK M., 1972, Design of full depth airfield pavements, *Proceedings third International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements*, London, England, Vol. I, p. 450-467.
- YONG R.N., WARKENTIN B.P., 1975, *Soil Properties and Behaviour*, Elsevier.
- ZHANG S., ZHU Q., 1983, A Study of the calculation of frost heaving, *Proc. 4th Int. Conf. On Permafrost*, p. 17-22, Fairbanks, Alaska.

13.2 Normes

- AASHTO, 1986, *Guide for design of pavement structures*, American Association of State Highway and Transportation Officials.
- AASHTO, 1996a, *Guide for design of pavement structures*, American Association of State Highway and Transportation Officials.
- AASHTO, 1996b, *Provisional method for determining the resilient modulus of soils and aggregate materials*, AASHTO Provisional Standard TP46-94, Edition 1A, American Association of State Highway and Transportation Officials.
- AFNOR P 94-093, *Sols: Reconnaissance et essais – Détermination des caractéristiques de compactage d'un sol par l'essai Proctor normal et Proctor modifié* (French standard).
- ASTM C666, 1971, *Resistance of concrete to rapid freezing and thawing*, American Society for Testing and Material, Philadelphia, USA. [4.4]
- ASTM D 698, *Laboratory compaction characteristics of soil using standard effort* (US standard).
- ASTM D560, 1982, *Freezing-and-thawing tests of compacted soil-cement mixtures*, American Society for Testing and Material, Philadelphia, USA. [4.3]
- BS 1377, *Methods for test for soils for civil engineering purposes: Part 4: Compaction related tests: Clause 3: Determination of dry density/moisture content relationship* (British standard).
- DIN 18127, *Baugrund – Untersuchung von Bodenproben – Proctorversuch* (German standard).
- FRA, 1987, *Teiden Suunnittelu, TVL : N Ohjeet, Kansio B, IV Tien rakenne, Tieja vesirakennushallitus*. (Structural design of road pavement, File B, Instructions of Finish Road Administration – FRA, Part IV).
- NCHRP, 2004, *Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures*, National Cooperative Highway Research Programme, Transportation Research Board, National Research Council, USA.
- NF P 98-234-2, *Essai de gonflement au gel des sols*. Labor. central des P+C, Paris.
- RTAC, 1997, *Pavements Design and Management Guide*, Roads and Transportation Association of Canada, Ottawa, Ontario.
- SN 640 039, *Ouvrages routiers – Conception favorable à leur entretien*, Norme suisse, VSS, Zurich.
- SN 640 317b, *Dimensionnement – Terrain et infrastructure*, Norme suisse, VSS, Zurich.
- SN 640 320a, *Dimensionnement – Trafic pondéral équivalent*, Norme suisse, VSS, Zurich.
- SN 640 324a, *Dimensionnement – Superstructure des routes*, Norme suisse, VSS, Zurich.
- SN 640 355, *Drainage – Etude des projets*, Norme suisse, VSS, Zurich.
- SN 640 360, *Evacuation des eaux – Collecteurs et drainage – Prescriptions d'exécution*, Norme suisse, VSS, Zurich.

- SN 640 720c, *Entretien des routes – Nettoyage*, Norme suisse, VSS, Zurich.
- SN 640 730b, *Entretien des chaussées – Norme de base – concept des mesures*, Norme suisse, VSS, Zurich.
- SN 640 731b, *Entretien des chaussées bitumineuses – Réparations*, Norme suisse, VSS, Zurich.
- SN 640 732a, *Entretien des chaussées bitumineuses – Remise en état*, Norme suisse, VSS, Zurich.
- SN 640 735a, *Entretien des revêtements en béton – Réparation*, Norme suisse, VSS, Zurich.
- SN 670 010, *Bodenkennziffern / Coefficients caractéristiques des sols* (Swiss standard).
- SN 670 010b, 1999, *Coefficients caractéristiques des sols*, Norme suisse, VSS Zürich.
- SN 670 140b, 2001, *Frost / Gel*, Norme suisse, VSS Zurich.
- SN 670 320, *Essais CBR en laboratoire*, Norme suisse, VSS Zurich.
- SN 670 321a, *Frosthebungsversuch und CBR-Versuch nach dem Auftauen (CBR_F) / Essai de gonflement au gel et essai CBR après dégel (CBR_F)*, Norme suisse, VSS, Zürich.
- SN 670 330, *Verdichtung nach AASHTO / Compactage selon AASHTO*, Norme suisse, VSS, Zürich.
- SN 670 340, *Teneur en eau*, Norme suisse, VSS, Zürich.
- U.S. ARMY, 1987, *Flexible pavement design for airfields (layered elastic method)*, Department of the Army, Washington D.C., Technical Manual TM 5-825-2-1.
- U.S. ARMY, 1988, *Pavement design for roads, streets and open storage areas, elastic layered method*, Department of the Army, Washington D.C., Technical Manual TM 5-800-09.
- U.S. ARMY, 1990, *Rigid pavement design for airfields, elastic layered method*, Department of the Army, Washington D.C., Technical Manual TM 5-824-2-1.

Curriculum vitae et bibliographie M. Dysli

Autobiographie

Né à Genève, le 4 novembre 1935.

Écoles primaires et secondaires à Genève.

École Polytechnique de l'Université de Lausanne, diplôme génie civil janvier 1960.

Curriculum

1960 - 1971 : ingénieur à la *Société générale pour l'industrie (SGI)* à Genève :

- chef de la section de géotechnique;
- créateur et directeur du centre de calcul de la société;
- travaux hydrauliques : chambres d'équilibre, bassins de compensation, réglage;
- aménagements urbains : infrastructure zones industrielles, fondations de ponts et de bâtiments, parkings souterrains;
- expertises en mécanique des sols et roches : glissements de terrain, tunnels, digues en terre;
- divers travaux à l'étranger : plusieurs cimenteries, lignes électriques et expertises diverses.

1971 - 30 nov. 2000 : chef de section et chargé de cours au *Laboratoire de mécanique des sols de l'École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL)*

2001 à aujourd'hui : A la retraite, mais poursuit des recherches en matière de gel et dégel au *Laboratoire de mécanique des sols de l'EPFL*.

Recherches :

Responsable de la recherche appliquée avec comme domaines principaux (pour plus de détails : bibliographie):

- la recherche en matière de géotechnique routière avec, en particulier, les problèmes de gel,
- la rhéologie des sols,
- la modélisation numérique, avec écriture de nombreux programmes sur ordinateur,
- l'informatique appliquée au génie civil.

Enseignement :

Depuis 1971 : nombreuses charges d'enseignement postgrade EPFL : rhéologie appliquée à la géotechnique, stabilité pentes, aspect sismique des ouvrages souterrains, modélisation du sols, méthode des éléments finis, etc.

1986-87 et 1991-94 : mécanique des sols au 3ème et 4ème semestre des études d'ingénieur civil.

1994-1997 : mécanique des sols, éléments finis et relations contraintes-déformations pour cycles postgrades en géologie appliquée à l'ingénierie et à l'environnement.

2005-2006 : Climatologie pour ingénieurs et architectes ENAC/EPFL, Gel des sols.

Commissions techniques :*Suisse*

- commission de géotechnique de la Société des ingénieurs et architectes, président du groupe « essais en laboratoire » (jusqu'en 1998);
- commission d'informatique de la Société des ingénieurs et architectes, membre fondateur en 1977 (jusqu'en 1994);
- Commission « Géotextiles et géomembranes » de la Société des ingénieurs et architectes (jusqu'en 1995);
- Commission « Techniques de construction » de l'Union des professionnels suisses de la route, président des commissions d'experts : « Essais en laboratoire et classification des sols » (jusqu'en 1999) et « Gel » (jusqu'en 2001), membre des commissions « Essais in situ » et « Géotextiles »; responsabilité de la rédaction d'une vingtaine de normes.

Monde

- sous-comité des programmes de calcul sur ordinateur de la Société internationale de mécanique des sols et des travaux de fondation (jusqu'en 1986);
- comité technique européen ETC5 : Essais en laboratoire, de la Société internationale de mécanique des sols et des travaux de fondation (jusqu'en 1998);
- comité technique TC8 : Gel, de la Société internationale de mécanique des sols et des travaux de fondation (jusqu'en 2001);
- comité européen de normalisation (CEN), TC 250 / SC7 : Géotechnique, expert du groupe de travail (PT) 2 : essais en laboratoire, délégué suisse pour le SC7 (jusqu'en 1997).

Sociétés professionnelles :

- Société suisse des ingénieurs et architectes;
- Union des professionnels suisses de la route;
- Société internationale de mécanique des sols et des travaux de fondations;
- Société internationale de mécanique des roches.

Bibliographie M. Dysli

- 1962** CUENOD M., DYSLI M. - Le réglage de la puissance d'aménagements hydroélectriques avec bassin de compensation de faible volume. Nouvelles Techniques No 11, 1962.
- 1965** GARDET A., DYSLI M. - Essais à l'abrasion de revêtements d'ouvrages hydrauliques. Bull. Tech. Suisse Romande, No 4, 1965.
- 1966** DYSLI M., STEIGER A., AUBRY J., HILTBRAND A. - Aménagement des zones industrielles de la Praille et des Acacias à Genève. Route et Trafic No 3, 1966.
COSMETATOS M., AUBRY J., STEIGER A., DYSLI M., PETHO L. - Voie routière à circulation rapide à la Praille, Genève. Route et Trafic No 3, 1966.
HUSSAIN M., DYSLI M. - Essais dans l'adduction de l'aménagement hydroélectrique de Simmenfluh. Bull. Tech. Suisse Romande, No 25 & 26, 1966.
- 1967** DYSLI M. - Cours FORTRAN IBM 1130. Soc. Gén. pour l'Ind., 1967.
- 1969** DYSLI M., VAISY J. - Stabilité des talus et ordinateur. Bull. Tech. Suisse Romande, No 20, 1969.
DYSLI M., JUFER M. - Cours de calcul matriciel avec applications aux structures et réseaux électriques. Soc. Gén. pour l'Ind., 1969.
- 1970** DYSLI M. - Les fondations des broyeurs de la cimenterie du Havre-Saint-Vigor. Bull. Tech. Suisse Romande, No 4, 1970.
DYSLI M. - Bâtiment et génie civil. Quinz. de l'Informatique, Inst. Nat. Genevois, 1970.
- 1971** DYSLI M. - Pourquoi pas un ICES en Suisse. Bull. Tech. Suisse Romande, No 18, 1971.
- 1973** DYSLI M., FONTANA A. - La stabilité des falaises de St-Jean. Bull. Tech. Suisse Romande, No 1, 1973.
RECORDON E., DYSLI M. - Déformabilité des routes isolées thermiquement. Symp. OCDE, Oslo 1973.
DYSLI M., MAYU P. - Quelques notions fondamentales sur l'analyse minéralogique des argiles. Rapp. int. Labo Méc. Sols EPFL, 1973.
- 1974** DYSLI M. - Contraintes et déformations dans les sols. Cours 3ème cycle EPFL, 1974.
BRUSCHIN J., DYSLI M. - Érosion des rives due aux oscillations du plan d'eau d'une retenue - Le Rhône à l'aval de Genève. Bull. Tech. Suisse Romande, No 2, 1974.
DYSLI M. - La géologie et la mécanique des sols. Publ. No 90 de la Soc. Suisse de Méc. des Sols et des Roches, 1974.

- 1976** DYSLI M. - Gazoduc suisse romand - Aspects géologiques et géotechniques du tracé sous-lacustre. Gaz-Eau-Eaux usées No 6, 1976.
- DYSLI M. - Pieux moulés dans un sol argileux sous charges verticales et latérales. VIème Congr. Eur. Méc. Sols et Trav. Fond., Vienne, 1976.
- DYSLI M., MATTENBERG P. - Informatique appliquée au génie civil et au bâtiment. Bull. Tech. Suisse Romande, No 20, 1976.
- DYSLI M. - Utilisation des ordinateurs en géotechnique. Publ. No 94 de la Soc. Suisse de Méc. des Sols et des Roches, 1976.
- DYSLI M., GROLIMUND J.-P. - Isolation thermique des chaussées. Rapp. rech. du Départ. Féd. de l'Intérieur, Office des Routes, 1976.
- DYSLI M. - Déformations superficielles des sols soumis à des essais de charge avec plaques circulaires rigides. Rapport de rech. du Départ. Féd. de l'Intérieur, Office des Routes, 1976.
- 1977** DYSLI M. - Swiss use of the computer in soil mechanics. Spec. Session No 9 of the 9th Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng., Tokyo, 1977.
- DYSLI M. - Rhéologie appliquée à la géotechnique. Cours 3ème cycle EPFL, 1977.
- 1978** DYSLI M. - Les essais de chargement des pieux. Publ. No 99 de la Soc. Suisse de Méc. des Sols et des Roches, 1978.
- DYSLI M. - La nouvelle halle fosses et l'École polytechnique fédérale de Lausanne. Bull. Tech. Suisse Romande, No 7, 1978.
- DYSLI M. - Die neue Gruben-Halle der ETHL. Strasse und Verkehr, N° 8, 1978.
- DYSLI M. - Stabilité des pentes, documents de cours. Cours 3ème cycle EPFL, 1978.
- 1979** DYSLI M. - Fondation entièrement stabilisée aux liants hydrauliques. XVIème Cong. Int. Route, Vienne, 1979.
- DYSLI M., FONTANA A., RYBISAR J. - Enceinte en paroi moulée dans les limon argileux, calculs et observations. VIIème Congr. Eur. Méc. Sols et Trav. Fond., Brighthon, 1979.
- DYSLI M. - Isolation thermique des chaussées à trafic moyen. Route et Trafic No 11, 1979.
- DYSLI M. - Évolution ou révolution du hardware. Schweizer. Ing. und Arch. Nr. 50, 1979.
- PFISTER R., DYSLI M., RECORDON E. – Influence du milieu ambiant sur la force portante d'une chaussée, rapport final, 1e partie. Rapport de rech. du Départ. Féd. des Transp., des Commun. et de l'Énergie, Office des Routes, 1979.
- 1980** DYSLI M., PFISTER R. - Tentative de quantification de la perte de portance au dégel. Route et Trafic, No 10, 1980.

- 1981** DYSLI M., RECORDON E. - Fluage des formations argileuses alpines. 10ème Congr. de la Soc. Int. Méc. des Sols et Trav. Fond., Stockholm, 1981.
DYSLI M. - Tendances actuelles dans l'usage des modèles mathématiques en géotechnique. Publ. No 105 de la Soc. Suisse de Méc. des Sols et des Roches, 1981.
DYSLI M., STUDER J. - Ouvrages souterrains, aspects sismiques. Cours 3ème cycle EPFL, 1981.
- 1982** DYSLI M., PFISTER R. - Test of bearing capacity during thaw. Frost i Jord (Norway), No 24, 1982.
DYSLI M., FONTANA A. - Deformations around the excavation in clayey soil. Int. Symp. on Numerical Models in Geomechanics, Zürich, 1982.
DYSLI M., ENGEL T. - Influence du microclimat sur les superstructures routières. Route et Trafic No 7, 1982.
DYSLI M., ENGEL T. - Einfluss des Mikroklimas auf den Oberbau. Strasse und Verkehr, Nr. 8, 1982.
DYSLI M., PIGOIS M., JACCOT A. - Méthodes de mesure et d'interprétation pour les essais routiers en vraie grandeur. Colloque Int. Essais Routiers en Vraie Grandeur, Zurich, 1982.
DYSLI M. - Swiss philosophy and developments concerning the loss of bearing capacity during thaw. Int. Symp. on bearing Capacity of Roads and Airfields, Trondheim, 1982.
DYSLI M. - Gel en milieu poreux. Coll. Transfert de chaleur en milieu poreux non saturé, Lausanne, 1982.
- 1983** DYSLI M., FETZ L., SCAZZIGA I. - La révision de l'essai ME. Route et trafic, No 3, 1983.
DYSLI M., FETZ L., SCAZZIGA I. - Die Revision des ME-Versuches. Strasse und Verkehr, Nr. 3, 1983.
DYSLI M. - Use of ADINA in soil mechanics with case studies for excavations. Computers and Structures, Vol. 16, 1983.
DYSLI M. - Some practical considerations on pile diaphragm wall instrumentation. Int. Symp. on Field Measurements in Geomechanics, Zurich, 1983.
DYSLI M. - Problèmes de gel. XVIIème Cong. Int. Route, Sydney, 1983.
- 1984** DYSLI M., BOURDEAU P. - Influence du milieu ambiant sur la force portante d'une chaussée; 3ème partie: synthèse. Rapport de rech. No 79 du Départ. Féd. des Transp., des Commun. et de l'Énergie, Office des Routes, 1984.
DYSLI M., RECORDON E. - Landslides Analyzed as Viscous Flow. IVth Int. Symp. on Landslides, Toronto, 1984.
DYSLI M. - Le module ME et les autres. Route et trafic, No 9, 1984.

- 1985** DYSLI M. - Usage pratique de modèles couplés. 11ème Congr. de la Soc. Int. Méc. des Sols et Trav. Fond., San Francisco, 1985.
 DYSLI M. - The practical use of coupled models in soil mechanics. Computers & Structures, Vol. 21, 1985.
 DYSLI M., DESPOND J.-M. - Essais en vraie grandeur au gel et dégel. Route et Trafic, N° 10, 1985.
- 1986** DYSLI M., RYBISAR J. - Deux banques de données géotechniques. Route et Trafic No 6, 1986.
 DYSLI M., ENGEL T., MARTINENGGHI T. - Effet du microclimat sur les superstructures routières. Rapp. de rech. No 123 du Dép. Féd. des Transp., des Comm. et de l'Énergie, Office des Routes, 1986.
- 1987** DYSLI M., RYBISAR J. - Surface de la nappe et éléments finis. IXème Congr. Eur. Méc. Sols et Trav. Fond., Dublin, 1987.
 DYSLI M. - Révision des normes de dimensionnement au gel. Rapport de rech. No 145 du Départ. Féd. des Transp., des Commun. et de l'Énergie, Office des Routes, 1987.
- 1988** DYSLI M. - L'indice de radiation. Der Strahlungsindex. Route et Trafic, No 4, 1988.
 DYSLI M., ALLENBACH T. - Normalisation de l'essai de gonflement au gel et révision de l'essai CBR3. Rapport de rech. No 156 du Départ. Féd. des Transp., des Commun. et de l'Énergie, Office des Routes, 1988.
 DYSLI M. - Effet de pépite dans la fonction d'autocorrélation et le variogramme. Symp. on Reliability-based Design in Civil Eng., Lausanne, 1988.
 LEFEBVRE H., DYSLI M. - Effet du gel sur les superstructures routières avec fondation en matériaux concassés. Rapport de rech. No 165 du Départ. Féd. des Transp., des Commun. et de l'Énergie, Office des Routes, 1988.
 DYSLI M., RYBISAR J. - Coupled models and free surface seepage analysis without mesh iteration. 6th Int. Conf. on Numerical Methods in Geomechanics, Innsbruck, 1988.
 DYSLI M., FONTANA A. - Déformations autour des excavations en terrain compressible. Ingénieurs et Architectes Suisses, No 12, 1988.
 DYSLI M., VULLIET L. - Mesure quantitative de l'érosion de berges. 5ème Symp. Int. sur les gliss. de terrain, Lausanne, 1988.
- 1989** DYSLI M. - The radiation index. Int. Symp. on Frost in Geotech. Eng., Saariselkä, Finland, 1989.
 DYSLI M. - 17 ans d'observation et de mesures sur l'érosion et la stabilité des berges de la retenue de Verbois. Journées d'étude CEIFICI : Quels problèmes pour quels barrages. Paris, 1989.

- 1990** DYSLI M., FONTANA A., PARRIAUX A., SCHLUECHTER C. - Une classification géologique des sols suisses. Route et trafic No 1, 1990.
- DYSLI M. - Modélisation du sol. Cours cycle postgrade en génie urbain, EPFL, 1990.
- DYSLI M., FONTANA A., PARRIAUX A., SCHLUECHTER C. - Eine geologische Klassifikation schweizerischer Lockergesteine. Strasse und Verkehr Nr 12, 1990.
- THOREL L., DYSLI M. - Normalisation d'un nouvel essai de détermination de la sensibilité au gel. Rapp. de rech. No 207 du Dép. Féd. des Transp., des Comm. et de l'Énergie, Office des Routes.
- DYSLI M. - Le gel : une rapide désaturation des sols. Colloque sur les sols non saturés, 22 et 23 nov. 1990, Lausanne.
- 1991** DYSLI M. - Le gel et son action sur les sols et les fondations. Presse polytechnique et universitaire romande, 250 p., 1991. Prix Henri-Courbot 1993 et finaliste au prix Roberval 1992.
- DYSLI M. - Utilisation de matériaux géosynthétiques. XIXe Congrès mondial de la route, rapport suisse, Marrakech, sept. 1991.
- DYSLI M. - Resilient modulus of freeze-thaw or resilient frost heave. 6th Int. Symp. on Ground Freezing, Beijing, Sept. 1991.
- DYSLI M., BOCCARD T. - Synthèse essais en vraie grandeur et normes sur le gel. Rapp. de rech. No 230 du Dép. Féd. des Transp., des Comm. et de l'Énergie, Office des Routes.
- KHARCHAFI M., DYSLI M. - Géotextiles utilisés en tant qu'armatures : approche expérimentale sur modèle réduit du renforcement des talus et des soutènements par géotextiles. Rapp. de rech. No 232 du Dép. Féd. des Transp., des Comm. et de l'Énergie, Office des Routes.
- DYSLI M. - Utilisation de matériaux géosynthétiques. Route et trafic No 12, déc. 1991.
- 1992** KHARCHAFI M., DYSLI M. - Untersuchungen über geotextil-verstärkte Bauwerke. K_GEO92, Luzern, Mai 1992.
- DYSLI M. et al - Modélisation du sol. Cycle postgrade en génie urbain, EPFL.
- DYSLI M., RYBISAR J. - Statistique sur les caractéristiques des sols suisses. Rapp. de rech. No 244 du Dép. Féd. des Transp., des Comm. et de l'Énergie, Office des Routes.
- DYSLI M. - Quelques particularités et nouveautés sur le gel. Journée LAVOC, 16 sept. 1992, Lausanne.
- DYSLI M., RYBISAR J. - Indices de gel 1956 - 1990. Rapp. de rech. du Dép. Féd. des Transp., des Comm. et de l'Énergie, Office des Routes.
- DYSLI M. - Compléments au cours de mécanique des sols de l'EPFL, 2ème édition, nov. 1992.
- DYSLI M. - Planches d'essais N9 Ardon, mesures météorologiques juillet 1989 à août 1993. Rapport pour Service des routes nationales du canton du Valais, nov. 1993.

- 1993** KHARCHAFI M., DYSLI M. - Study of soil-Geotextile interaction by an X-Rax method. Geotextile and Geomembrane Vol. 12, 1993.
- KHARCHAFI M., DYSLI M. - Géotextiles utilisés en tant qu'armatures, essais en vraie grandeur. Rapp. de rech. No 283 du Dép. Féd. des Transp., des Comm. et de l'Énergie, Office des Routes, juin 1993.
- DYSLI M. - Where does the water go during ice lense thaw. Frost in Geotechnical Engineering, Anchorage, Alaska, July 1993.
- DYSLI M. - Compléments au cours de mécanique des sols de l'EPFL, 3ème édition, sept. 1993.
- DYSLI M. – Planches d'essais N9 Ardon, mesures météorologiques juillet 1989 à août 1993. Rapport pour Service des routes nationales du canton du Valais, nov. 1993.
- 1994** KHARCHAFI M., DYSLI M. - Comportement des talus renforcés par géotextiles. XIII Int. Conf. on Soil Mechanics & Foundation Engineering, New Dehli, India, Jan. 1994.
- DYSLI M. - Indices de gel 1928-90 en Suisse / Frostindices 1928-90 in Schweiz. Route et trafic No 3, 1994.
- KHARCHAFI M., DYSLI M. - Mechanical performances of two experimental full-scale embankments reinforced by geotextiles. 5th Int. Conf. on Geotextiles, Geomembranes and related Products, Singapore, Sept. 1994.
- 1995** DYSLI M. - Normalisation européenne relative aux essais en laboratoire et in situ. Publ. de la Société Suisse de Mécanique des Sols et des Roches No 131, Avril 1995.
- DYSLI M. - Etat des normes suisses en matière d'essais en laboratoire. Publ. de la Société Suisse de Mécanique des Sols et des Roches No 131, Avril 1995.
- DYSLI M. - Statistical analysis of glacial soils. XI European Conf. on Soil Mechanics & Foundation Engineering, Copenhagen, May 1995.
- 1996** ASHMAWY A.K., BOURDEAU P.L., DYSLI M. - Behaviour of geotextile-reinforced soils under cyclic loading. Rapp. de rech. No 362 du Dép. Féd. des Transp., des Comm. et de l'Énergie, Office des Routes.
- 1997** DYSLI M., LUNARDINI V., STENBERG L. - Related effects on frost action: Freezing and Solar radiation indices. Intern. Symp. on Ground Freezing and Frost Action in Soils, Luleå, April 1997.
- DYSLI M. Les pergélisols alpins et les glaciers rocheux. Gebirgspermafrost und Blockgletscher. Revue Les Alpes, no 12, 1997.
- AL & DYSLI M. – CEN ENV 1997-2 Eurocode 7 : Geotechnical design Part 2, Design assisted by laboratory testing. European Committee for Standardization, 112 p., Bruxelles.
- 1998** DYSLI M. - Loss of bearing capacity of roads during thaw and debris flows in mountain permafrost: the same phenomenon. Proc. of the Conf. on Permafrost and actions of natural and artificial cooling , Paris - Orsay; October 1998.
- AL & DYSLI M. - Recommendations of the ISSMGE for Geotechnical Laboratory Testing. Beuth, 340 p.

- 1999** DYSLI M. - Le dimensionnement du terrain et de l'infrastructure ; la révision de la norme SN 640 317b. Route et trafic no 2, février 1999.
- ASHMAWY A. K., BOURDEAU Ph. L., DRNEVICH V. P., DYSLI M. - Cyclic Response of Geotextile Reinforced Soil. Soils and Foundations 39, pp. 43-52 ; February 1999.
- DYSLI M. - Amélioration des sols et protection de l'environnement. Proc. 12th Eur. Conf. on Soil Mech. and Geot. Eng.. ECSMGE, Amsterdam (Invited lecture), Balkema // 3, pp. 1439-1444 ; June 1999.
- DYSLI M. - Quelques nouveautés en matière d'effet du gel sur les chaussées et les constructions. Sommet mondial de la nordicité, Ministère des transports du Québec, Canada, 1999.
- 2000** DYSLI M. - SN 640 034a : Signes conventionnels géotechniques / Geotechnische Signaturen. Route et trafic no 3, mars 2000.
- DYSLI M. - SN 670 009 : Terminologie géologique des terrains meubles / Geologische Terminologie der Lockergesteine. Route et trafic no 3, mars 2000.
- DYSLI M. - SN 670 010b : Coefficient caractéristiques des sols / Bodenkennziffern. Route et trafic no 3, mars 2000.
- DYSLI M. - Eurocodes ENV 1997-2 : essais en laboratoire et 1997-3 : essais in situ / Eurocodes ENV 1997-2 : Laborversuche für geotechnische Bemessung und 1997-3 : Felduntersuchungen für geotechnische Bemessung. Route et trafic no 3, mars 2000.
- DYSLI M. - 25 ans de développements en matière de gel. Publ. de la Société Suisse de Mécanique des Sols et des Roches no 141.
- 2001** DYSLI M. - Evolution des normes de dimensionnement au gel. Route et Trafic 5/2001.
- DYSLI M., BOMBELI Ph. - Contrôle du compactage des fouilles en tranchée par pénétromètre dynamique léger. Rapp. de rech. No 497 du Dép. féd. de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication, Office des Routes, mai 2001.
- DYSLI M. - Recherche bibliographique et synthèse des corrélations entre les caractéristiques des sols. Rapp. de rech. No 496 du Dép. féd. de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication, Office des Routes, juillet 2001.
- 2002** Al. & DYSLI M. - Utilisation des matériaux d'excavation de tunnels dans le domaine routier. Rapp. de rech. No 1006 du Dép. féd. de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication, Office des Routes, mars 2002.
- DYSLI M. - Contrôle du compactage des fouilles en tranchée par pénétromètre dynamique. Route et trafic no 7/8, juillet / août 2002.
- 2003** DYSLI M. - Scaling of the supersaturation by a simple test. Proc. 8th Int. Conf. on Permafrost, Zurich, July 2003.

