Département fédéral des transports, des communications et de l'énergie
Office fédéral des routes

Normalisation de l'essai de gonflement au gel

et

Révision de l'essai CBR_3

Normierung des Frosthebungsversuches und Revision des CBR_3 - Versuches

Laboratoire de mécanique des sols de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne

Mandats de recherche 20/84 et 11/86 sur proposition de l'Union des professionnels suisses de la route

Mai 1988

TABLE DES MATIERES

	page
RESUME	3
ZUSAMMENFASSUNG	5
RIASSUNTO	7
1. MANDAT ET BUTS	9
2. ESSAIS AU GEL A L'ETRANGER	11
2.1 Préambule	11
2.1.1 Essais indirects	11
2.1.2 Essais directs	12
2.1.3 Degrés de gélivité	13
2.2 Essai CRREL	15
2.3 Essai CRREL II	20
2.4 Essai UNH	22
2.5 Essai LCPC	25
2.6 Essai TRRL/SRU	28
2.7 Essai TRRL/PFC	32
2.8 Essai VTI	34
2.9 Autres essais	36
2.10 Remarques générales	37
3. PROGRAMME DE LA RECHERCHE	39
3.1 Programme général	39
3.2 Matériaux	39
3.3 Essais selon procédures actuelles	41
3.4 Essais selon nouvelle procédure	42
4. CBR_3 SELON PROCEDURES ACTUELLES	43
4.1 Modes opératoires	43
4.2 Résultats	49
4.2.1 Saturation	49
4.2.2 Période du gel-dégel	53
4.2.3 Poinçonnement CBR	57
4.3 Critique	67
4.3.1 Préambule	67
4.3.2 Procédures	67
4.3.3 Appareillage	69

5. GONFLEMENT AU GEL SELON PROCEDURES ACTUELLES 73
5.1 Modes opératoires 73
5.2 Résultats 76
5.2.1 Résultats généraux 76
5.2.2 Analyse des lentilles de glace 81
5.2.3 Gonflement en fonction du temps 84
5.3 Critique 87
5.3.1 Procédures 87
5.3.2 Appareillage 88

6. NOUVEL ESSAI (CBR_3 et GONFLEMENT) 89
6.1 Cahier des charges 89
6.2 Appareillage 90
6.2.1 Description de l'appareillage 90
6.2.2 Principe de la cellule Peltier 93
6.3 Mode opératoire 95
6.4 Résultats: comparaison avec les essais actuels 97
6.4.1 Saturation 97
6.4.2 Gel-dégel 99
6.4.3 Poinçonnement CBR 104
6.5 Autres résultats 111
6.5.1 Propagation du front de gel 111
6.5.2 Flux de chaleur brut 113
6.5.3 Gradient de température 114
6.5.4 Lentilles de glace 117
6.6 Critique 123
6.6.1 Préambule 123
6.6.2 Mode opératoire 123
6.6.3 Dispositif de gel 124
6.6.4 Moule et son embase 126
6.7 Critères associés 126

7. CONCLUSIONS 129

8. BIBLIOGRAPHIE 133

RESUME

Ce rapport est l'aboutissement de deux mandats de recherche confiés au Laboratoire de mécanique des sols de l'EPFL par l'Office fédéral des routes. Le premier devait contribuer à la **normalisation de l'essai de gonflement au gel** et le second tenter d'**améliorer l'essai CBR3** décrit par la norme SN 670'320a.

Des essais de gonflement au gel sont régulièrement réalisés en Suisse selon des procédures assez semblables mais non normalisées; en outre, la dimension de l'éprouvette ne permet pas l'essai de matériaux grossiers sans réduction de leur granulométrie. Quant à l'essai CBR3, il présente deux défauts majeurs: la trop grande vitesse de propagation du front de gel dans l'éprouvette avec la procédure dite rapide, qui est la plus utilisées, et l'emploi d'un moule en acier qui crée un pont thermique perturbateur.

Ces deux recherches ont été liées car les études préliminaires ont montré que ces deux essais pouvaient être entrepris avantageusement avec le même dispositif d'essai.

La **première partie** (chapitre 2) de ce rapport est consacrée à une étude critique des essais de détermination de la sensibilité au gel réalisés à l'étranger. Elle a montré que les tendances actuelles dans ce domaine étaient: l'utilisation d'un moule d'assez grande dimension permettant de tester la plupart des sols et matériaux routiers sans réduction de la granulométrie, la construction du moule en matière isolante (plastique), des mesures pour limiter le frottement contre les parois du moule pendant le gonflement de l'éprouvette, et le refroidissement du sommet de l'éprouvette par un dispositif en contact direct avec cette dernière (plaque métallique réfrigérée par un fluide ou cellule Peltier).

La **deuxième partie** (chapitres 3,4 et 5) est consacrée aux tests systématiques et comparatifs entrepris avec les procédures actuelles de l'essai de gonflement et de l'essai CBR3. Ces essais, comme ceux entrepris pour la mise au point du nouvel dispositif d'essai, ont été réalisés sur trois sols types: une grave II, un gravier argileux que nous avons dénommé "grave III" et un limon argileux.

Les **essais CBR3** réalisés selon les procédures actuelles ont notamment permis de faire d'intéressantes constatations sur la saturation des éprouvettes et diverses corrélations avec les valeurs CBR3; ils ont confirmé le fait que la procédure rapide mesurait mal la sensibilité au gel des matériaux testés.

Les **essais de gonflement** exécutés selon les procédures des deux EPF ont surtout permis de comparer objectivement ces deux procédures qui diffèrent sur bien des points; ils ont notamment montré que le gonflement total n'était pas un bon critère de gélivité.
Enfin, la **troisième partie** de ce rapport (chapitre 6) est consacrée à la description du **nouvel essai proposé**, aux résultats de son expérimentation, et à la critique de l'appareillage.
L'appareillage développé n'est prévu que pour une seule éprouvette. Elle est placée dans un moule CBR en époxy soigneusement isolé latéralement par une double enceinte. La source de froid, en contact direct avec l'éprouvette, est constituée par une cellule Peltier qui agit comme une pompe à chaleur et produit ainsi un flux de chaleur plus ou moins constant plutôt qu'une température donnée. Le circuit d'eau à 4°C est tout d'abord utilisée pour maintenir à température constante le côté chaud de la cellule Peltier; elle ruisselle ensuite entre les deux enceintes isolantes jusqu'au bain à niveau constant du pied de l'éprouvette. C'est un dispositif très compact qui se pose sur une table de laboratoire.
Les essais réalisés avec ce nouveau dispositif ont permis d'établir une procédure qui ne dure que cinq jours. Ils ont montré que les deux résultats utilisables pour la détermination de la sensibilité au gel sont le **gonflement résiduel** après un cycle de gel-dégel et, nous le savions déjà, le **coefficient CBR** (CBR_3) obtenu par poinçonnement de l'éprouvette dégelée. Pour les sols types utilisés, la corrélation entre leur gonflement résiduel et le coefficient CBR_3 est très bonne et il pourrait le remplacer à l'avenir.
Ces essais ont démontré que le principe de ce nouvel essai, combinant l'essai de gonflement et la mesure de la capacité portante après un cycle de gel-dégel, était bon et suivait, en particulier, les recommandations de l'AICPR en la matière. L'appareillage proposé n'a cependant pas répondu à nos espoirs: une cellule Peltier comme source de froid n'est pas la bonne solution, le pouvoir isolant de l'embase du moule en PVC perturbe l'essai et la rigidité du moule en époxy est trop faible par rapport au moule standard en acier. Un nouveau dispositif corrigeant ces défauts devra donc encore être réalisé et testé.

ZUSAMMENFASSUNG

Dieser Bericht ist das Ergebnis der zwei Forschungsaufträge, die das "Laboratoire de mécanique des sols de l'EPFL" vom Bundesamt für Strassenbau erhielt. Der erste Forschungauftrag bezog sich auf die **Normierung des Frosthebungsversuches**, der zweite auf eine **Revision des CBR3-Versuches**, beschrieben in der Norm SN 670'320a.
Frosthebungsversuche werden in der Schweiz regelmässig ausgeführt, wobei die Versuchsanordnung ähnlich, aber nicht normiert ist. Zudem erlaubt die Probengrösse keine Versuche mit grobkörnigen Böden, es sei denn, das Grobkorn werde eliminiert. Der CBR3-Versuch weist zwei Hauptmängel auf: Die Frosteindringgeschwindigkeit beim meist angewandten "raschen Gefrieren" ist zu gross und durch die Verwendung eines Stahltopfes resultiert eine störende Kältebrücke.
Diese beiden Forschungen wurden zusammengelegt, da einleitende Studien ergaben, dass die zwei Versuche mit der gleichen Versuchsapparatur durchgeführt werden können.
Der **erste Teil** (Kapitel 2) dieses Berichtes ist den Versuchen gewidmet, die im Ausland durchgeführt werden. Das Studium der Literatur hat folgende Tendenzen aufgezeigt: Die Dimensionen des Versuchtopfes erlauben, die meisten Böden und Strassenbaumaterialien mit unveränderter Granulometrie zu testen, der Topf besteht aus isolierendem Material (Kunststoff), die Reibung, die während der Frosthebung zwischen dem Topf und der Versuchsprobe auftritt, wird durch konstruktive Massnahmen begrenzt und das Gefrieren der Versuchsprobe erfolgt mittels eines direkt auf der Versuchsprobe aufliegenden Dispositifs (flüssigkeitsgekühlte Metallplatte oder Peltier-Element).
Im **zweiten Teil** (Kapitel 3,4 und 5) werden die systematischen Tests rapportiert, wobei die heutigen Versuchsprozeduren der Frosthebungs- sowie der CBR3-Versuche verglichen werden. Für diese Versuche und auch für jene mit den entwickelten Prototypen wurden drei Bodentypen verwendet: ein Kiessand II, ein toniger Kies und ein toniger Silt. Die nach heutiger Versuchsanordnung realisierten **CBR3-Versuche** führten zu interessanten Feststellungen betreffend die Sättigung der Versuchsproben. Weiter wurde für verschiedene Parameter eine Korrelation mit dem CBR3-Wert gefunden. Die Versuche haben bestätigt, dass die Prozedur "rasches Gefrieren" die Frostempfindlichkeit des geprüften Bodens schlecht misst. Die **Frosthebungsversuche** erlaubten, die beiden Prozeduren, die an den zwei ETH durchgeführt werden und sich in manchen Punkten unterscheiden, objek-

tiv zu vergleichen. Insbesondere hat es sich gezeigt, dass die totale Frosthebung kein gutes Kriterium ist zur Bestimmung der Frostempfindlichkeit.
Der **dritte Teil** (Kapitel 6) dieses Berichtes ist dem **neuen Versuch**, den wir vorschlagen, gewidmet. Er umfasst eine Beschreibung von Apparatur und durchgeführter Prozedur, die Präsentation der mit den Prototypen erhaltenen Resultate sowie eine Kritik der Versuchsapparatur.
Die entwickelte Apparatur ist nur für eine einzige Versuchsprobe vorgesehen, ist sehr kompakt und hat auf einem Labor-Tisch Platz. Die Probe befindet sich in einem CBR-Topf aus glasfaserverstärktem Epoxidharz und ist seitlich sorgfältig thermisch isoliert. Die Kältequelle, bestehend aus einem Peltier-Element, befindet sich in direktem Kontakt mit der Probe. Das Peltier-Element, eine thermoelektrische Wärmepumpe, erzeugt nicht eine bestimmte Minus-Temperatur, sondern einen mehr oder weniger konstanten Wärmefluss. Das 4°C warme, in einem offenen Kreislauf zirkulierende Wasser, hält zuerst die warme Seite des Peltier-Elementes bei einer konstanten Temperatur und rinnt anschliessend ins untere, ein konstantes Niveau aufweisende Wasserbad, in dem der Versuchskörper steht.
Die mit der neuen Versuchsapparatur durchgeführten Versuche erlaubten, eine Prozedur festzulegen, die nur fünf Tage dauert. Sie haben gezeigt, dass zur Bestimmung der Frostempfindlichkeit zwei Kennwerte verwendet werden können: Die **bleibende Hebung** nach einem Frost-Tau-Zyklus und - das ist nichts Neues - der **CBR-Koeffizient**, bestimmt an der aufgetauten Versuchsprobe (CBR_3). Schliesslich konnte eine Beziehung gefunden werden zwischen der bleibenden Hebung und dem CBR_3-Wert, welche für alle drei untersuchten Bodentypen gültig ist. Die bleibende Hebung könnte in Zukunft den CBR-Wert ersetzen.
Das Prinzip des neuen Versuches, nämlich die Kombinierung des Frosthebungsversuches mit dem CBR_3-Versuch, ist also gut. Auch werden die Empfehlungen des AICPR befolgt. Die Versuchsapparatur hingegen hat unsere Hoffnungen nicht erfüllt: Die Verwendung eines Peltier-Elementes als Kältequelle erwies sich nicht als die richtige Lösung, die isolierende Wirkung der Grundplatte des Versuchstopfes aus PVC beeinflusste die Versuche negativ, und wegen der verminderten Steifigkeit des Kunstoff-Topfes wiesen die Versuchsproben kleinere Rohdichten auf. Eine neue Versuchsapparatur ohne diese Mängel muss also noch gebaut und anschliessend getestet werden.

RIASSUNTO

Questo rapporto è il risultato finale di due mandati ricerca affidati al laboratorio di meccanica dei terreni dell'EPFL dall'ufficio federale delle strade. Il primo mandato doveva contribuire alla **normalizzazione della prova di rigonfiamento** al gelo e il secondo doveva tentare di migliorare la prova CBR3 descritta nella norma SN 670'320a.
Prove di rigonfiamento al gelo sono eseguite regolamente in Swizzera secondo procedure somigliantesi ma non standardizzate; inoltre la dimensione del provino non è tale da permettere la prova di materiali grossolani senza che la loro granulometria sia ridotta. Per ciò che riguarda la prova CBR3, essa presenta due errori principali : la velocità di propagazione del fronte del gelo nel provino è troppo elevata per la procedura definita rapida più comunemente utilizzata, e l'utilizzo di una cella in acciaio crea un ponte termico perturbatore.
Queste due ricerche sono state legate l'un l'altra perchè gli studi preliminari avevano mostrato che le due prove potevano essere avvantaggiosamente condotte con lo stesso dispositivo di prova.
La **prima parte** (capitolo 2) di questo rapporto è consacrata a uno studio critico delle prove di determinazione della sensibilità al gelo realizzate all'estero. Essa ha evidenziato come le tendenze attuali siano : l'utilizzo di una cella di dimensioni tali da poter sottopore a prova la maggiorparte dei terreni e materiali stradali senza riduzione della loro granulometria, la costruzione di una cella in materiale isolante (plastica), tale da limitare l'attrito contro le pareti della cella durante il rigonfiamento del provino, e infine l'impiego per il raffreddamento della sommità del provino, di un dispositivo a contatto diretto con quest'ultimo (piastra metallica raffreddata mediante un fluido o cellula Peltier).
La **seconda parte** (capitoli 3,4,5) è dedicata alle prove sistematiche e comparative eseguite con le procedure attuali della prova di rigonfiamento al gelo e della prova CBR3. Queste prove, come quelle intraprese per la messa a punto del dispositivo di prova proposto, sono state realizzate su tre suoli tipo : una ghiaia II, una ghiaia argillosa che abbiamo denominato "ghiaia III" e un limo argilloso.
Le **prove CBR3** realizzate secondo le procedure attuali hanno permesso in particolare di fare delle constatazioni interessanti sul grado di saturazione dei provini e di determinare diverse correlazioni con valori CBR3; esse hanno rievidenziato

come il procedimento rapido misuri male la sensibilità al gelo dei materiali studiati.
Le **prove di rigonfiamento** al gelo eseguite secondo le procedure delle due PFZ hanno permesso sopratutto le comparazione obiettiva di queste due procedure che differiscono tra loro per numerosi aspetti. Hanno inoltre mostrato come il rigonfiamento totale non sia un buon criterio di stima della gelività.
Infine, la **terza parte** di questo rapporto (capitolo 6) è consacrata alla descrizione della nuova prova proposta, ai risultati della sua sperimentazione e alla critica dell'attrezzatura impiegata.
Il dispositivo di prova sviluppato è previsto per un solo provino. Questo è piazzato in una cella CBR in epoxy perfettamente isolata lateralmente mediante una doppia parete. La fonte fredda a contatto diretto con il provino, è costituita da una cellula Peltier che agisce come una pompa di calore ed instaura, al posto di una temperatura data, un flusso di calore più o meno constante. Il circuito d'acqua a 4°C é innanzitutto utilizzato per mantenere a temperatura constante il lato caldo della cellula Peltier ed inoltre ruscella tra le due pareti isolanti fino al livello costante della base del provino. E un dispositivo molto compatto che può essere posato su un tavolo di laboratorio.
Le prove eseguite con questo nuovo dispositivo hanno permesso di stabilire una procedura che non dura più di cinque giorni. Esse hanno mostrato come i due risultati utilizzabili per la determinazione della sensibilitá al gelo siano il **rigonfiamento residuo** dopo un ciclo gelo-disgelo, e come già noto, il **coefficiente CBR** (CBR3) ottenuto per punzonamento del provino sgelato. Per i terreni tipo utilizzati, la correlazione tra il loro rigonfiamento residuo e il coefficiente CBR3 è molto buona e potrebbe rimpiazzare quest'ultimo.
Queste prove hanno indicato come il principio di questa nuova prova, combinante la prova di rigonfiamento e la misura della capacità portante dopo un ciclo gelo-disgelo, sia buono e come esso segua, in particolare, le raccomandazioni in materia dell' AICPR. L'apparecchiatura di prova proposta non ha tuttavia corrisposto alle nostre speranze : una cellula Peltier come sorgente fredda non è la buona soluzione dato che il potere isolante della cella in PVC perturba la prova e dato che la rigidità della cella in epoxy è troppo scarsa in rapporto alla cella standard in acciaio. Un nuovo dispositivo, capace di correggere e superare questi errori deve quindi essere ancora realizzato e sperimentato.

1 MANDATS ET BUTS

Ce rapport est l'aboutissement de deux mandats de recherche confiés au Laboratoire de mécanique des sols (LMS) de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL) par l'Office fédéral des routes (OFR) du Département fédéral des transports, des communications et de l'énergie. La première recherche dénommée **"Normalisation de l'essai de gonflement au gel"** a fait l'objet d'un premier crédit de recherche, No 6/82, de Fr. 30'000.- accordé au LMS par lettre de l'OFR du 21 avril 1982, puis d'un crédit de poursuite des travaux, No 20/84, de Fr. 20'000.- accordé le 12 novembre 1984. La seconde dénommée **"Révision de l'essai CBR3"** a fait l'objet d'un premier crédit, No 16/83, de Fr. 40'000.- accordé par lettre de l'OFR du 7 novembre 1983 et d'un crédit de poursuite des travaux, No 11/86, de Fr. 30'245.- accordé le 1er octobre 1986.
Un rapport intermédiaire a été publié en novembre 1983 dans le cadre de la recherche sur la normalisation de l'essai de gonflement au gel, et un rapport préliminaire sur la révision de l'essai CBR3, daté de octobre 1982, a précédé l'attribution du mandat de recherche.
Le but de la recherche sur la **normalisation de l'essai de gonflement au gel** est inscrit dans son nom; cet essai est, en effet, exécuté régulièrement en Suisse par quelques laboratoires avec des procédures assez semblables mais non normalisées. Sa normalisation est donc nécessaire, d'autant plus qu'il est relativement simple à exécuter et qu'il pourra ainsi être entrepris facilement par d'autres laboratoires.
Le principal but de la **révision de l'essai CBR3**, seul essai normalisé en Suisse pour la détermination de la sensibilité au gel des sols, est la modification des procédures actuelles qui ne donnent pas entière satisfaction. Les deux défauts majeurs de cet essai sont la trop grande vitesse de propagation du front de gel avec la procédure dite "rapide" et l'emploi d'un moule en acier, qui crée un pont thermique cause de conditions thermiques dans l'éprouvette totalement différentes de la réalité.

Ces deux recherches ont été liées dès 1985 car les études préliminaires ont montré que ces deux essais pouvaient être réalisés avec le même dispositif, l'un à la suite de l'autre.

2 ESSAIS AU GEL A L'ETRANGER

2.1 PREAMBULE

Dans le monde, de nombreux essais au gel sont exécutés pour déterminer la sensibilité au gel, parfois nommée susceptibilité au gel ou gélivité. La sensibilité au gel d'un matériau d'une infrastructure ou d'une superstructure routière peut être définie comme étant la propriété d'un sol à favoriser l'écoulement de l'eau interstitielle vers le front de gel et à permettre le développement de lentilles de glace dans certaines conditions thermiques.
Il est admis qu'il existe une corrélation entre la sensibilité au gel 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 et des conditions de drainage lors du dégel.
La sensibilité au gel 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 sensibilité au gel et certains paramètres classiques obtenus par des essais standards qui peuvent être divisés en essais indirects et en essais directs:

2.1.1 Essais indirects

Dans les essais indirects, on admet qu'il existe une corrélation entre une propriété du sol, autre que sa résistance au cisaillement et son gonflement au gel, et sa sensibilité au gel. Les principaux essais de ce type sont:

Analyse granulométrique

La quantité des particules fines est souvent utilisée comme critère de sensibilité au gel d'un sol. Le critère de Casagrande est le plus connu: Un sol est gélif s'il contient plus de x % de particules plus petites que 0.02 mm, x dépendant de son degré d'uniformité. Ce critère est souvent légèrement corrigé par l'indice de plasticité comme c'est le cas en Suisse. Dans certain pays comme l'Autriche, la composition minéralogique est prise en outre en considéra-

tion. L'analyse granulométrique est le critère le plus utilisé à travers le monde et les critères associés sont très nombreux (voir entre autres CHAMBERLAIN 1981).

Distribution des pores

Ce type d'essai est rarement utilisé en pratique. Plusieurs méthodes sont connues. (PENNER 1957, CSATHY and TOWNSEND 1962, TOWNSEND and CSATHY 1963, GASKIN and RAYMOND 1973, REED and al. 1979).

Interaction sol-eau

On examine l'action de l'eau dans un sol non gelé. Les essais suivants sont exécutés:
- Détermination de la relation entre la teneur en eau et la succion
- Mesure de l'ascension capillaire
- Détermination de la perméabilité du sol non saturé

Ces essais ne sont pour ainsi dire pas utilisés en pratique mais seulement pour des travaux de recherche. (MAAG 1966, WILLIAMS 1966, JONES and HURT 1978, WISSA and al. 1972, WILLIS 1930).

Interaction sol-eau-glace

On étudie les propriétés d'un échantillon gelé. Les essais suivants sont exécutés:
- Détermination de la pression de gonflement
- Mesure de la succion cryogénique
- Détermination de la perméabilité du sol gelé

Ces méthodes sont aussi très rarement utilisées en pratique. (HOEKSTRA and al 1965, MARTIN and WISSA 1973, PHUKAN and al. 1979).

2.1.2 Essais directs

Dans les essais directs, on expose une éprouvette de sol à des conditions thermiques et hydrauliques qui tentent de simuler des conditions réelles. On distingue entre deux types d'essais directs:

Gel

On détermine soit le gonflement, soit la vitesse moyenne de gonflement. Ces essais de gonflement au gel sont largement utilisés dans tous les pays à climat froid ou tempéré. Le refroidissement de l'éprouvette se fait de différentes manières:

- l'air au-dessus de l'éprouvette est maintenue à une température constante,
- l'air au-dessus de l'éprouvette a une température variable,
- la surface de l'échantillon est maintenue à une certaine température souvent constante,
- la pénétration du front de gel a une vitesse constante,
- le flux de chaleur extrait de l'éprouvette est constant.

Gel-dégel

Ces essais sont relativement peu utilisés, malheureusement car ce sont, de l'avis de la plupart des spécialistes du gel, les meilleurs essais. On détermine la diminution de la résistance au cisaillement après un ou plusieurs cycles de gel-dégel. On se sert d'un essai CBR, d'un essai triaxial ou d'un essai cisaillement direct pour mesurer cette diminution de résistance.
L'essai CBR semble le plus intéressant. Sa procédure devrait avoir des conditions de gel-dégel conduisant à une valeur CBR que l'on pourrait utiliser directement dans le dimensionnement d'une route (JESSBERGER 1973).

2.1.3 Degrés de gélivité

On classe le sol dans une catégorie de gélivité sur la base d'un ou de plusieurs essais décrits ci-dessus. Les méthodes et les critères de classement sont très nombreux; comme CHAMBERLAIN (1981) en a fait une énumération exhaustive, seuls les groupes principaux sont décrits ci-dessous:

- Les méthodes basées sur le pourcentage de particules plus petites que 0.02 mm ou 0.074 mm et sur différents autres paramètres tel que le degré d'uniformité, les limites d'At-

terberg, 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.

Frost susceptibility[1] classification	Frost group	Kind of soil	Percentage finer than 0.02 mm by weight	Typical soil types under unified soil classification system
NFS[2]	None	(a) Gravelly soils (b) Sandy soils	0 to 1.5 0 to 3	GW, GP SW, SP
Possibly[3]	?	(a) Gravelly soils (b) Sandy soils	1.5 to 3 3 to 10	GW, GP SW, SP
Very low to high	F1	Gravelly soils	3 to 10	GW, GP, GW-GM, GP–GM
Medium to high	F2	(a) Gravelly soils	10 to 20	GM, GM–GC, GW–GM, GP–GM
Negligible to high		(b) Sands	3 to 15	SW, SP, SM, SW–SM, SP–SM
Medium to high	F3	(a) Gravelly soils	over 20	GM, GC
Low to high		(b) Sands, except very fine silty sands	over 15	SM, SC
Very low to very high		(c) Clays, PI > 12	–	CL, CH
Low to very high	F4	(a) All silts	–	ML, MH
Very low to high		(b) Very fine silty sands	over 15	SM
Low to very high		(c) clays, PI < 12	–	CL, CL–ML
Very low to very high		(d) Varved clays and other fine-grained, banded sediments	–	CL and ML; CL, ML, and SM; CL, CH, and ML; C1, CH, ML, and SM

Notes:

1 based on laboratory frost heave tests
2 non-frost-susceptible
3 requires laboratory frost heave test to determine frost susceptibility

Fig. 2.1 Degré de gélivité des sols selon "U.S. Army Corps of Engineers"

En Suisse, on a adopté la méthode de l'"U.S. Army Corps of Engineers". Elle est basée sur le pourcentage de particules plus petites que 0.02 mm, la classification USCS et l'indice de plasticité. Les sols contenant plus de 3 % de particules d'un diamètre inférieur à 0.02 mm sont subdivisés en quatre catégories selon l'ordre croissant des risques de dégâts possibles dus au gel et au dégel. En outre, pour qualifier les graves de fondation on exécute un essai CBR après un cycle de gel-dégel, nommé essai CBR_3.

Nous présentons ci-après plusieurs essais directs avec leurs critères, qui servent à classer les sols selon leur sensibilité au gel. Le contenu est basé sur le rapport intermédiaire rédigé en 1983. Entre temps, certains essais ont pu être normalisés et leurs modes opératoires modifiés. Nous avons introduit ici les changements dont nous avons eu connaissance.

2.2 ESSAI CRREL (Cold Region Research and Engineering Laboratory, USA)

Généralités

L'essai CRREL a été développé dans les années cinquante. Il est utilisé pour compléter la classification selon "US Army Corps of Engineers" (Fig. 2.1). Ses caractéristiques sont:
- système ouvert
- refroidissement par l'air
- vitesse constante de pénétration du front de gel

La gélivité du sol est déterminée en fonction de la vitesse moyenne de gonflement sur 12 jours d'essai (tableau 2.1).
Le CRREL a réalisé plus de 400 essais de gonflement au gel sur des échantillons, provenant des USA et de divers autres pays. Leur synthèse fait l'objet de la figure 2.2. On y constate que la vitesse de gonflement varie largement pour un sol du même type ayant le même pourcentage de particules plus fines que 0.02 mm.

Vitesse moyenne de gonflement [mm/jour]	Degré de gélivité relatif
< 0.5	Négligeable
0.5 - 1.0	Très faible
1.0 - 2.0	Faible
2.0 - 4.0	Moyen
4.0 - 8.0	Fort
> 8.0	Très fort

Tableau 2.1 Système de classification selon CRREL

D'après CHAMBERLAIN et CARBEE (1981) le CRREL peut aujourd'hui estimer avec sûreté le degré de gélivité des sols sans avoir besoin d'entreprendre un essai de gonflement si un sol semblable (même granulométrie, même limites d'Atterberg) se trouve dans sa banque des données! Comme la perte de portance n'est pas prise en considération, le critère de gélivité tiré de l'essai du CRREL est très conservateur et doit probablement éliminer des matériaux utilisables.

Mode opératoire.

L'essai est réalisé sur une éprouvette de sol remanié. Pour les sols fins, argiles et limons, on sépare les grains les uns des autres, afin qu'ils passent au travers des mailles d'un tamis de 4.75 mm. Pour les sols grossiers, comme les sables et les graviers, les éléments plus gros que 4.75 mm et plus petits que 19 mm sont recombinés en fonction de leurs pourcentages. Les sols composés de grains d'un diamètre plus grand que 19 mm sont écartés et remplacés par le poids équivalent d'un matériau, ayant un diamètre plus grand que 4.75 mm.
Le compactage de l'éprouvette se fait dans un moule conique, dont le diamètre varie de 140 à 146 mm, et de 150 mm de hauteur. Les parois du moule sont recouvertes de silicone, afin de faciliter le démoulage. Le type de compactage est fonction du matériau. Pour les sols peu cohérents, il se fait à sec par vibration, puis on humidifie l'éprouvette avant de l'extraire. Pour les sols plus fins, on compacte l'éprouvette selon la procédure AASHO.

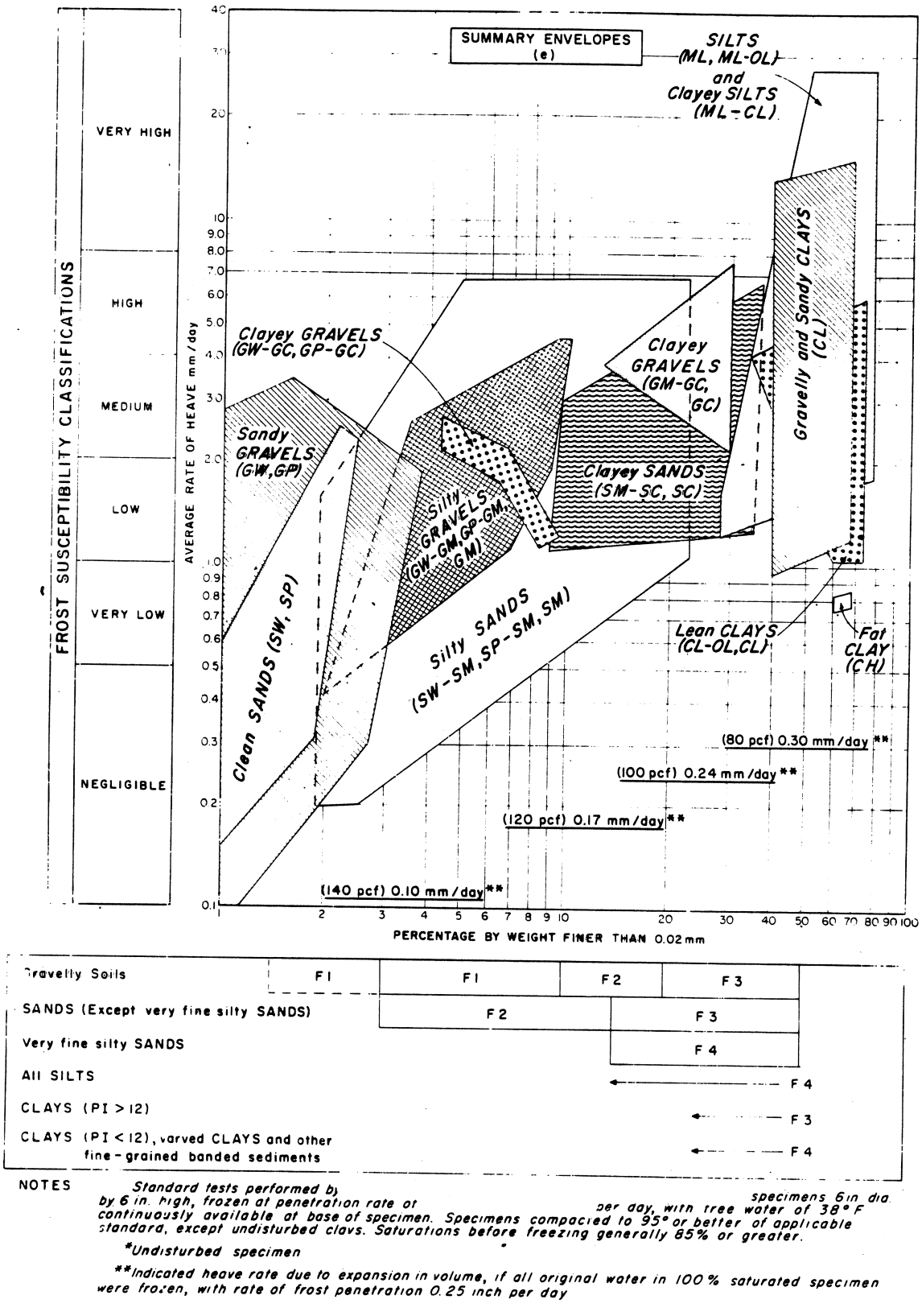

Fig. 2.2 Vitesse moyenne de gonflement en fonction du pourcentage des grains < 0.02 mm et du type de sol (d'après Kaplar, 1974)

L'éprouvette compactée et démoulée est transférée dans un moule conique en plastique (Fig. 2.3) dont les parois intérieures sont recouvertes d'une fine épaisseur de Teflon, afin de réduire le frottement sur les parois. Les deux extrémités de l'éprouvette sont recouvertes d'un filtre et d'une pierre poreuse.

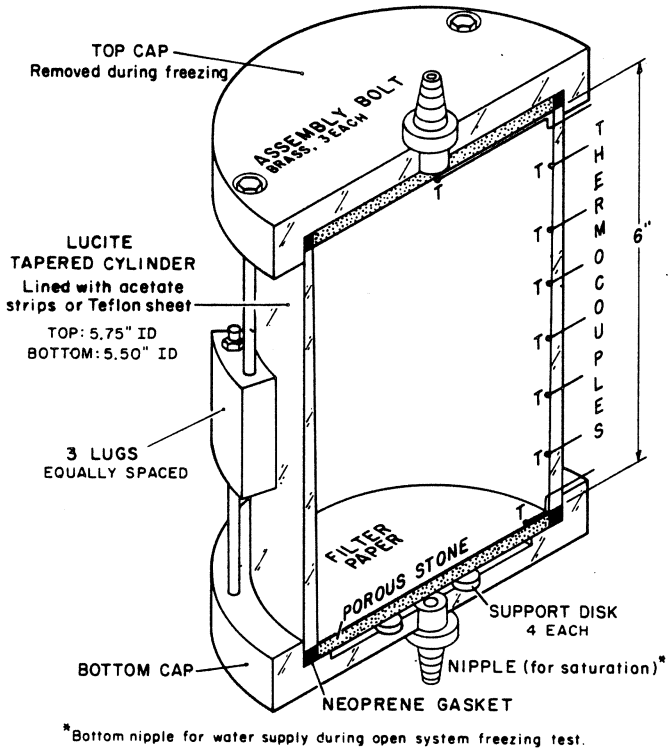

Fig. 2.3 Cellule de l'essai CRREL (d'après Kaplar, 1974)

Pour saturer l'éprouvette, on la place dans un bac où l'on fait monter régulièrement de l'eau à 4°C à raison de 25 mm par heure jusqu'au haut de l'échantillon, puis on ajoute une charge de 300 mm d'eau. On peut également saturer l'éprouvette en faisant le vide dans la cellule. Pendant la saturation du sol testé on place une charge de 9 kg (5.4 kPa) sur la partie supérieure de l'éprouvette. La cellule est alors équipée de plusieurs thermocouples afin de contrôler la vitesse du front de gel. Puis l'on place la cellule dans une chambre froide (Fig. 2.4), où une température de 4°C est maintenue pendant 18 à 24 heures.

La chambre froide est isolée thermiquement sur les côtés et le haut par des granulés de liège. Elle peut contenir quatre cellules. Pendant tout l'essai, la base de l'échantillon est maintenue dans un bac d'eau à niveau constant (6 mm au dessus de la pierre poreuse) et à une température de 4°C.
Une surcharge de 3.5 kPa est appliquée sur le sol testé afin de simuler la charge d'une chaussée de 150 mm d'épaisseur. Le gonflement vertical est mesuré par un capteur électronique.
La température de réfrigération qui agit sur le haut de l'éprouvette est réglée par rapport à la vitesse avec laquelle le front de gel pénètre dans le sol testé. Cette vitesse a été fixée à 13 mm par jour et doit demeurer constante pendant tout l'essai, celui-ci durant 12 jours.

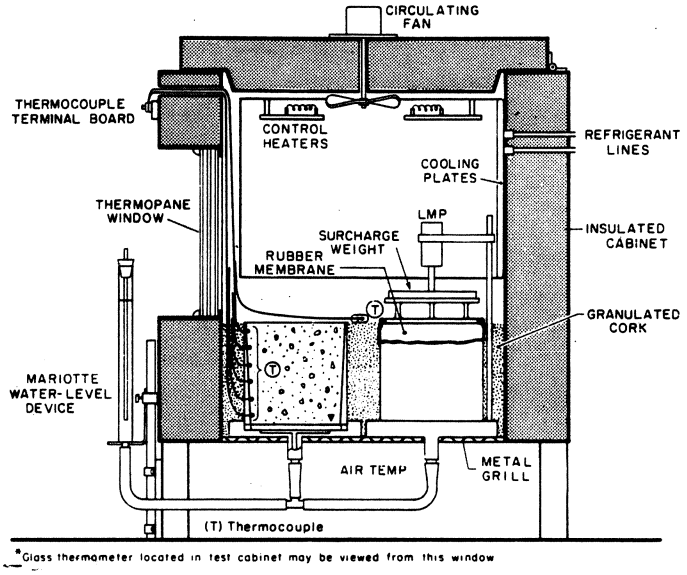

Fig. 2.4 Chambre frigorifique pour l'essai CRREL (d'après Kaplar 1974)

Une fois l'essai terminé, on démoule l'échantillon à l'aide d'une presse hydraulique. Si l'on a besoin d'utiliser une pression supérieure à 14 kPa pour évacuer la matière, il faut remettre en cause la qualité de l'essai qui est fonction de l'uniformité de la vitesse de gonflement que l'on observe. Une fois que ce test de poussée est effectué, on visualise les lentilles de glace et l'on calcule la teneur en eau de la partie

gelée sur 25 mm de hauteur. Ce type de contrôle est qualitatif et permet d'affiner le jugement du géotechnicien.

2.3 ESSAI CRREL II

Généralités

Dans les années soixante, le CREEL a commencé à développer des essais caractérisés par plusieurs cycles de gel-dégel et la mesure de la perte de portance après le dégel au moyen d'un essai CBR. JESSBERGER et CARBEE (1970) ont décrit un tel essai qui soumet l'éprouvette à trois cycles de gel-dégel. La température pendant le gel était de - 15°C. La période de gel durait comme celle du dégel, à savoir 12 heures.
L'essai CRREL II a été lui développé par CHAMBERLAIN, 1984 (voir aussi GASKIN and TESTER, 1985). Ses caractéristiques sont:
- système ouvert,
- refroidissement par un liquide,
- deux cycles de gel-dégel.

Le critère de gélivité est basé sur la vitesse de gonflement et la valeur CBR. Une première proposition fait l'objet du tableau 2.2. D'autres observations dans un champs d'essai doivent encore être effectuées pour vérifier la validité de ce critère de gélivité.

Vitesse de gonflement [mm/jour]	CBR après dégel [%]	Degré de gélivité relatif
< 1	> 20	Négligeable
1 - 2	20 - 15	Très faible
2 - 4	15 - 10	Faible
4 - 8	10 - 5	Moyen
8 - 16	5 - 2	Fort
> 16	< 2	Très fort

Tableau 2.2 Système de classification pour l'essai CRREL II (d'après Chamberlain 1984)

Mode opératoire

Le mode opératoire détaillé ne nous est pas connu. Le moule utilisé se compose de plusieurs anneaux. Ce système diminue le frottement entre l'échantillon et les parois du moule, l'éprouvette restant cylindrique. Des températures variables dans le temps sont appliquées aux deux côtés de l'éprouvette par de l'alcool réfrigéré circulant au travers de plaques métalliques. Les températures appliquées, au cours de l'essai, sur les faces inférieures et supérieures de l'éprouvette sont décrites sur la figure 2.5.

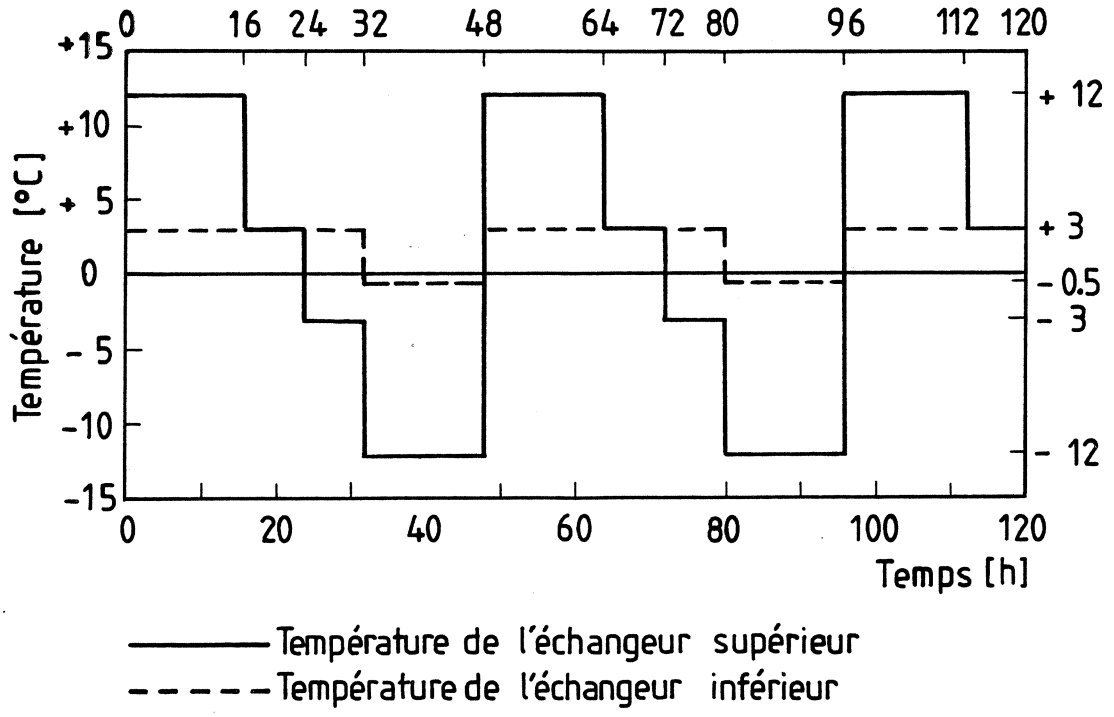

Fig. 2.5 Conditions aux limites pendant l'essai CRREL II (d'après Gaskin 1985)

La période de gonflement dure 8 heures et est relativement courte par rapport aux phases de préparation. D'autres recherches doivent encore être effectuées, afin de vérifier si la durée de la période de gonflement est assez longue pour déterminer correctement la vitesse de gonflement car cette dernière est un des éléments du système de classification du sol testé.

2.4 **ESSAI UNH** (University of New Hampshire, USA)

Généralités

L'essai UNH a été proposé par J.H. ZOLLER (1973); il devait être un essai en système ouvert, peu coûteux et rapide dans son exécution tout en restant fiable. Pour refroidir l'éprouvette, une cellule Peltier est utilisée. Son principe est expliqué au § 6.2.2.
Le degré de gélivité du sol étudié est déterminé en fonction de la vitesse moyenne de gonflement de l'éprouvette:

Vitesse moyenne de gonflement [mm/jour]	Degré de gélivité relatif
< 6.5	Négligeable
6.5 - 8.0	Très faible
8.0 - 10.3	Faible
10.3 - 13.0	Moyen
13.0 - 15.0	Fort
> 15.0	Très fort

Tableau 2.3 Système de classification selon UNH

Mode opératoire

Le matériau testé est compacté dans la cellule UNH (hauteur 152.4 mm, diamètre 137.2 mm) à l'aide d'un pilon Marshall à 95 % de l'optimum Proctor. Le moule cylindrique de la cellule UNH est composé de plusieurs anneaux de lucite qui limitent le frottement entre le sol et les parois du moule. L'éprouvette est remaniée et compactée en trois couches à 54 coups par couche. L'essai peut tout aussi bien être effectué avec une éprouvette ayant le même poids volumique que le sol naturel.
Une fois que l'éprouvette est à la compacité désirée, on la place dans une cellule isolée thermiquement (Fig 2.6). Des thermocouples sont introduits dans la cellule afin de contrôler la température dans l'éprouvette.
La surcharge appliquée sur l'éprouvette est assurée par le poids propre de la cellule Peltier (environ 3.5 kPa).

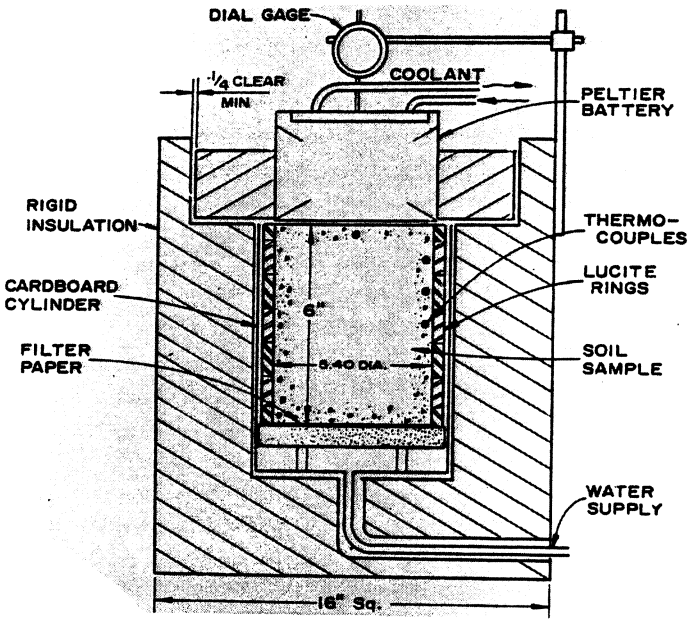

Fig. 2.6 Cellule de l'essai UNH (d'après Zoller 1973)

Une fois que les différents instruments de mesure sont installés et que la cellule Peltier est placée sur l'éprouvette, on la sature depuis le bas avec un niveau d'eau atteignant son sommet. En même temps on refroidit l'éprouvette à une température uniforme légèrement supérieure à 0°C.
Après cette période d'accommodation qui dure 16 heures, seule la base de l'éprouvette reste en contact avec l'eau sur 12.7 mm de hauteur. Avec la cellule Peltier on applique un flux de chaleur négatif. Cette procédure a les caractéristiques suivantes:

- flux de chaleur initiale : 19 W ou 1280 W/m^2
- flux de chaleur final: 10 W ou 680 W/m^2
- température finale à la surface: - 4°C
- propagation du front de gel: 76...178 mm/jour

L'essai est arrêté quand le front de gel atteint le milieu de l'éprouvette. Sa durée dépend du sol testé. Généralement elle ne dépasse pas 24 heures. Le gonflement de l'éprouvette et l'évolution du front de gel sont mesurés toutes les heures. Le plus souvent, il faut négliger les mesures effectuées pendant

les 2 premières heures, car elles sont trop différentes de la valeur moyenne de la vitesse de gonflement obtenue pendant le reste de l'essai. La figure 2.7 montre la similitude qui existe entre la vitesse de gonflement et le degré de gélivité pour l'essai UNH et l'essai CRREL.

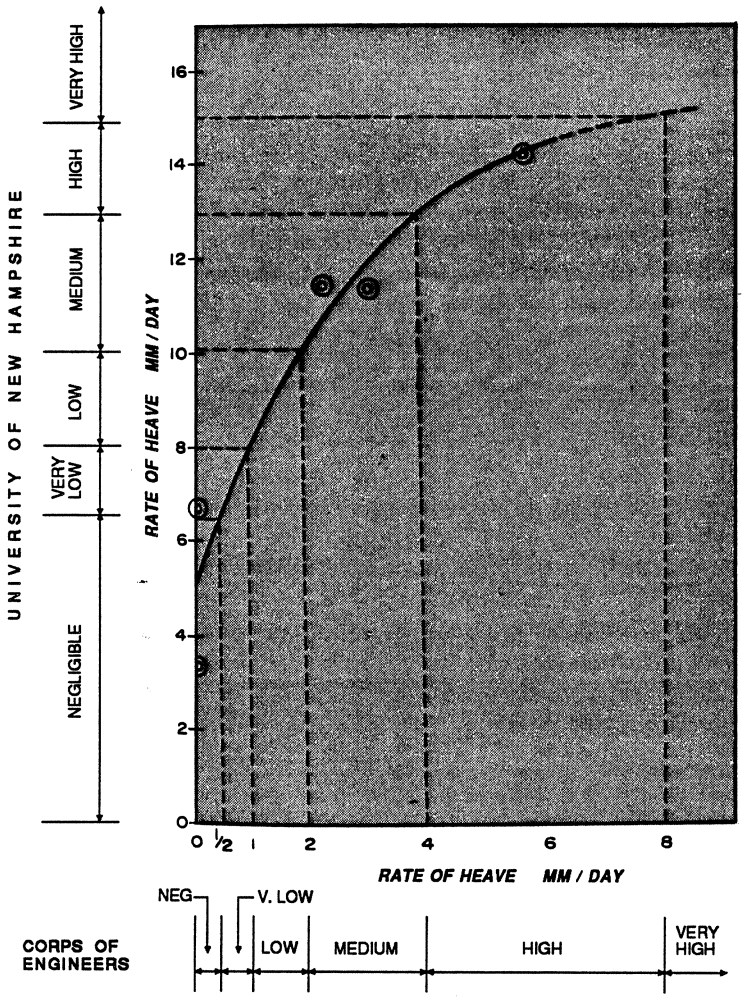

Fig. 2.7 Comparaison des systèmes de classification CRREL et UNH (d'après Zoller 1973)

2.5 ESSAI LCPC (Lab. Central des Ponts et des Chaussées, France)

Généralités

L'essai du LCPC a les caractéristiques suivantes:
- système ouvert,
- refroidissement par des liquides,
- températures constantes sur les surfaces inférieure et supérieure.

Le LCPC utilise la pente de la relation gonflement [mm] - racine carrée de l'indice de gel de l'essai, relation qu'ils admettent linéaire, pour classer le sol testé selon sa gélivité.

Classe de gélivité	Pente limite [mm·(°C·heure)$^{-0.5}$]
SGn (sols non gélifs)	≤ 0.05
SGp (sols gélifs)	≤ 0.40
SGt (sols très gélifs)	> 0.40

Tableau 2.4 Le système de classification selon LCPC

Mode opératoire

L'essai est réalisé sur une éprouvette de sol remanié (diamètre 70 mm, hauteur 260 mm). Le diamètre des grains est limité à 5 mm. L'éprouvette est fabriquée dans un cylindre lubrifié en mousse de caoutchouc qui limite l'effet du frottement et absorbe les gonflements latéraux. Pendant le compactage, la rigidité du cylindre est garantie par des tiges métalliques. On compacte le sol à 95% de l'optimum Proctor du côté de la branche humide. Pour chaque sol testé, on exécute toujours deux essais en parallèle afin de contrôler la reproductibilité des résultats obtenus. Ensuite, on installe l'éprouvette dans sa cellule (Figure 2.8). Cette cellule est constituée de deux parois en plexiglas. L'espace entre celles-ci est vidé de son air. On obtient ainsi avec le cylindre en mousse de caoutchouc une bonne isolation thermique latérale.

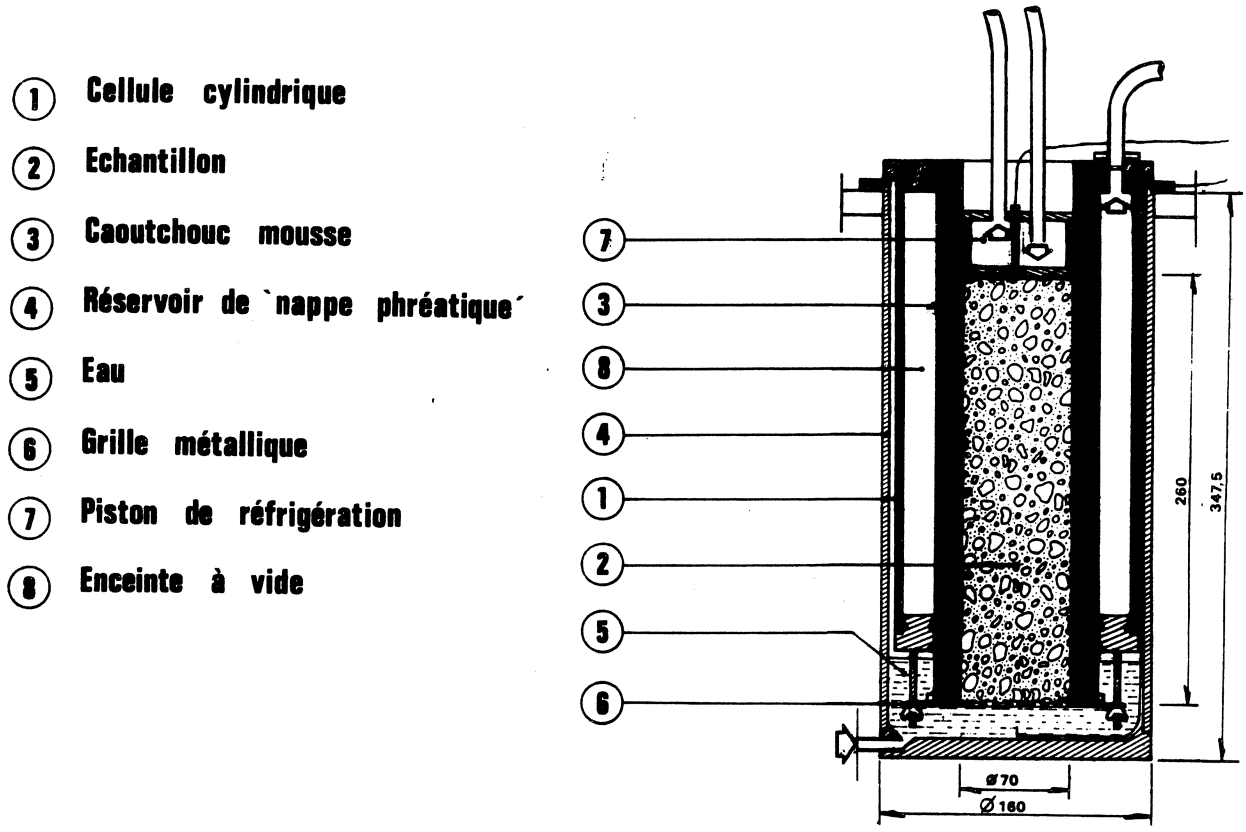

Fig. 2.8 Coupe de la cellule du LCPC (d'après LCPC, 1978)

L'éprouvette du sol étudié, entourée de sa cellule cylindrique en plexiglas, est alors placée dans une cuve cylindrique où 5 autres éprouvettes peuvent être étudiées en même temps (Fig. 2.9). Cette cuve est remplie d'un mélange d'eau et de glycol maintenu à une température positive proche de 0°C. De plus une isolation thermique en polystyrène expansé permet de calorifuger l'ensemble de l'expérience.
Après un certain conditionnement thermique - il n'y a pas de période de saturation - l'essai commence. La base de l'éprouvette est alimentée en eau par un réservoir à niveau constant au travers d'une grille métallique. L'eau est maintenue à une température de + 1°C. Sur le sommet de l'éprouvette, un piston de refroidissement impose une température négative constante de - 5.7°C au moyen d'un circuit d'alcool réfrigéré. Un thermocouple vérifie la température de la source froide appliquée à l'interface sol-piston.

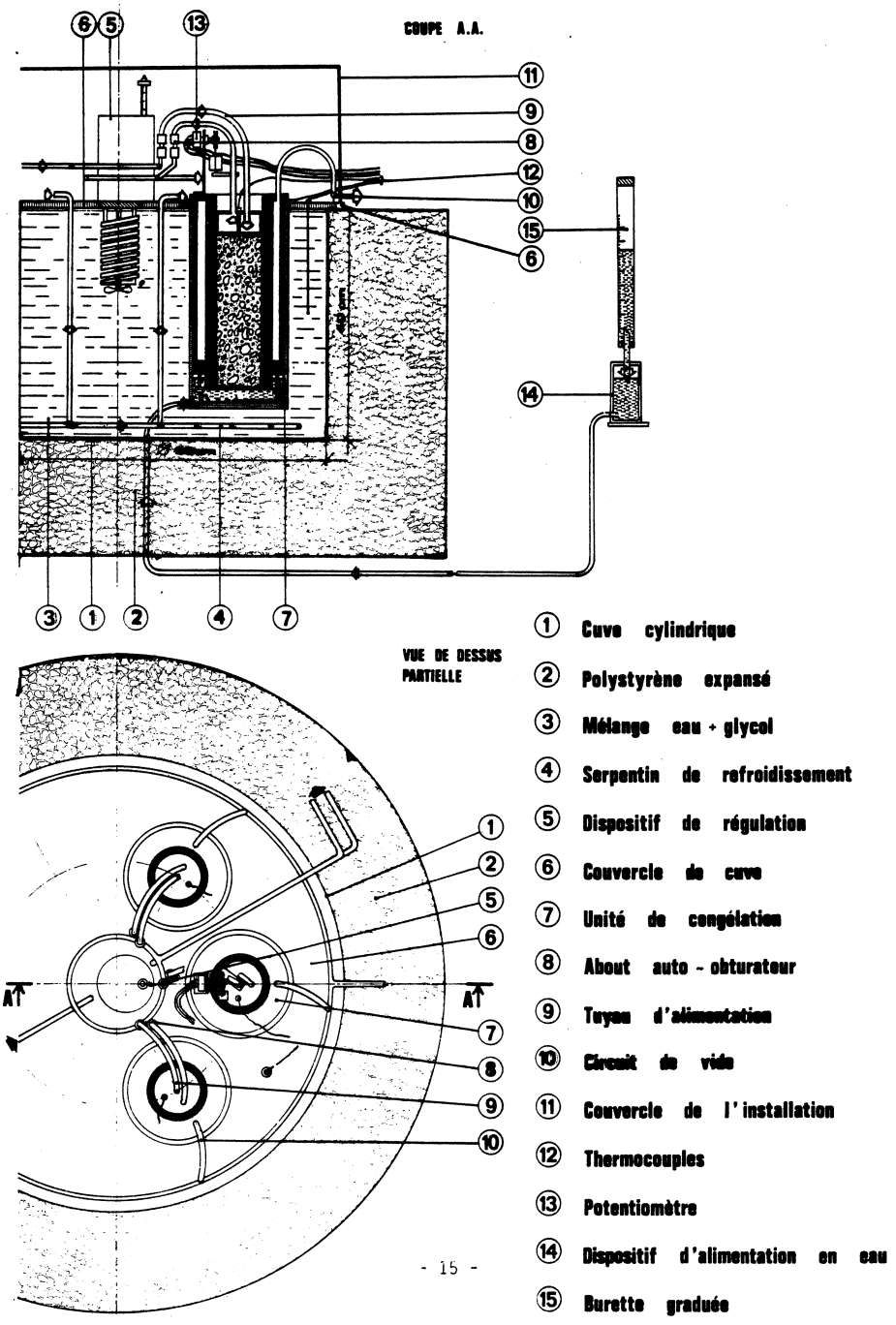

Fig. 2.9 Schéma de la cuve du LCPC (d'après LCPC, 1978)

Pour connaître le gonflement de l'éprouvette, on mesure le déplacement du piston de refroidissement à l'aide d'un fil en nylon tendu par un contre-poids. L'axe de la poulie intermédiaire est relié à un potentiomètre circulaire qui donne, par variation de tension, le déplacement vertical du piston.
Durant l'essai on contrôle régulièrement les températures aux interfaces ainsi que l'absorption de l'eau par la base de l'éprouvette. Deux fois par jour, on relève le gonflement en fonction de la racine carrée de l'indice de gel. Cette mesure permet de connaître l'allure de la courbe de gonflement.
Si le sol testé n'a pas gonflé après six jours, on arrête l'essai; dans le cas contraire, l'essai est poursuivi pendant 6 jours ou jusqu'à ce que les pentes des courbes de gonflement en fonction de la racine carrée de l'indice de gel diminuent.
Une étude est en cours au LCPC pour déterminer le degré de gélivité des matériaux ayant une granulométrie comprise entre 0 et 20 mm. Elle devrait permettre de définir une méthode de substitution permettant, à partir d'un sol 0/20 mm quelconque, de reconstituer un sol 0/5 mm qui présente le même comportement à l'essai de gonflement que le sol 0/20 mm dont il est issu.

2.6 ESSAI TRRL/SRU (Transport and Road Research Laboratory, GB)

Généralités

Le principe de l'essai TRRL, adopté par le Royaume-Uni, est basé sur les recherches entreprises par Taber aux USA. Le premier essai, l'essai TRRL/CR (Cold Room) s'exécutait dans un congélateur. Ensuite JONES et DUDEK (1979) (voir aussi LOMAS and JONES 1981) ont développé l'essai TRRL/SRU (Self Refrigerated Unit). Ses caractéristiques sont:
- système ouvert,
- refroidissement par l'air,
- températures constantes.

Le degré de gélivité du sol étudié est déterminé en fonction du gonflement moyen de trois éprouvettes. Le gonflement maximal admissible après 250 heures d'essais est de 13 mm (18 mm pour l'Ecosse).
Les sols sont classés selon le tableau 2.5.

Gélivité	Gonflement [mm]
Faible	< 13
Marginalement gélif	13 - 18
Très gélif	> 18

Tableau 2.5 Système de classification pour l'essai TRRL/SRU

Mode opératoire

L'essai est réalisé sur une éprouvette de sol remanié dont le diamètre maximum des grains est de 37.5 mm. Le compactage se fait dans un moule cylindrique (diamètre 101.6 mm, hauteur 152.4 mm) légèrement conique, afin de faciliter le démoulage. On compacte l'échantillon selon le mode opératoire du Vibrating Test (test 14 BS 1377, 1975) à l'optimum Proctor, la dernière couche étant en plus compactée par simple compression de l'éprouvette à l'aide d'une presse hydraulique de 400 kN (49.3 MPa). Une révision de l'essai en cours pourrait conduire à réduire la charge de la presse à 100 kN (12.3 MPa).
Une fois démoulée, l'éprouvette est enroulée sur sa hauteur dans une feuille de papier ciré de 200 mm de hauteur. Les deux parties libres sont reliées par du papier adhésif. Un disque en plastique (95 mm de diamètre) est ensuite placé sur l'éprouvette auquel s'adapte une tige graduée (Fig. 2.10).
L'éprouvette repose sur une pierre poreuse de 13 mm d'épaisseur ayant des pores de 110 µm. La plaque poreuse est maintenue par un anneau de cuivre de 105 mm de diamètre extérieur et de 75 mm de diamètre intérieur qui est lui-même prolongé par un cylindre vertical de 68 mm de hauteur.
C'est une plaque de bois mobile permettant de recevoir 9 éprouvettes qui sert de support aux éprouvettes à partir d'un renflement du bord supérieur du cylindre de cuivre. L'espace entre les 9 éprouvettes est rempli avec un sable sec (2.36 mm/5.0 mm) jusqu'à leur partie supérieure.

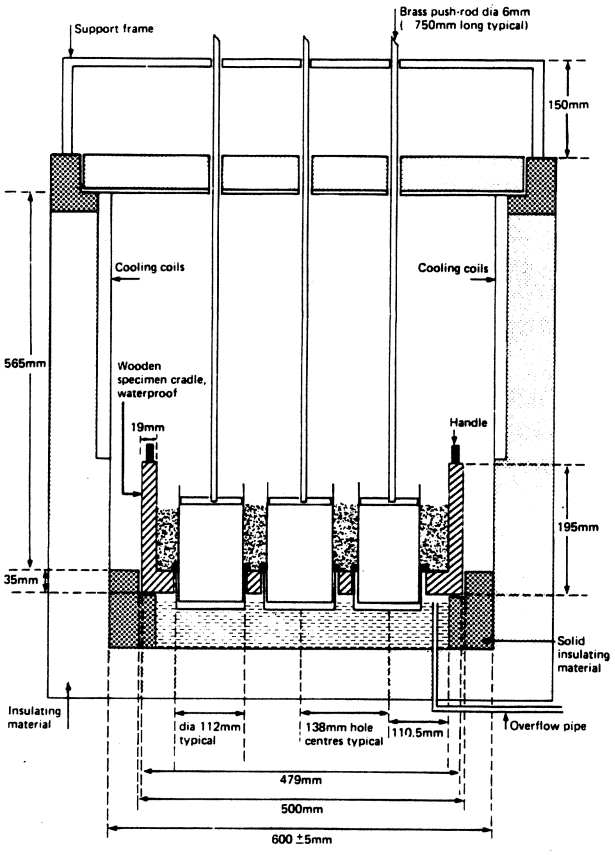

Fig. 2.10 Principe et dimensions de la chambre de l'essai TRRL (d'après Sherwood, 1981)

On met alors les 9 éprouvettes dans la chambre frigorifique (Fig. 2.11), puis on installe les tiges graduées. La plaque poreuse de l'éprouvette est en contact avec le bain d'eau. On commence par une phase de stabilisation à température ambiante durant 24 heures. Ensuite la température de l'air est refroidie à - 17°C et celle de l'eau à + 4°C. Ces températures sont ensuite maintenues constantes pendant tout l'essai qui dure 250 heures. Quand l'équilibre est atteint, la température à la surface de l'échantillon (au-dessous du disque en plastique) est d'environ - 6.5°C.

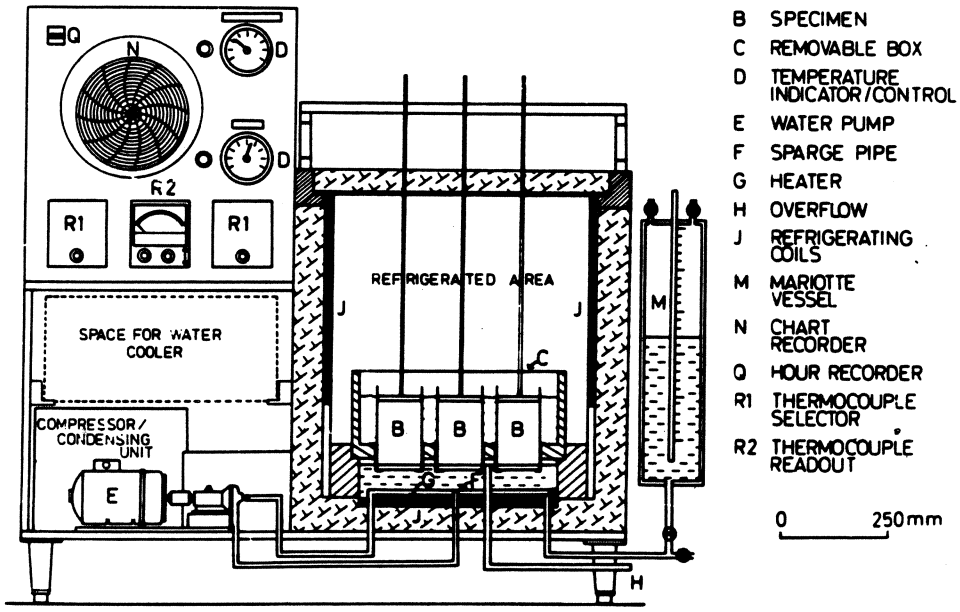

Fig. 2.11 Chambre frigorifique de l'essai TRRL/SRU (d'après Jones 1980)

Il apparaît que le nombre de cycles de gel-dégel a une très grande influence sur le gonflement du sol, et certains laboratoires ont créé une variante à la procédure en provoquant des cycles de gel-dégel toutes les 8 à 12 heures.
La présence de particules de 37.5 mm de diamètre dans un moule de 102 mm de diamètre à tendance à provoquer une dispersion des résultats. Deux solutions ont été utilisées pour y remédier:
- exclure les particules ayant un diamètre supérieur à 20 mm,
- augmenter le diamètre de l'éprouvette.
La première solution a été abandonnée, car le gonflement obtenu était plus grand et ne simplifiait pas l'interprétation. La deuxième solution semble provoquer également une augmentation du gonflement et continue d'être étudiée.

2.7 ESSAI TRRL/PFC (Transport and Road Research Laboratory, GB)

Généralités

JONES et DUDEK (1979) ont proposé l'essai TRRL/PFC (Precise Freezing Cell) comme alternative à l'essai TRRL/SRU. Ses caractéristiques sont:
- système ouvert,
- refroidissement par une cellule Peltier,
- températures constantes.

Le principe de la cellule Peltier est décrit au § 6.2.2.

Mode opératoire

L'éprouvette est préparée comme pour l'essai SRU (mêmes dimensions, même procédure de compactage - voir § 2.6). Une fois démoulée, elle est placée dans un récipient en PVC (Fig. 2.12) dont les parois ont une épaisseur de 5 cm. Le principe de sa mise en place est semblable à l'essai SRU.
Sur la surface de l'éprouvette, on place d'abord une plaque en cuivre, puis la cellule Peltier. Un anneau protecteur est posé sur le sable, l'isolant qui entoure l'échantillon; il doit garantir un flux de chaleur axial.
On met l'appareillage dans un réfrigérateur qui est réglé à une température de + 4°C. Après une période de stabilisation de 24 heures, l'essai commence. Par la cellule Peltier, on refroidit la surface de l'éprouvette à - 6°C. Dans l'anneau protecteur, on fait circuler un liquide d'alcool réfrigéré à une température de - 6°C également, température maintenue constante pendant tout l'essai.
Deux types d'essai sont proposés:
- **le test standard** où l'on utilise la puissance maximum de la cellule Peltier. Après 15 heures environ l'équilibre est atteint.
- **le test retardé** où l'on limite la puissance de la cellule Peltier de façon à doubler le temps nécessaire à l'équilibre.

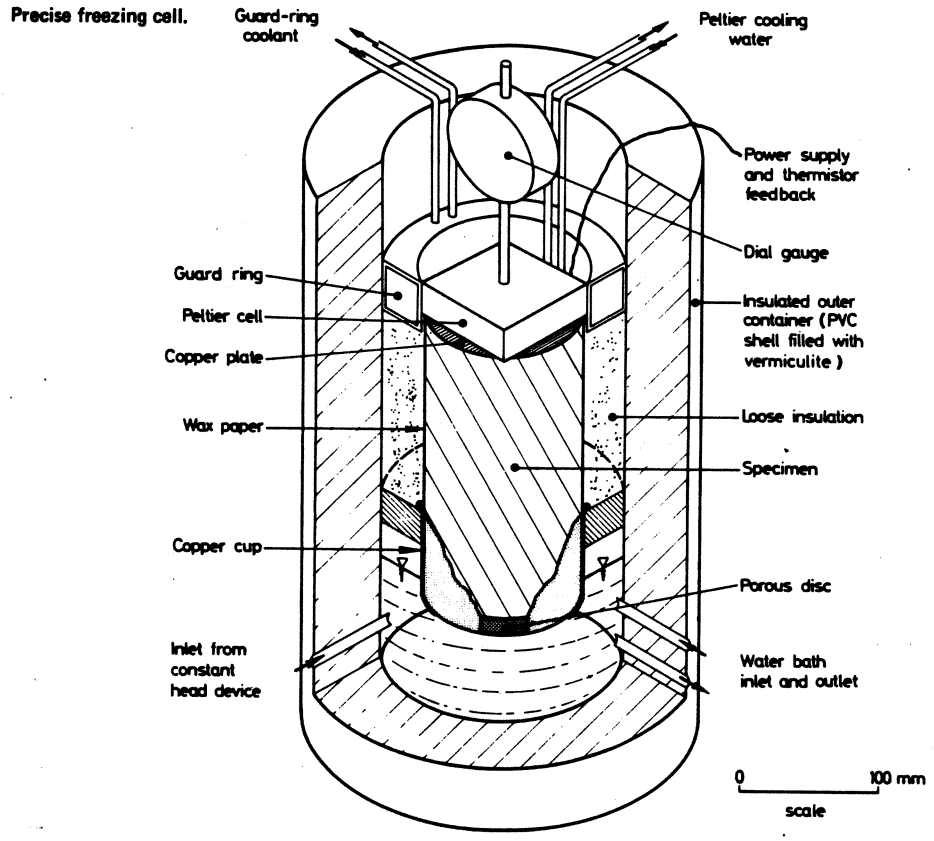

Fig. 2.12 Eclaté de la cellule PFC (d'après Jones et Dudek 1979)

Le front de gel pénètre jusqu'à une profondeur d'environ 90 mm. Chaque jour le gonflement et la quantité d'eau absorbée sont mesurés. L'essai est arrêté si la vitesse de gonflement est inférieure à 0.1 mm par jour, généralement après cinq jours. Le gonflement de l'éprouvette obtenu par ce procédé ne correspond qu'au 30 % du gonflement obtenu par l'essai SRU.

2.8 **ESSAI VTI** (Väg - och Trafikinstitut, Suède)

Généralités

Au cours des années septante, STENBERG et FREDEN (1980) (voir aussi STENBERG 1985) ont développé un essai dont les caractéristiques sont les suivantes:
- système ouvert,
- refroidissement par une cellule Peltier,
- flux de chaleur constant.

Le principe de la cellule Peltier est décrit au § 6.2.2. Elle est séparée de l'échantillon par une cellule avec laquelle on peut mesurer le flux de chaleur extrait du sol.

Mode opératoire

Le moule cylindrique (diamètre 110 mm, hauteur 200 mm) est en acrylique. On remplit le moule avec du sol séché, tamisé à 20 mm. Puis on sature l'éprouvette reposant sur une plaque poreuse par succion. Durant cette période on la compacte légèrement en frappant la cellule avec la main. Ce processus est utilisé afin de réduire le volume d'air occlu dans l'éprouvette. Cette dernière est considérée comme saturée quand l'eau peut être dissociée de la matière en appuyant légèrement sur celle-ci (resuée). Ensuite on laisse reposer l'éprouvette, surchargée à 5 kPa, pendant la nuit.
La cellule est alors placée dans une enceinte isolée thermiquement. La base de l'éprouvette repose sur une cellule Peltier et cette dernière est reliée à une unité d'alimentation (Fig. 2.14). La cellule Peltier provoque alors la congélation de l'éprouvette par le bas. Sachant que le processus de congélation est rapide et que le gradient thermique est grand, les auteurs de cet essai pensent que l'on peut négliger l'influence de la gravitation bien que celle-ci agisse dans le sens défavorable. Cette conception devrait diminuer le frottement entre les parois du moule et l'éprouvette car sa partie gelée reste immobile.

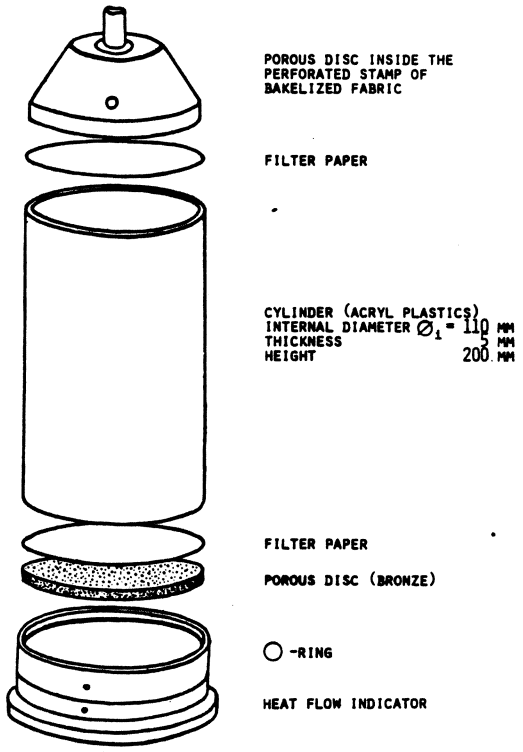

Fig.2.13 Cellule de l'essai VTI (d'après Stenberg et Freden 1980)

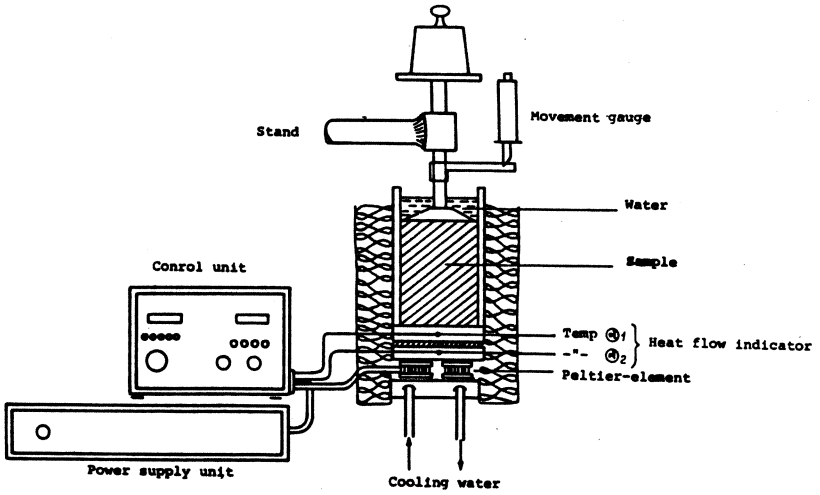

Fig. 2.14 Chambre frigorifique de l'essai VTI (d'après Stenberg et Freden 1980)

Le flux de chaleur extrait de l'éprouvette est choisi généralement entre 100 et 500 Watt par mètre carré. Il est constant pendant tout l'essai qui dure normalement 12 heures. Un sol est testé en variant la surcharge appliquée.
On a trouvé que le logarithme de la vitesse de gonflement est une fonction linéaire de la surcharge. La pente de cette droite est nommée valeur b. Cette valeur détermine la gélivité du sol examiné. Un programme a été développé pour estimer le gonflement d'une route à partir de la valeur b.

2.9 AUTRES ESSAIS

En Canada, GARAND et LADANYI (1982) ont développé un appareillage qui permet d'appliquer un gradient thermique bien déterminé grâce à deux plaques métalliques placées aux surfaces inférieure et supérieure de l'éprouvette dans lesquelles de l'alcool réfrigéré circule.
Aux Etats-Unis, MAGEAU et SHERMAN (1983) ont construit un dispositif dont le principe de refroidissement est semblable à celui décrit par GARAND et LADANYI (1982).
Au Royaume Uni, l'essai TRRL/PFC aussi nommé CHU (Controlled Heave Unit) a été perfectionné et décrit, comme essai CHU-2, par McCABE et KETTLE (1985). L'éprouvette compactée dans un moule constitué de plusieurs anneaux est refroidie avec deux plaques métalliques dans lesquelles de l'alcool réfrigéré circule.
En Autriche, on entreprend un essai au gel-dégel si la minéralogie du sol à évaluer n'est pas comprise dans le critère de gélivité (BRANDL 1980). Dans la procédure la plus courante qui dure 16 jours, les éprouvettes, ayant les mêmes dimensions que celles de l'essai CBR, sont soumises à deux cycles de gel-dégel. Pendant les périodes de gel l'air au-dessus de l'éprouvette est refroidi à - 15°C. La valeur CBR est mesurée après dégel à 20°C. Le gonflement admissible est de 10 à 20 mm et une valeur CBR supérieure à 20 ou 25 % est exigée pour les matériaux de la fondation.
D'autres essais CBR après gel-dégel sont exécutés en Allemagne de l'Ouest et en Roumanie.

2.10 REMARQUES GENERALES

Le tableau 2.6 est une récapitulation des principales caractéristiques des essais de gonflement au gel.
Les tendances qui se dégagent des essais étudiés et de la littérature examinée peuvent être résumées ainsi:

- dimensions de l'éprouvette permettant de tester les graviers,
- rapport hauteur de l'éprouvette sur diamètre supérieur à 1
- moule construit en matière plastique,
- mesures pour limiter le frottement latéral pendant le gonflement (anneaux, conicité, lubrifiant, etc)
- compactage, proche de l'optimum Proctor, et essai dans le même moule,
- très bonne isolation thermique latérale,
- refroidissement avec un liquide réfrigéré circulant au travers de plaques métalliques ou, dans quelques cas par des cellules Peltier.

Les procédés de compactage et de saturation ainsi que les conditions thermiques initiales sont fort différents. La durée de gel varie ainsi que le nombre des cycles de gel-dégel. Plusieurs chercheurs pensent qu'il est indispensable d'examiner le gonflement **et** la perte de portance après gel-dégel pour déterminer la sensibilité au gel d'un sol.

Essai	CRREL (USA)	UNH (USA)	LCPC (France)	TRRL/SRU (GB)	TRRL/PFC (GB)	VTI (Suède)	EPFL/LMS (Suisse)
Diamètre de l'échantillon [mm]	140 - 146	137.2	70	101.6		113	55
Hauteur de l'échantillon [mm]	150	152.4	260	152.4		200	100
Diamètre des grains [mm]	< 19	< 19	< 5	< 37.5		< 20	< 10
Type de compactage	vibration ou dame	dame	dame	vibration et compactage statique		légèrement à la main	dame
Compactage dans même moule	non	oui	oui	non		oui	oui
Mesures contre le frottement	moule conique + surface en Teflon	moule constitué de 7 anneaux	moule en mousse de caoutchouc	moule conique + papier ciré		geler depuis en bas	2 feuilles d'acétate
Saturation	~ 2 jours sous charge hydraulique surcharge : 5.4 kPa	16 heures sous charge hydraulique Température : 1°C Surcharge : 3.5 kPa	aucune	24 heures par succion Température : 4°C		pendant compactage	pendant nuit par succion Température : 5°C Surcharge : -
Accommodation	~ 1 jour à 4°C surcharge : 3.5 kPa		pas définie	Surcharge : < 1 kPa	Surcharge : ~ 1 kPa	pendant nuit surcharge : 5 kPa	
Mode de refroidissement	air froid	cellule Peltier	Liquide à travers plaque métallique	air froid sur plaque en PVC	cellule Peltier	cellule Peltier	air froid
Température [°C] - à la surface - au pied	variable + 4	variable + 4	- 5.7 + 1	~ - 6 + 4	- 6 + 4	variable pas définie	- 5/ -10/ -15/ -20 + 5
Caractéristique thermique de l'essai	propagation du front de gel avec vitesse constante	propagation continue du front de gel	gradient thermique constant (3.7 cm/°C)	propagation du front de gel puis gradient thermique constant (1.5 cm/°C)		flux de chaleur constant	propagation du front de gel par palier
Surcharge [kPa]	3.5	3.5	-	---		variable	-
Durée	12 jours	< 1 jour	6 - 10 jours	10 jours	~ 5 jours	12 heures	~ 3 jours
Valeur caractéristique	vitesse moyenne de gonflement	vitesse moyenne de gonflement	Pente $\Delta H/\Delta I$ h = gonflement I = Indice de gel	gonflement total		Pente $\Delta \log(h)/\Delta q$ h=vitesse de gonfl. q = surcharge	gonflement total

Tableau 2.6 Récapitulation des principales caractéristiques des essais de gonflement

3 PROGRAMME DE LA RECHERCHE

3.1 PROGRAMME GENERAL

Pour pouvoir mettre au point un nouvel essai de sensibilité au gel nous avons entrepris, tout d'abord, des essais systématiques et comparatifs avec les procédures actuellement en vigueur. Ensuite, nous avons développé et testé la nouvelle procédure et le nouvel appareillage.
Tous les essais ont été réalisés sur trois sols types.

3.2 MATERIAUX

En Suisse, la détermination de la gélivité se fait sur la base du pourcentage des particules inférieures à 0.02 mm et de l'indice de plasticité, ceci selon la norme SN 670'145. Elle distingue les quatre degrés de gélivité suivants:

- très peu gélif	G1
- peu gélif	G2
- gélif	G3
- très gélif	G4

Les **trois sols types** utilisés pour les essais ont été préparés à partir de deux sols - un gravier et un limon - provenant de la gravière de Bioley. Ce sont:

- **La Grave II**
  La norme SN 670'120b: Graves pour couches de fondation, exige pour la Grave II les propriétés suivantes:
  - Fraction < 0.02 mm: 10 % au maximum
  - Limite de liquidité: 25 % au maximum
  - Indice de plasticité: 6 % au maximum

  Pour atteindre la limite de cette norme, on a mélangé le gravier avec le limon de telle façon que 10 % d'éléments soient d'un diamètre inférieur à 0.02 mm.
  La Grave II est légèrement gélive avec un degré de gélivité de 1 à 2.

- **La "Grave III"**
  On a mélangé le gravier avec le limon en proportion 1:1. Ce gravier argileux est gélif avec un degré de gélivité de 3.

- **Le "Limon"**
  On a tamisé le limon à 2 mm. C'est un limon argileux avec un indice de plasticité légèrement supérieur à 12. Il est gélif à très gélif avec un degré de gélivité de 3 à 4.

Les caractéristiques de ces trois sols types font l'objet de la figure 3.1 et du tableau 3.1.

SOL	Grave II	Grave III	Limon
< 20 mm	76%	85%	100%
< 10 mm	59%	74%	100%
< 2 mm	37%	60%	100%
< 0.06 mm	12%	42%	88%
< 0.02 mm	10%	32%	69%
< 0.002 mm	3%	11%	22%
gravier	63%	40%	0%
sable	25%	18%	12%
limon	9%	31%	66%
argile	3%	11%	22%
w_L	19.7%	29.4%	33.2%
w_P	11.0%	18.4%	19.1%
I_P	8.7%	11.0%	14.1%
USCS	GC	GC-CL	CL
Gélivité SN 670'145	G1 à G2	G3	G3 à G4

Tableau 3.1 Caractéristiques géotechniques des 3 sols types

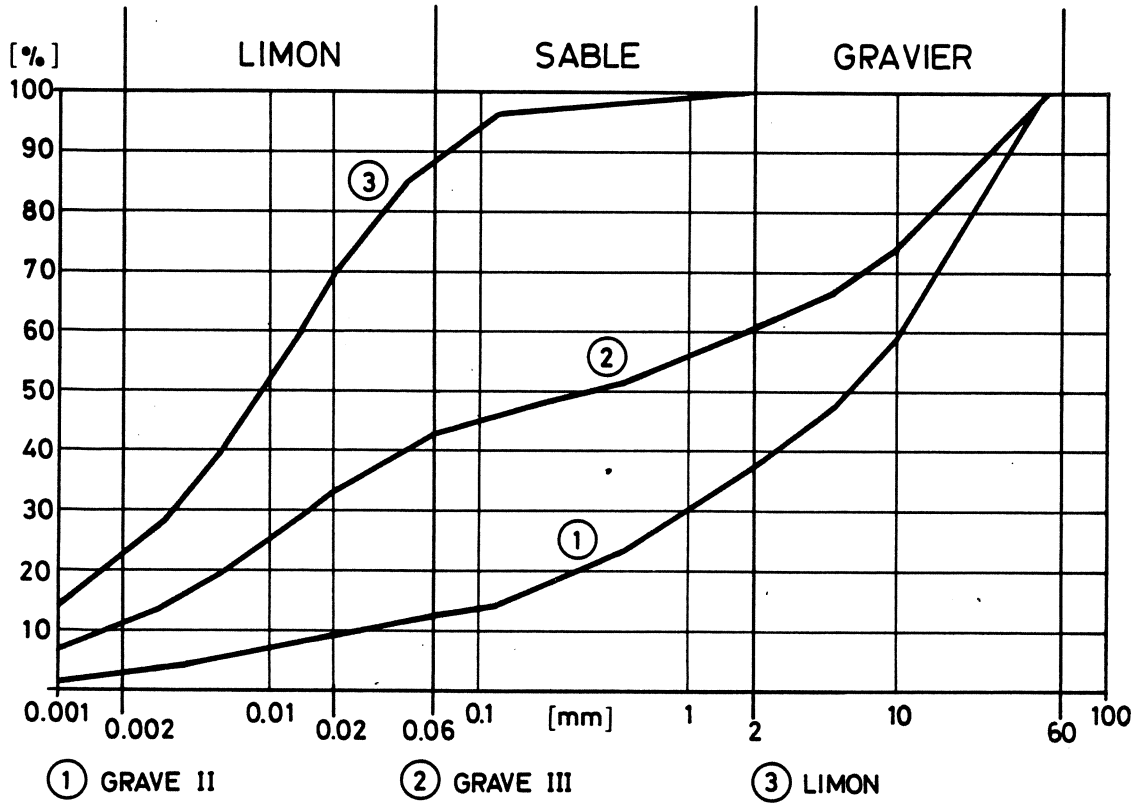

Fig. 3.1 Granulométries des 3 sols types

3.3 ESSAIS SELON PROCEDURES ACTUELLES

Les essais et procédures suivants ont été systématiquement comparés:

- l'essai CBR_3 selon procédure rapide (normalisée)
- l'essai CBR_3 selon procédure lente (mal normalisée)
- l'essai au gonflement selon la procédure IGB (Institut für Grundbau und Bodenmechanik, ETHZ)
- l'essai au gonflement selon la procédure LMS (Laboratoire de mécanique des sols, EPFL)

Les essais ont été réalisés avec trois teneurs en eau différentes (branche sèche, optimum, branche humide); pour garantir la validité des résultats, ils ont été entrepris sur plusieurs éprouvettes de même teneur en eau. Le tableau 3.2 montre le nombre des éprouvettes qui ont été soumises aux différents essais selon procédure actuelle.

		CBR_3		Gonflement	
		Rapide	Lente	IGB	LMS
Grave II	$w_1 = w_{opt} - 1\%$	3	3	6	6
	$w_2 = w_{opt}$	3	3	6	6
	$w_3 = w_{opt} + 1\%$	3	6	6	6
Grave III	$w_1 = w_{opt} - 1.5\%$	3	3	6	6
	$w_2 = w_{opt}$	3	6	6	6
	$w_3 = w_{opt} + 1.5\%$	3	3	6	6
Limon	$w_1 = w_{opt} - 2\%$	3	3	6	6
	$w_2 = w_{opt}$	3	3	6	6
	$w_3 = w_{opt} + 2\%$	3	3	6	6
Total des éprouvettes		27	33	54	54

Tableau 3.2 Eprouvettes testées par essai et procédure

3.4 ESSAIS SELON NOUVELLE PROCEDURE

La nouvelle procédure prévoit d'effectuer l'essai de gonflement et l'essai CBR_3 sur la même éprouvette.
Deux prototypes ont été consécutivement développés. Le tableau 3.3 montre le nombre des essais réalisés par prototype.

Prototype	I	II
Grave II	3	2
Grave III	2	2
Limon	-	1

Tableau 3.3 Essais réalisés par prototype

Pour le même prototype la procédure était identique. La procédure exécutée avec le prototype I était semblable à celle exécutée avec le prototype II.

4 CBR_3 SELON PROCEDURES ACTUELLES

4.1 MODES OPERATOIRES

Deux procédures ont été exécutées:
- la Procédure Rapide (CBR_{3R})
- la Procédure Lente (CBR_{3L}),

avec les différentes phases suivantes : tamisage, préparation, compactage, saturation, gel, dégel, poinçonnement CBR.
Les deux procédures - Rapide et Lente - ne se distinguent qu'au cours du gel et du dégel.
L'essai CBR_{3R} est normalisé dans la norme SN 670'320a. Cependant nous n'avons pas toujours pu suivre exactement cette norme, car notre congélateur diffère de celui décrit dans cette dernière. En outre la méthode pour obtenir la nouvelle origine de la courbe charge - enfoncement de l'essai CBR (chiffre 11 SN 670'320a) a été modifiée afin d'obtenir des résultats raisonnables. Les modes opératoires utilisés ainsi que les différences par rapport à la norme SN 670'320a sont décrits ci-après.

Tamisage

L'essai CBR exige que le diamètre des grains ne dépasse pas 20 mm. Le pourcentage suivant est donc éliminé:

Grave II	24 %
Grave III	15 %
Limon	0 %

Selon la norme, c'est seulement à partir de 30 % que la partie éliminée doit être remplacée par la même quantité de matériau entre 5 et 20 mm. Les sols types soumis aux essais ont donc les granulométries modifiées décrites par le tableau 4.1.
La Grave II contient maintenant 16 % de particules fines et correspond à un GC-CL. La Grave III en contient 49 %.

Préparation

Le sol tamisé à 20 mm est séché au four à 105°C, puis refroidi à la température ambiante. On ajoute l'eau nécessaire en malaxant l'échantillon. Pour homogénéiser la teneur, en eau l'échantillon est placé dans un sac en plastique bien fermé pendant 24 heures.

SOL	Grave II	Grave III	Limon
≤ 20 mm	100%	100%	100%
≤ 10 mm	78%	87%	100%
≤ 2 mm	49%	71%	100%
≤ 0.06 mm	16%	49%	88%
≤ 0.02 mm	13%	38%	69%
≤ 0.002 mm	4%	13%	22%
gravier	51%	29%	0%
sable	33%	22%	12%
limon	12%	36%	66%
argile	4%	13%	22%

Tableau 4.1 Granulométries modifiées des sols types

Pour les essais $CBR3_R$ nous avons utilisé un malaxeur et traité 18 kg à la fois, quantité suffisante pour trois éprouvettes. Pour les essais $CBR3_L$ par contre, tous les échantillons ont été malaxés séparément à la main.

Compactage

L'énergie de compactage a été fixée à 1.15 MJ par m^3, ce qui correspond à 26 coups pour chacune des cinq couches (poids du marteau 4.54 kg, hauteur de chute 0.457 m). Elle est la même que pour l'essai de qualification de la grave II (SN 670'120b).

Saturation

L'éprouvette est placée dans un bassin rempli d'eau pendant 4 jours. L'imbibition se fait seulement depuis le bas. Le niveau de l'eau se trouve à environ 3 cm au-dessus de la surface de l'éprouvette qui reste exondée. La température de l'eau n'est pas réglée. Une surcharge d'environ 8.3 kg correspondant à 4.5 kPa est appliquée sur l'éprouvette.
Pendant les essais $CBR3_R$, plusieurs lectures du gonflement ont été faites tandis que durant les essais $CBR3_L$ seul le gonflement total après 4 jours a été enregistré.

Après avoir sorti l'éprouvette de son bain, on éponge le moule pour le sécher et après 15 minutes d'égouttage l'éprouvette est pesée.

Gel

Le congélateur du LMS diffère un peu de celui décrit dans la norme. Il peut contenir trois éprouvettes disposées en ligne. L'air froid arrive d'un côté et circule de la première éprouvette vers la troisième; les conditions thermiques ne sont donc pas exactement les mêmes pour les trois éprouvettes.
Les conditions thermiques peuvent varier d'un appareillage à un autre au travers des paramètres suivants:
- la température du bain d'eau,
- la circulation de l'air froid,
- l'isolation thermique des éprouvettes.

La température du bain d'eau dépend du système de chauffage et du thermostat utilisé. Pendant nos essais, la température de l'eau oscillait en moyenne entre 4°C et 6°C avec des pointes à 3°C et 7°C. Il était donc impossible de maintenir la température du bain à 4°C, comme cela est demandé par la norme.

Gel - Procédure Rapide

Dans la norme SN 670'320a, chiffre 13c on peut lire: "On place sur la surface de l'éprouvette une plaque d'acier polie avec trois tiges supportant les anneaux de surcharge. On immerge ensuite le moule CBR dans un bain d'eau de 3 cm de profondeur dans le congélateur. Le moule est isolé latéralement et gelé depuis le haut à -20°C. Pendant l'essai, le bain d'eau est refroidi à 4°C et thermocontrôlé."
Nous avons procédé de la manière suivante: On met l'éprouvette préparée selon la norme dans le bain d'eau refroidi à environ 5°C. Le moule est immergé dans 40 mm d'eau et l'éprouvette dans 25 mm. Une surcharge de 4.5 kPa (comme lors de la saturation) est appliquée. Le congélateur est ensuite mis en marche; l'air se refroidit en 90 minutes d'environ 5°C à -22°C. Cette température est maintenue pendant 5.5 à 6 heures. La durée totale de l'essai est donc 7 à 7.5 heures.
Selon la norme, on suppose que le front de gel met 6 à 8 heures pour pénétrer jusqu'à mi-hauteur de l'éprouvette. En fait, à la fin de l'essai, on a mesuré au milieu de l'échantillon, par un capteur placé pendant le compactage, des températures de -2°C à - 5°C. Afin d'avoir une idée de la position du front de gel à

la fin de l'essai nous avons démoulé une éprouvette (Limon à w_{opt}): les trois quarts de l'éprouvette avaient été gelés après 7 heures d'essai.
La durée de l'essai n'a pas été toujours la même: 7.5 heures pour la Grave III, 7 heures pour la Grave II et le Limon. Cela n'a pas d'importance, car tout le gonflement se produit pendant les trois premières heures.

Gel - Procédure Lente

Avant de placer la plaque d'acier polie, on recouvre la surface de l'éprouvette d'une feuille d'aluminium pour la protéger. On met ensuite l'éprouvette dans le bain d'eau refroidi à 15°C. Les autres conditions initiales correspondent à la procédure rapide. Quant au programme de refroidissement, il fait l'objet de la figure 4.1.

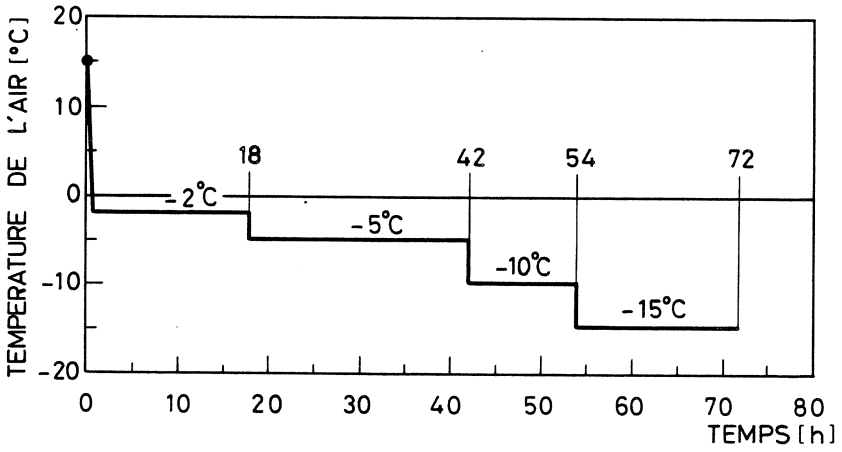

Fig. 4.1 La température de l'air pendant gel
Essai CBR_3 / Procédure Lente

GIUDICETTI (1973) a présenté dans sa thèse un essai CBR_3 lent dont la procédure était la suivante: Au début de l'essai, la température de l'eau était maintenue entre 15°C et 20°C. Pendant l'essai les températures de l'air et de l'eau sont abaissées de façon continue, de manière à ce que le front de gel pénètre à une vitesse moyenne de 20 mm par jour. La température de l'air atteind - 16°C à - 20°C. Une fois arrivé au milieu de l'éprouvette, le front de gel y est maintenu jusqu'à ce que le gonflement s'arrête.
Pendant nos essais, seule la température de l'air est abaissée progressivement selon le programme de la figure 4.1. La tempé-

rature de l'eau descend assez vite. Une fois arrivée à 5°C, elle y est maintenue approximativement par le thermostat.
A la fin de l'essai, les capteurs placés au milieu de l'éprouvette ont donné des températures de 0°C à - 3°C. On peut ainsi conclure que la vitesse de propagation du front de gel dépasse légèrement 20 mm par jour.
Dans nos essais nous n'avons pas attendu la fin du gonflement. La durée de l'essai était toujours de trois jours.

Dégel - Procédure Rapide

L'éprouvette est sortie du congélateur et après 15 minutes d'égouttage on retire la plaque d'acier polie en la réchauffant à l'air chaud. L'éprouvette est ensuite pesée. Le dégel se fait dans un sac en plastique pendant une nuit à la température ambiante et avec la surcharge de 4.5 kPa. Après le dégel, l'éprouvette est à nouveau pesée.

Dégel - Procédure Lente

Le dégel se fait dans le congélateur qui est arrêté. La variation de la température de l'air pendant ce dégel est représentée sur la figure 4.2. La température de l'eau monte à environ 12°C.
Après 24 heures de dégel, l'éprouvette est sortie du congélateur et est pesée après 15 minutes d'égouttage.

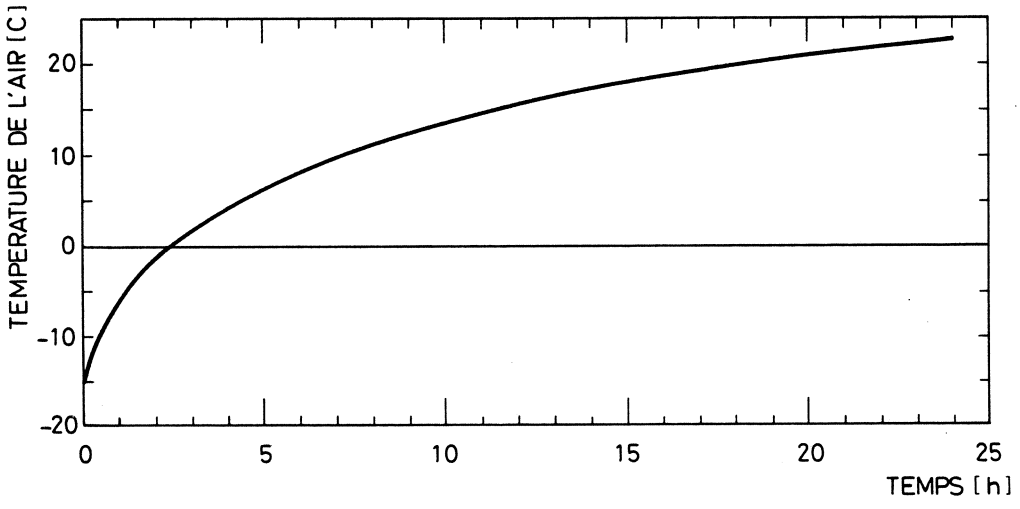

Fig. 4.2 La température de l'air pendant le dégel
Essai CBR3 / Procédure Lente

Poinçonnement CBR

Nous avons suivi la procédure de la norme. La surcharge appliquée pendant cet essai était de 4.1 kPa.
Pour le calcul du coefficient CBR, la norme n'a cependant pas été respectée:

- C'est la valeur CBR pour un enfoncement de 5.08 mm qui a été prise en considération, parce que cette valeur était toujours plus grande que celle correspondant à un enfoncement de 2.54 mm. En outre, l'essai n'a jamais été répété.
- La méthode pour déterminer la nouvelle origine de la courbe charge-enfoncement a été modifiée, car parfois toute la courbe avait une concavité tournée vers le haut. La figure 4.3 montre la procédure appliquée.
  On lisse d'abord la courbe (a,b). Puis on suit la procédure décrite dans la norme si la concavité tournée vers le haut s'arrête à partir de 5.08 mm d'enfoncement (c). Autrement on dessine la tangente au point où l'enfoncement se monte à 5.08 mm (d).

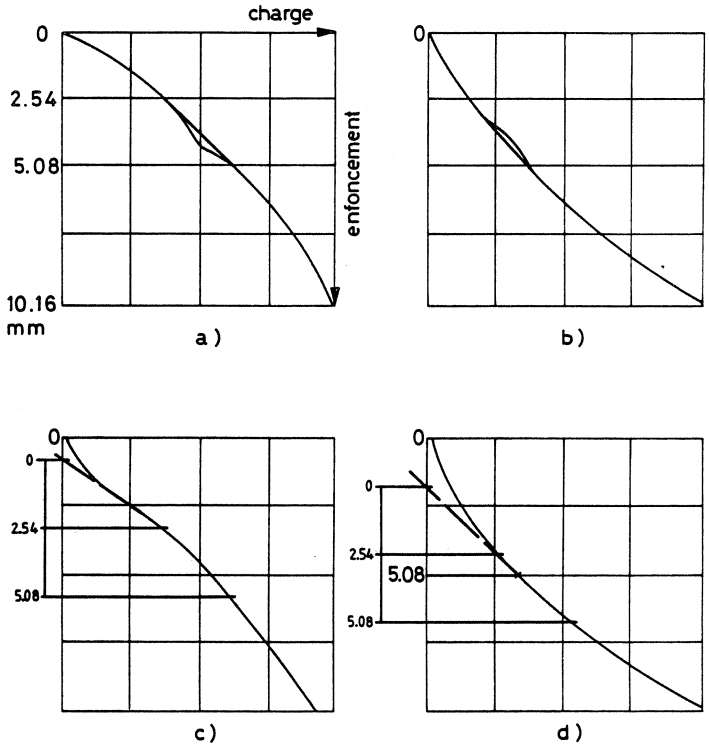

Fig. 4.3 Origine des courbes charges-enfoncement

4.2 RESULTATS

4.2.1 Saturation

La figure 4.4 montre la relation entre deux grandeurs qui se laissent déterminer facilement: le gonflement et la masse d'eau absorbée. Cette relation peut être considérée comme linéaire. Le coefficient de corrélation est de 0.90 pour la Grave II, de 0.98 pour la Grave III et de 1.00 pour le Limon.

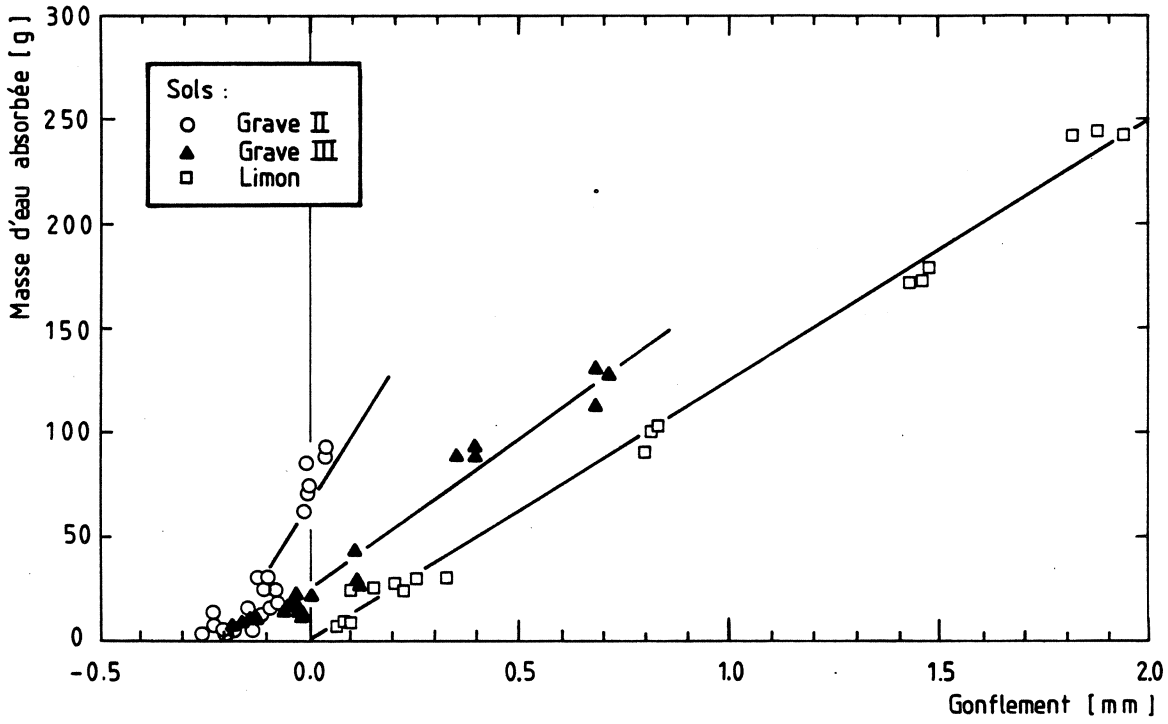

Fig. 4.4 Eau absorbée pendant la saturation

Les écarts dans la Grave II sont probablement dus à des inhomogénéités de ce sol grossier.
La figure 4.5 est une autre représentation de la même relation où les éprouvettes soumises à la procédure rapide sont séparées de celles soumises à la procédure lente. On y voit que ces deux séries sont difficilement sans autres comparables.
Les figures 4.6 à 4.8 montrent la relation entre la teneur en eau initiale et la masse d'eau absorbée pendant la saturation.

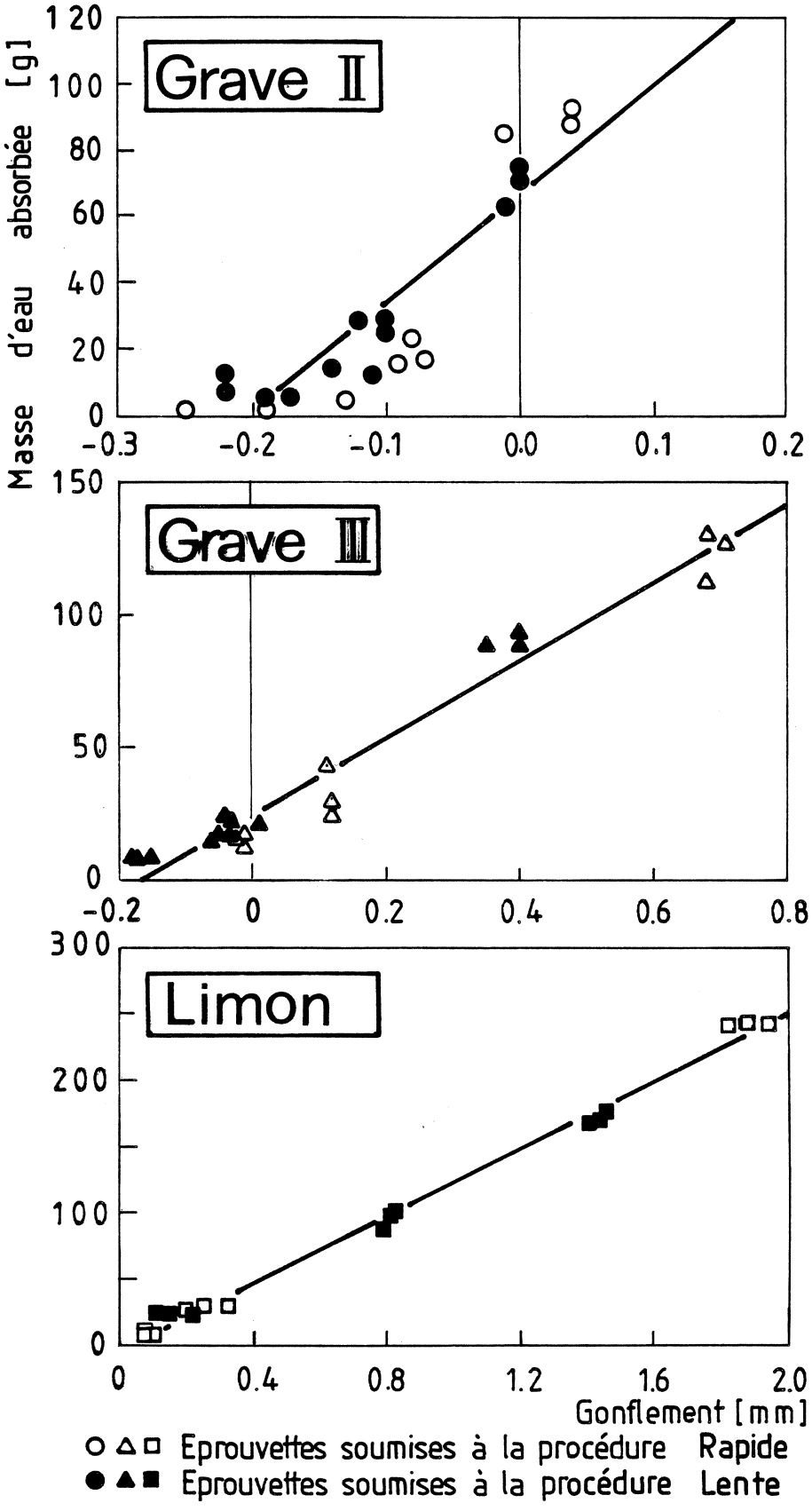

Fig. 4.5 Eau absorbée pendant la saturation pour chaque sol type et chaque procédure

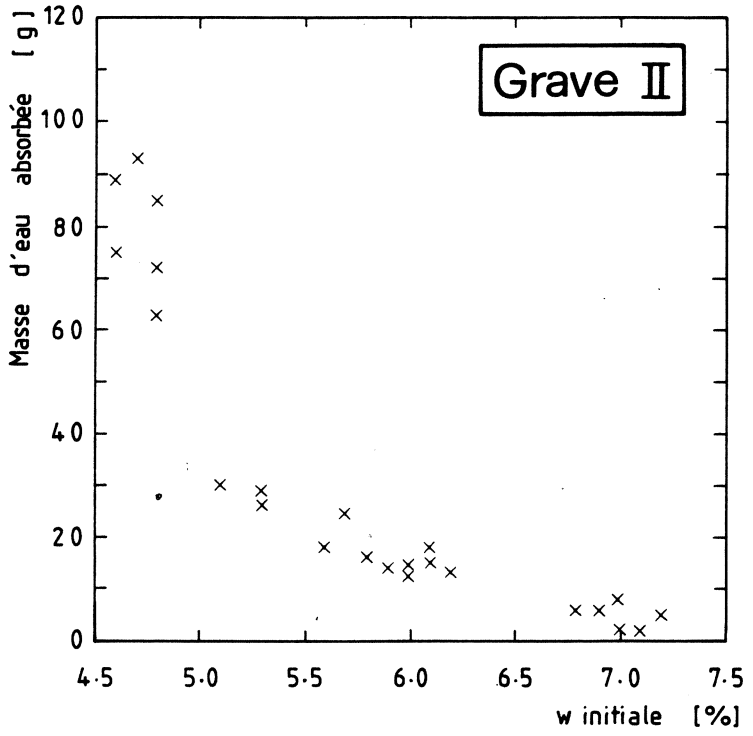

Fig. 4.6 Grave II : eau absorbée pendant la saturation en fonction de la teneur en eau initiale

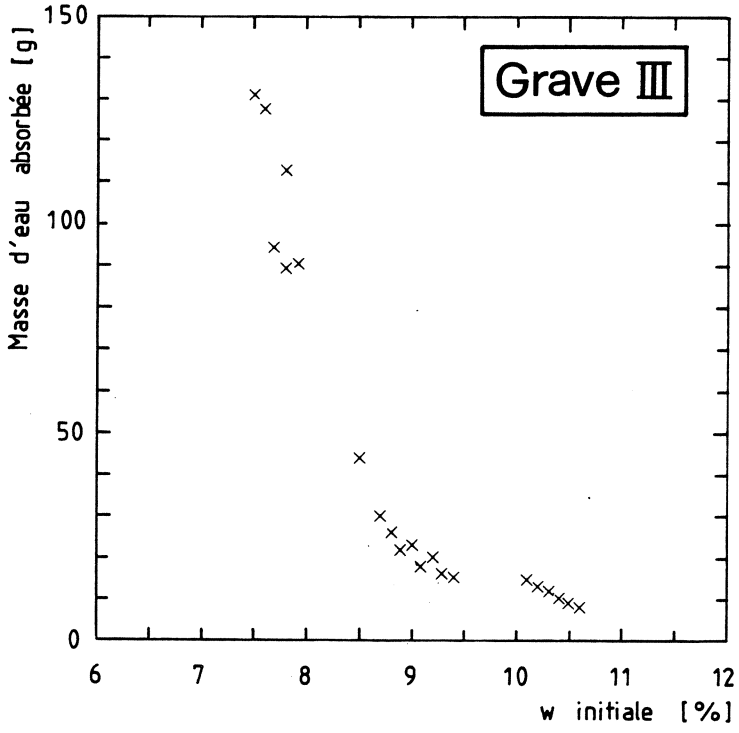

Fig. 4.7 Grave III : eau absorbée pendant la saturation en fonction de la teneur en eau initiale

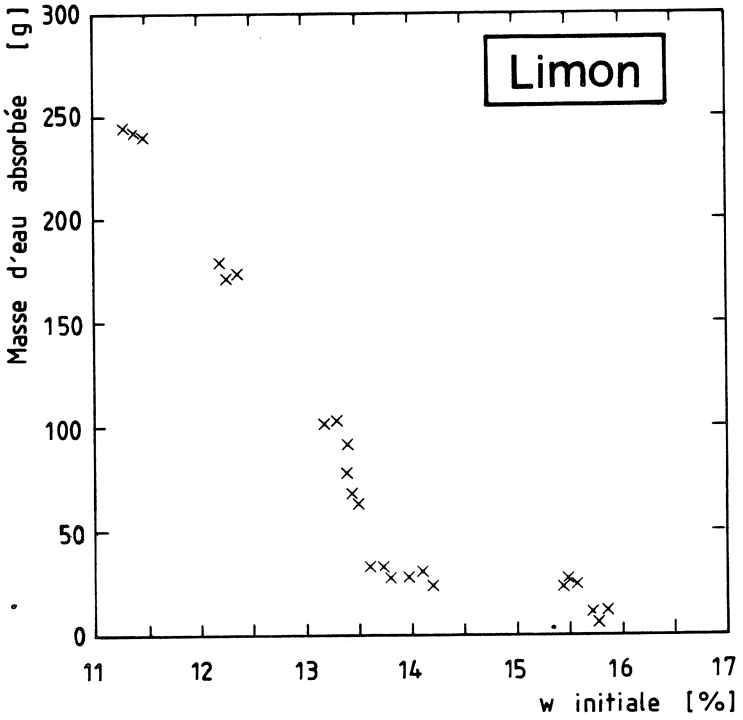

Fig. 4.8 Limon : eau absorbée pendant la saturation en fonction de la teneur en eau initiale

La détermination de la teneur en eau initiale sur une fraction de l'éprouvette n'est pas très précise. La différence entre la teneur en eau finale calculée à partir de la teneur en eau initiale mesurée et de la masse d'eau absorbée pendant tout l'essai, et la teneur en eau finale mesurée (échantillon démoulé) était parfois considérable. Les mesures des teneurs en eau ont été corrigées de façon à ce que la teneur en eau calculée corresponde à celle mesurée. En outre, on a admis une certaine corrélation entre la teneur en eau initiale et la masse d'eau absorbée.
La figure 4.9 montre la variation de la teneur en eau en fonction du degré de saturation initial. Un symbole correspond à la valeur moyenne d'une série de trois éprouvettes.
Les valeurs Sr initiales optimum marquées par des lignes verticales ont été déterminées par calcul.

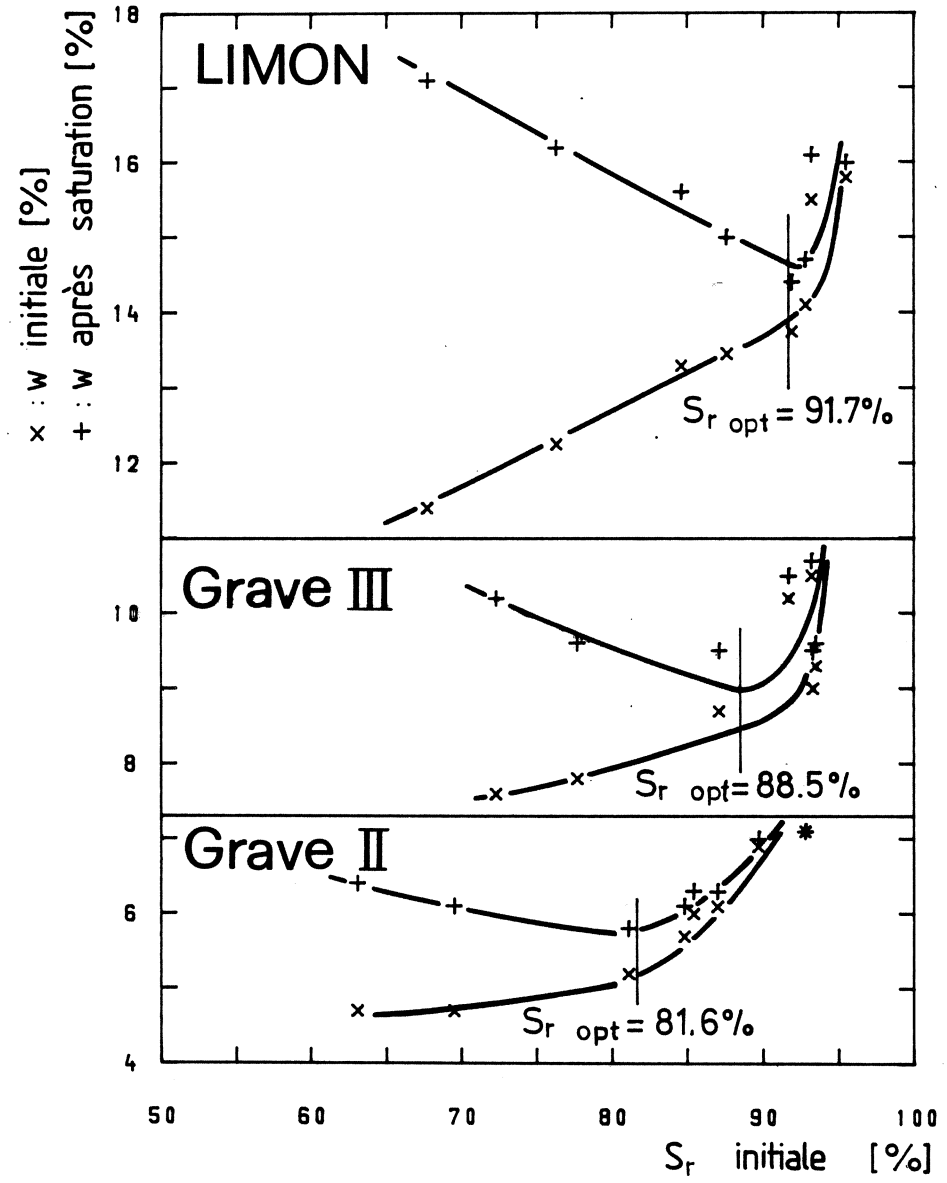

Fig. 4.9 Teneur en eau initiale et après saturation en fonction de la saturation initiale

4.2.2 Période du gel - dégel

Les figures 4.11 à 4.13 montrent les gonflements pendant le gel. Une courbe représente la valeur moyenne d'une série de trois éprouvettes.
Le gonflement d'une éprouvette à l'autre varie fortement. Cela est entre autre dû aux conditions thermiques différentes au travers du congélateur, ce qui est clairement démontré par la figure 4.10.

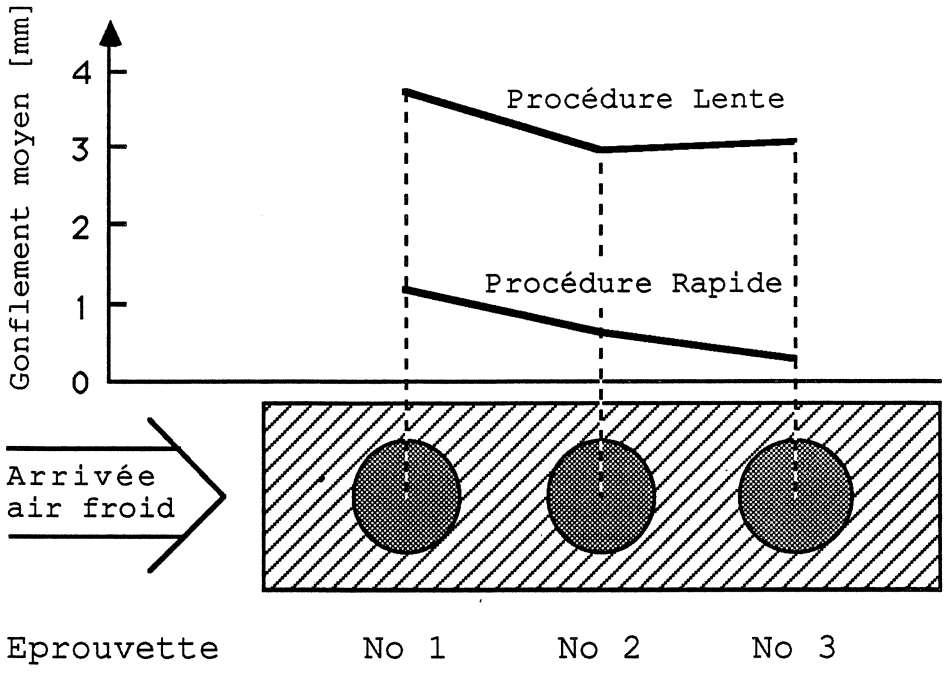

Fig. 4.10 Gonflements selon la position de l'éprouvette dans le congélateur

Avec la procédure rapide, le gonflement moyen des 9 éprouvettes à la position No 1 est environ trois fois plus grand que celui des 9 éprouvettes à la position No 3. Ce phénomène est moins prononcé pour la procédure lente. La position des éprouvettes n'influence par contre pas les valeurs CBR_3.

En ce qui concerne les essais réalisés avec la **procédure rapide**, nous pouvons faire les remarques suivantes:

- La série compactée sur la branche sèche produit toujours le gonflement le plus grand.
- La Grave II et la Grave III produisent le même gonflement.
- Le Limon gonfle légèrement plus que les Graves.
- Généralement, le gonflement se produit entièrement durant la première moitié de l'essai.

Sur la **procédure lente**, nous pouvons faire les remarques suivantes:

Sur la période de gel:

- La série compactée sur la branche sèche produit également toujours le gonflement le plus grand.
- Les autres séries montrent des gonflements semblables.

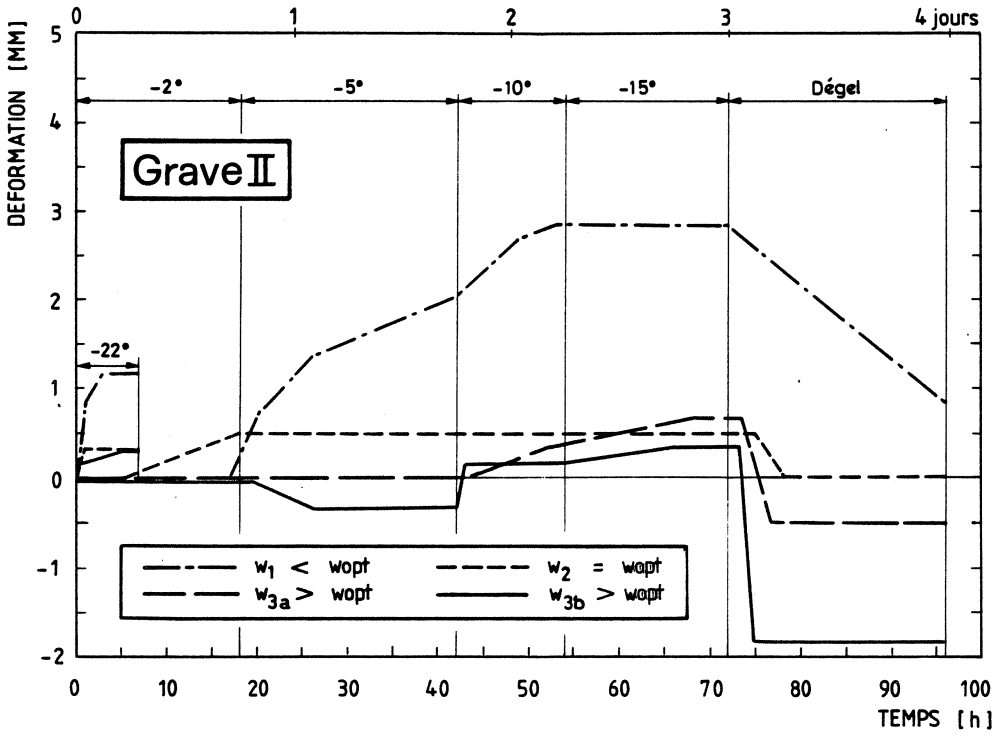

Fig. 4.11 Grave II : gonflements en fonction du temps

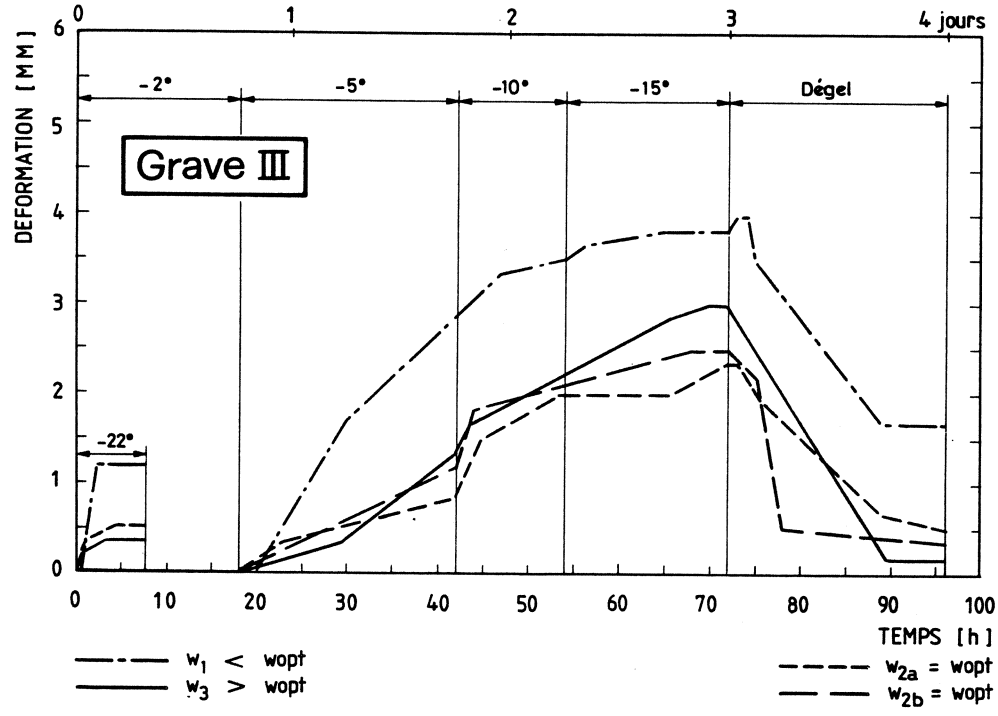

Fig. 4.12 Grave III : gonflements en fonction du temps

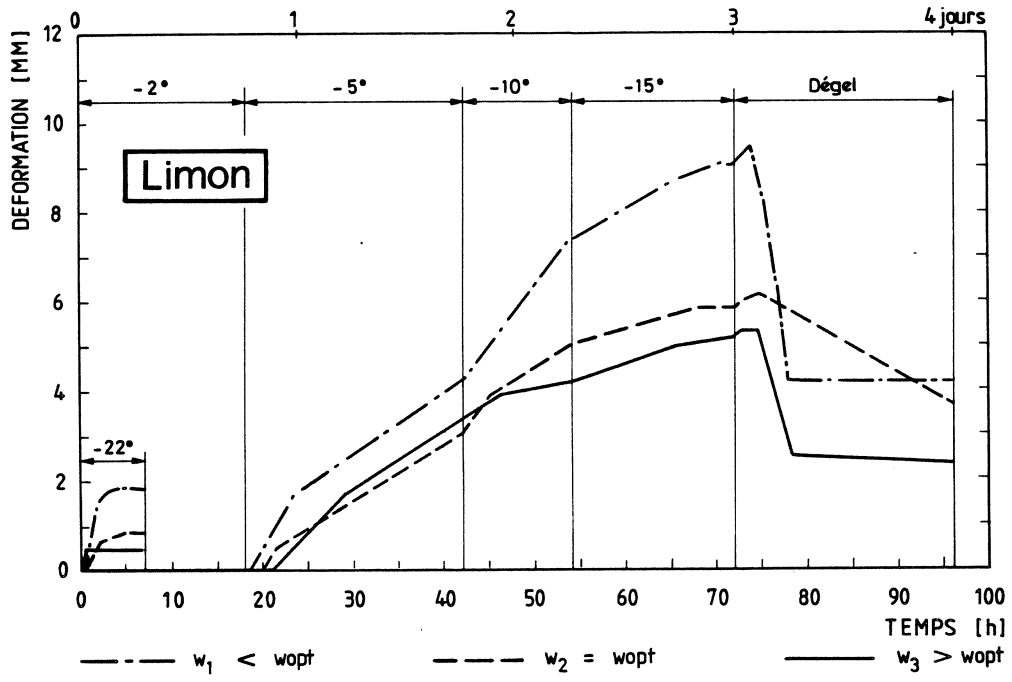

Fig. 4.13 Limon : gonflements en fonction du temps

- La Grave II ne gonfle que si elle est compactée sur la branche sèche.
- La Grave III gonfle plus que la Grave II.
- Le Limon gonfle plus que les Graves.
- Pendant la première période (18 heures à - 2°C) seule une série a commencé à gonfler.
- Généralement, la vitesse de gonflement diminue au cours d'une période à température constante. Elle augmente de nouveau quand la température est abaissée.

Sur la période du dégel:

- Les séries compactées à la teneur en eau optimum montrent généralement le tassement le plus petit.
- Les séries de la Grave II compactées sur la branche humide ont des tassements considérables, quoique le gonflement soit faible. L'éprouvette s'est probablement consolidée pendant le gel, ce qui a masqué une partie du gonflement.
- Le tassement dû à la fonte des lentilles de glace semble se produire dans les premières six heures.

4.2.3 Poinçonnement CBR

Les figures 4.14 à 4.16 représentent le comportement des trois sols types pendant les différentes périodes de l'essai, ceci toujours en fonction de la teneur en eau initiale w_i: en haut le compactage exprimé par la masse volumique apparente sèche (ρ_{d_i}), au milieu la variation de la teneur en eau au cours de l'essai et en bas la valeur CBR_3.

Grave II (Fig. 4.14)

Les valeurs CBR_3 sont semblables pour les deux procédures, rapide et lente. Sur la branche humide on peut constater une légère diminution de ces valeurs pour la procédure lente. La teneur en eau finale est aussi indépendante de la procédure. Enfin, les éprouvettes avec $w_i \gg w_{opt}$ montrent une diminution de la teneur en eau au cours de l'essai.

Grave III (Fig. 4.15)

Par rapport à la procédure rapide, la procédure lente donne des valeurs CBR_3 nettement plus petites et pour $w_i \gg w_{opt}$, les valeurs CBR_3 deviennent très faibles ceci indépendamment de la procédure. La teneur en eau finale ne dépend que peu de la procédure.

Limon (Fig. 4.16)

Pour les éprouvettes compactée à w_{opt} la procédure rapide détermine des valeurs CBR_3 beaucoup plus élevées qu'avec la procédure lente qui produit elle des valeurs CBR_3 très faibles et ne variant presque pas en fonction de la teneur en eau initiale et donc du degré de compactage.

La représentation de la valeur CBR dans une échelle logarithmique est préférable à celle en échelle linéaire. C'est d'ailleurs cette représentation qui a été choisie dans la nouvelle norme SN 640'317a pour le classement de la portance des sols (tableau 4.2).
En représentant la valeur CBR_3 dans une échelle logarithmique, on a trouvé des relations linéaires avec:
- la masse volumique apparent sèche,
- le logarithme du pourcentage des grains fins,
- le gonflement résiduel après le dégel.

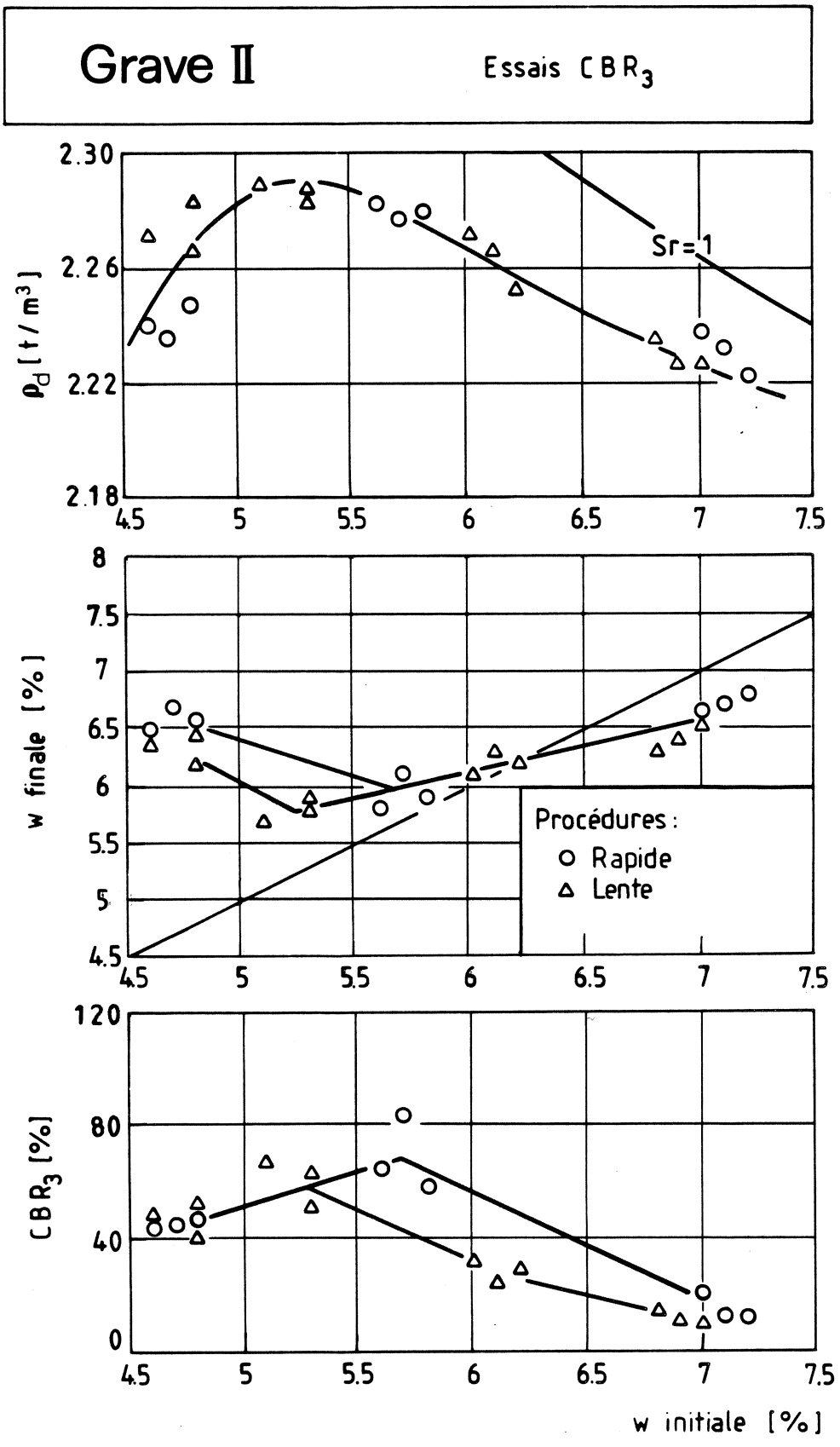

Fig. 4.14 Grave II : masse volumique, teneur en eau finale et valeur CBR3 en fonction de la teneur en eau initiale

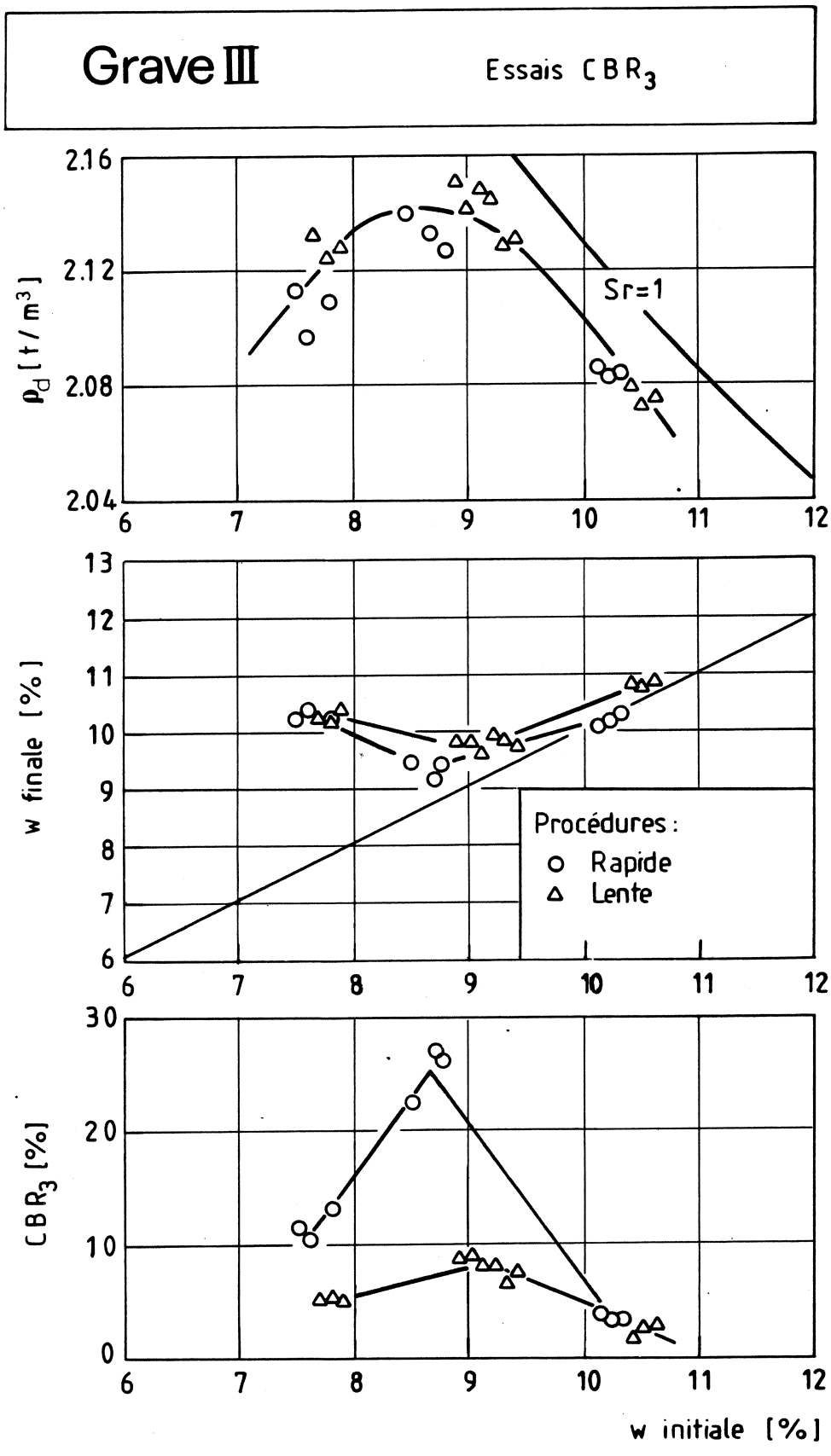

Fig. 4.15 Grave III : masse volumique, teneur en eau finale et valeur CBR3 en fonction de la teneur en eau initiale

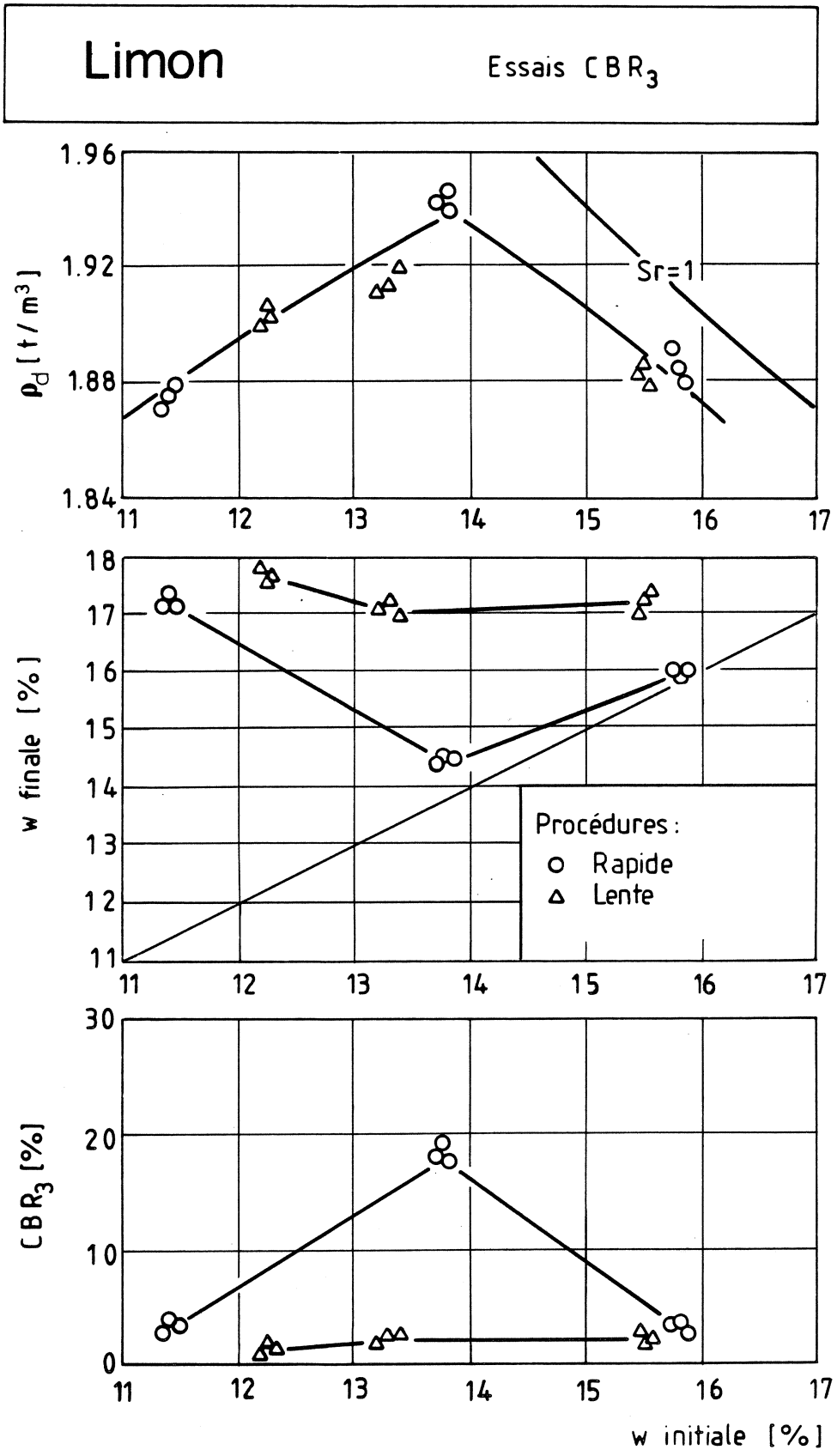

Fig. 4.16 Limon : masse volumique, teneur en eau finale et valeur CBR3 en fonction de la teneur en eau initiale

Classe	Portance	CBR
S1	faible	3....6
S2	moyenne	6...12
S3	élevée	12...25
S4	très élevée	> 25

Tableau 4.2 Portance en fonction du CBR (SN 640'317a)

La représentation du log(CBR) en fonction du pourcentage de la masse volumique apparente sèche optimale permet de comparer les valeurs CBR
- obtenues par des procédures différentes (rapide-lente, lente-nouvelle, CBR_1-CBR_3)
- obtenues sur des sols différents.

Cette représentation fait l'objet de la figures 4.17, où les procédures rapide et lente sont comparées. On y voit l'importance d'un bon compactage. Les essais exécutés suggèrent l'existence d'une relation linéaire entre le log(CBR_3) et ρ_d/ρ_{dopt} pour $\rho_d > 0.97 \cdot \rho_{dopt}$. On obtient une bonne corrélation surtout pour la procédure lente.

Commentaires sur les différentes séries:
- **Grave II Procédure Rapide:** La mauvaise corrélation doit être due à la série avec $CBR_3 \cong 45$. Sa teneur en eau initiale devait être surestimée et donc ρ_d sous-estimé.
- **Grave II Procédure Lente:** Bonne corrélation de 0.97.
- **Grave III Procédure Rapide:** Bonne corrélation de 0.96.
- **Grave III Procédure Lente:** Bonne corrélation de 0.94.
- **Limon Procédure Rapide:** Il faudrait vérifier la relation linéaire en exécutant une série à $0.985 \cdot \rho_{dopt}$.
- **Limon Procédure Lente:** La portance est très faible et il manque une série d'éprouvettes compactées à l'optimum Proctor.

La figure 4.18 réunit les six relations de la figure 4.17 avec une graduation de fond représentant les quatre classes de portance définies par la nouvelle norme SN 640'317a.

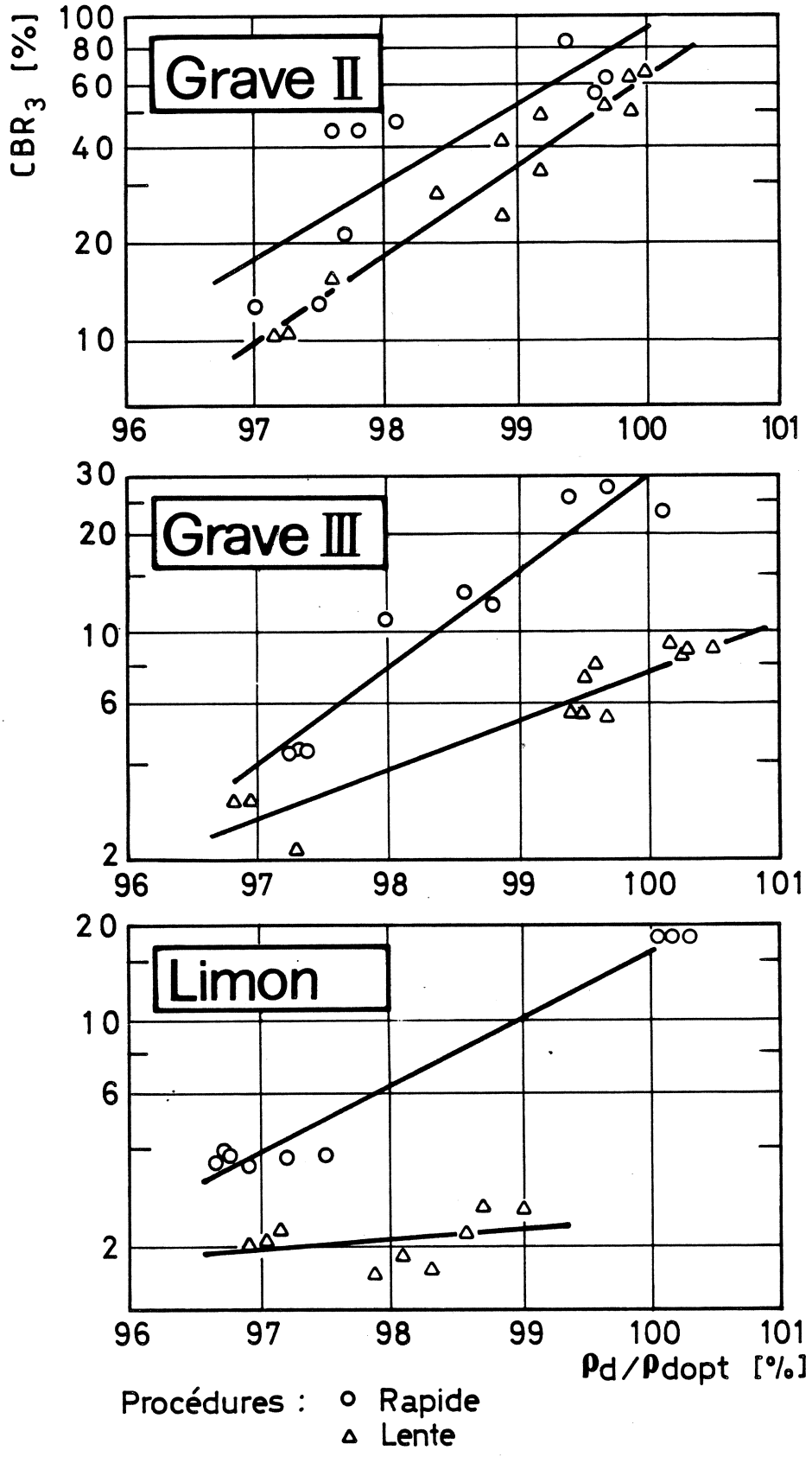

Fig. 4.17 Valeurs CBR3 en fonction de ρ_d / $\rho_{d\ opt}$

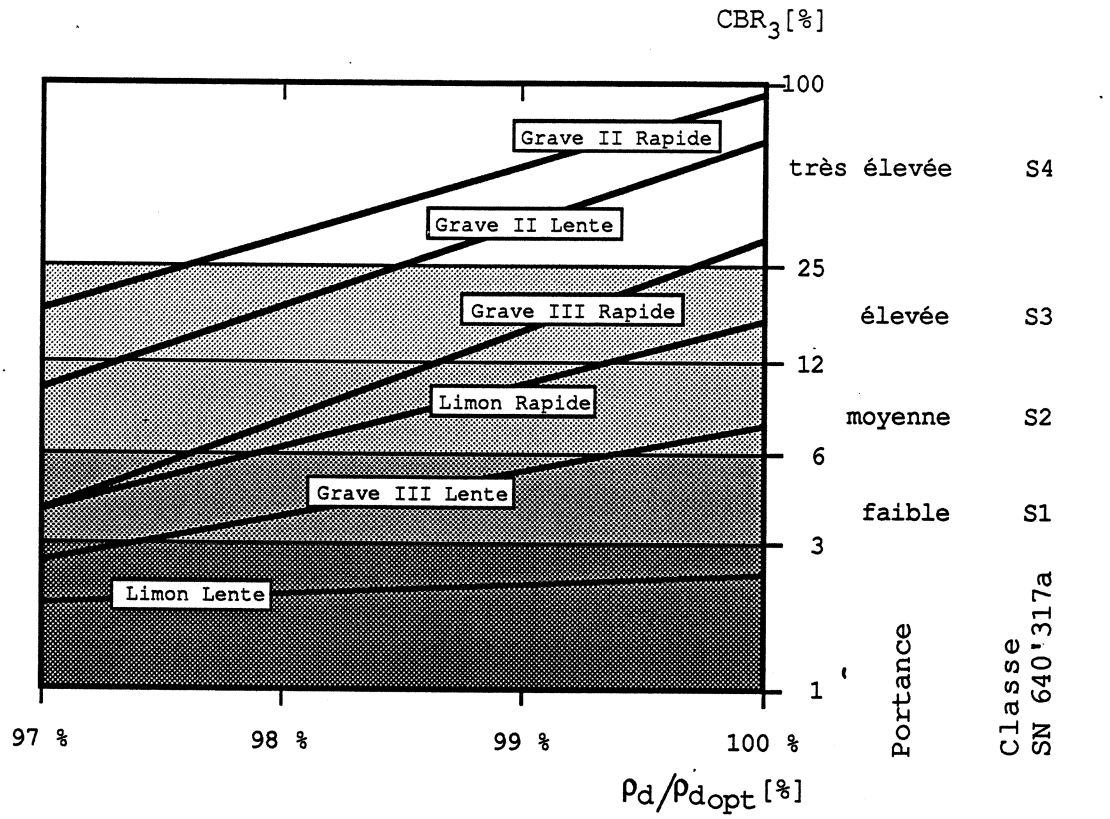

Fig. 4.18 Classes de portance et relation $CBR_3 = f(\rho_d/\rho_{dopt})$

		ρ_d par rapport à ρ_{dopt}			
		97%	98%	99%	100%
Grave II	CBR_3 Rapide (R)	18.1	31.1	53.6	92.4
	CBR_3 Lente (L)	9.9	18.5	34.5	64.3
	L/R	0.55	0.59	0.64	0.70
Grave III	CBR_3 Rapide (R)	3.9	7.8	15.4	30.6
	CBR_3 Lente (L)	2.6	3.7	5.3	7.6
	L/R	0.67	0.47	0.34	0.25
Limon	CBR_3 Rapide (R)	3.9	6.3	10.1	16.4
	CBR_3 Lente (L)	1.9	2.1	2.2	2.4
	L/R	0.49	0.33	0.22	0.15

Tableau 4.3 Valeurs caractéristiques des essais CBR_3

Quelques valeurs caractéristiques tirées des relations de la figure 4.18 font l'objet du tableau 4.3. Elles permettent différentes constatations intéressantes:

- La procédure lente donne toujours des valeurs CBR_3 beaucoup plus faibles que la procédure rapide. Le rapport entre ces deux valeurs dépend de la masse volumique, surtout dans le Limon et la Grave III. Pour ces deux sols types le rapport le plus faible est observé pour les éprouvettes compactées à l'optimum Proctor. Pour une densité de $0.99 \cdot \rho_{dopt}$ la valeur CBR_3 lente atteint 64 % de la valeur CBR_3 rapide pour la Grave II, 34 % pour la Grave III et 22 % pour le Limon.
- Les valeurs CBR_3 de la **Grave II**, qui sont de loin les plus élevées, sont fortement réduites par un compactage en dessous de w_{opt}: une réduction de la masse volumique à $0.99 \cdot \rho_{dopt}$ diminue la valeur CBR_3 de plus de 40 % pour les deux procédures.
- La **Grave III** donne des valeurs CBR_3 qui sont plus proches de celles du Limon que celles de la Grave II, ceci surtout avec la procédure rapide. Pour cette grave une réduction de la masse volumique à $0.99 \cdot \rho_{dopt}$ diminue la valeur CBR_3 de 50 % avec la procédure rapide et de 30 % avec la procédure lente.
- Pour le **Limon**, la procédure lente conduit à une perte de portance quasi totale. Ce qui n'est pas du tout le cas avec la procédure rapide.

Les figures 4.19 et 4.20 montrent la relation entre la valeur CBR_3 et le pourcentage de grains fins. Les six valeurs CBR_3 sont tirées de la figure 4.18 en fixant la masse volumique à l'optimum Proctor. La corrélation est très bonne quelque soit la limite choisie pour les grains fins: 0.02 ou 0.06 mm.

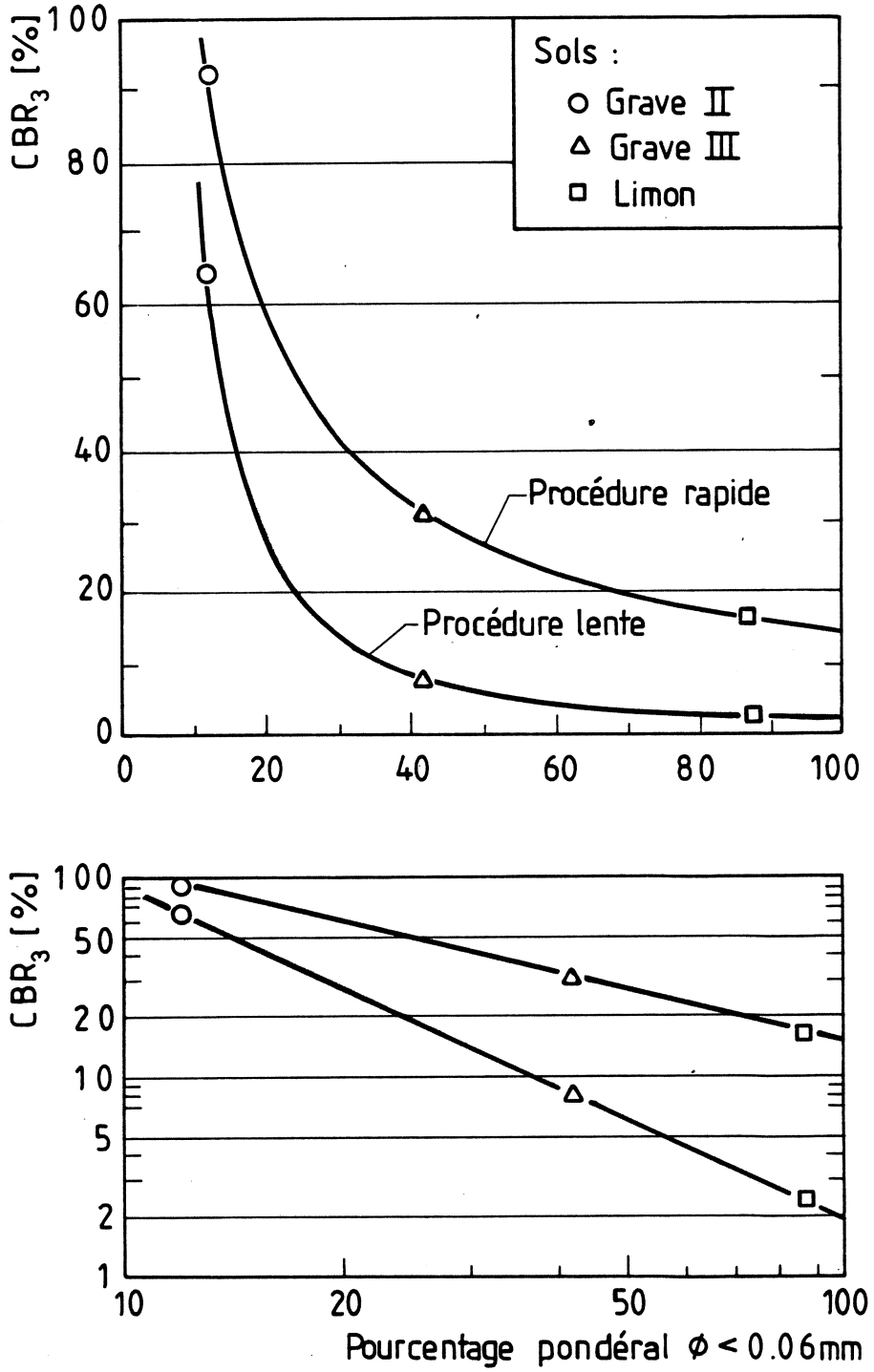

Fig. 4.19 Valeurs CBR3 en fonction du pourcentage des grains < 0.06 mm (régression logarithmique)

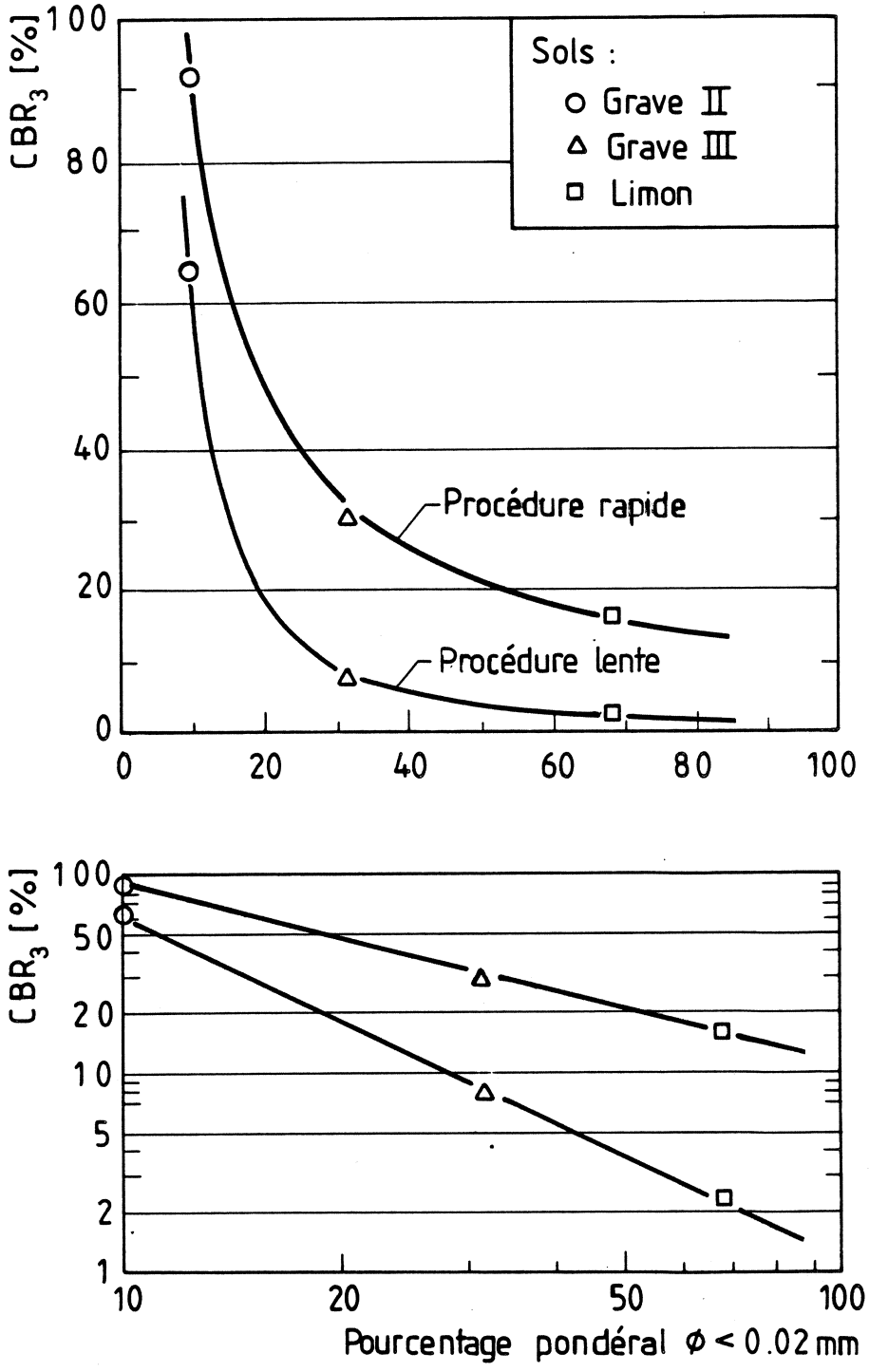

Fig. 4.20 Valeurs CBR3 en fonction du pourcentage des grains < 0.02 mm (régression logarithmique)

4.3 CRITIQUE

4.3.1 Préambule

Pour pouvoir caractériser correctement la sensibilité au gel d'un sol il faut exécuter un essai qui inclut le dégel. Un tel essai permet de suivre l'évolution des déformations pendant le gel et le dégel. En particulier, le gonflement résiduel après dégel correspondant à l'ameublissement du sol est une valeur caractéristique; c'est, en effet, cet ameublissement ainsi que l'augmentation correspondante de la teneur en eau qui détermine la diminution de la portance.
L'essai CBR_3 répond à ces critères; il permet de déterminer plusieurs paramètres caractérisant la sensibilité au gel d'un sol, soit:
- le gonflement total pendant le gel,
- la vitesse du gonflement pendant le gel,
- le gonflement résiduel après dégel et
- la diminution de la capacité portante après dégel.

Le principe de l'essai CBR_3 est bon car le rapport entre les informations tirées de cet essai et son coût est favorable. Par contre, pour les raisons évoquées ci-dessous, les procédures exécutées en Suisse doivent être améliorées et l'appareillage modifié.

4.3.2 Procédures

La durée des deux procédures est trop longue. La procédure rapide prend six jours et la procédure lente neuf jours. Le tableau 4.4 détaille la durée des différentes phases des deux procédures.

Procédure	Rapide	Lente
Préparation	1 jour	1 jour
Saturation	4 jours	4 jours
Gel	0.3 jours	3 jours
Dégel	0.7 jours	1 jour

Tableau 4.4 Durée des essais CBR_3

On voit que la préparation des éprouvettes avant la période du gel prend beaucoup de temps. Il faudrait, si possible, limiter la durée de l'essai à une semaine, soit à cinq jours ouvrables. La procédure pourrait alors se dérouler comme suit:

Premier jour:	Préparation des éprouvettes
Deuxième jour:	Compactage puis accommodation aux conditions initiales: surcharge, température.
Troisième jour:	Gel
Quatrième jour:	Dégel
Cinquième jour:	Poinçonnement CBR

Durée de la saturation

La norme SN 670'320a prescrit quatre jours de saturation pour l'essai CBR_2. Le temps nécessaire pour la saturation complète dépend du sol. La Grave II est saturée après une journée tandis que le Limon absorbe de l'eau pendant plus de dix jours.
Quatre jours de saturation sont aussi demandés pour l'essai CBR_3. GIUDICETTI (1973) a proposé dans sa thèse pour son essai lent la prolongation de cette période jusqu'à ce que le volume de l'éprouvette se stabilise. Enfin, dans la plupart des essais au gel exécutés dans le monde il n'y a pas de période de saturation.
Nous n'avons pas examiné l'influence de la saturation sur le comportement au gel des sols. Pour les éprouvettes compactées à une teneur en eau égale ou supérieure à w_{opt}, cette influence devrait être limitée. Par contre, pour une éprouvette compactée à une teneur en eau inférieure à w_{opt}, cette influence ne devrait pas être négligée: dans ces conditions l'éprouvette absorbe beaucoup d'eau et gonfle. Pendant nos essais ce gonflement a atteint 2 mm malgré une teneur en eau que légèrement au-dessous de l'optimum. La masse volumique et la teneur en eau, qui influencent les caractéristiques thermiques et hydrauliques et ainsi le comportement au gel et au dégel, dépendent donc de la durée de la saturation. Qui plus est, ces deux caractéristiques ne sont pas constantes sur la hauteur de l'éprouvette car son extrémité inférieure est bloquée par la plaque de base du moule alors que sa partie supérieure peut gonfler presque librement (surcharge); il en résulte une teneur en eau qui décroît du haut vers le bas.
En ce qui concerne l'effet de la saturation, il est donc avantageux de compacter les éprouvettes à une teneur en eau légère-

ment supérieure à w_{opt}. Ainsi une période de saturation n'est plus nécessaire.

Durée du gel

Certains laboratoires exécutent des essais gonflement au gel en gelant l'éprouvette pendant plus d'une semaine. Au CRREL (USA) la vitesse de propagation du front de gel est maintenue à une valeur constante pendant 12 jours.
La procédure lente de l'essai CBR_3, qui prévoit également une vitesse de propagation du front de gel constante, ne dure cependant que trois jours.
Dans l'essai UNH - un autre essai de gonflement au gel développé aux Etats-Unis - la période du gel est raccourcie à un jour. Pendant toute la période du gel l'isotherme 0°C pénètre continûment jusqu'au milieu de l'éprouvette. Le fait que le front de gel pénètre continûment évite la formation de lentilles de glace épaisses.
Toutes les procédures connues ne correspondent évidemment pas aux conditions réelles, même si la pénétration du front de gel est soigneusement réglée, car d'autres paramètres comme le gradient de la température et le gradient de la succion sont tout aussi importants. Des conditions réelles ne sont possibles que par un essai en vraie grandeur.

4.3.3 Appareillage

L'appareillage actuel a deux inconvénients majeurs:
- les isothermes ne sont pas horizontales,
- le gradient de la température est trop élevé.

En outre, la vitesse de propagation du front de gel ne peut être maintenue constante avec les dispositifs utilisés.

Allure des isothermes

La norme ne prescrit qu'un matériau inoxydable pour le moule. Par conséquent des moules métalliques sont utilisés pour l'essai CBR_3. Comme la conductibilité thermique des métaux est toujours considérablement plus élevée que celle du sol, les parois du moule métallique font pont thermique. Les zones le long des parois de l'éprouvette se refroidissent donc plus vite et un gradient thermique horizontale s'établit. Le front de gel ne se

déplace donc pas verticalement, ce qui contrarie le processus de formation des lentilles de glace.
Pour obtenir des isothermes horizontales il faut un moule en matière isolante (matière plastique), dont la conductibilité thermique est inférieure à celle du sol.
La mesure des températures en de nombreux points à l'intérieur d'une éprouvette CBR n'étant pas possible, nous avons simulé par un modèle mathématique (éléments finis, programme ADINAT, 1981) la diffusion des températures dans une éprouvette de sol placée dans des moules en acier, PVC et aluminium.
La figure 4.21 présente une synthèse des résultats d'un premier calcul réalisé sans tenir compte de la chaleur latente de congélation de l'eau et avec des caractéristiques thermiques du sol constantes.

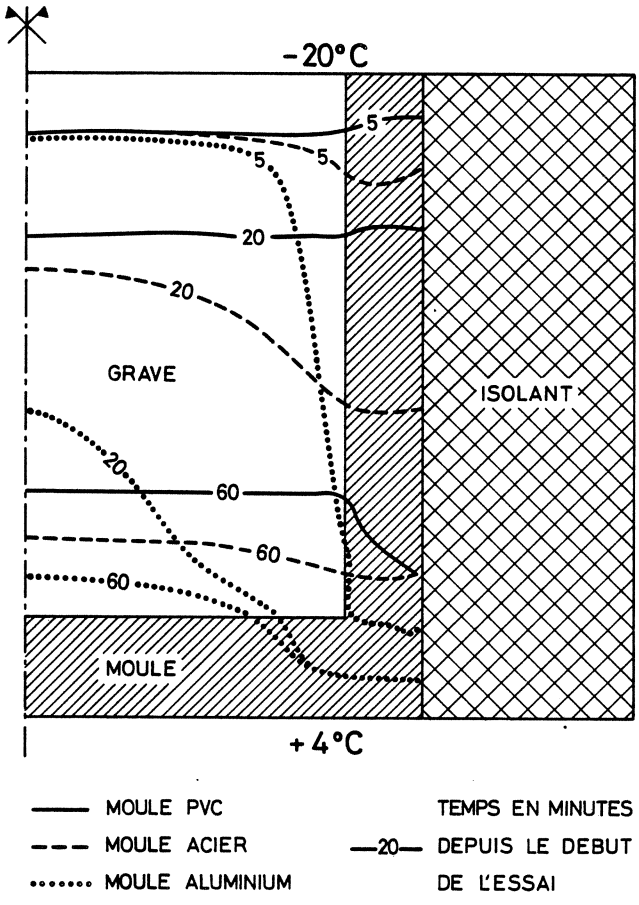

Fig. 4.21 Simulation numérique du mode de propagation du front de gel avec des moules CBR en acier, aluminium et PVC. Calcul sans chaleur latente et avec caractéristiques thermiques constantes

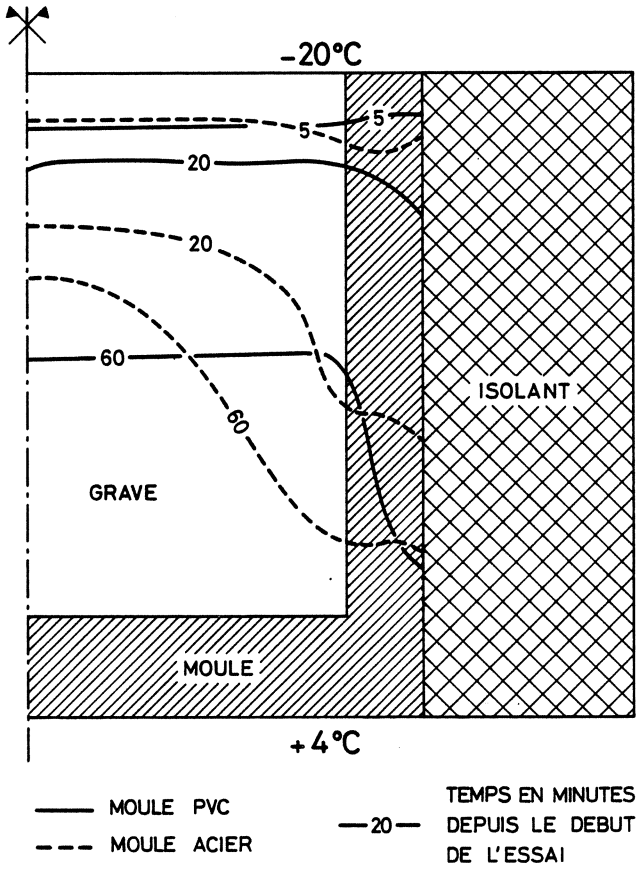

Fig. 4.22 Simulation numérique du mode de propagation du front de gel avec des moules CBR en acier et PVC. Calcul avec chaleur latente et caractéristiques thermiques du sol en fonction de la température.

La figure 4.22 fait la synthèse d'un calcul plus élaboré qui fait intervenir la chaleur latente et des caractéristiques thermiques du sol fonctions de la température, soit donc de condition plus proches de la réalité.
Les résultats de cette simulation doivent cependant être évalués en fonction de conditions aux limites de l'éprouvette très simplifiées; la température à la surface supérieure de l'éprouvette passait, par exemple, instantanément de +20°C à -20°C.
En comparant ces deux figures, on constate tout d'abord que la chaleur latente de congélation a une très grande importance. Sur la figure 4.22, qui résume les résultats de la simulation la plus précise, l'effet très important du pont thermique produit par le moule en acier est clairement démontré.

Cette simulation nous a aussi montré que la vitesse de propagation du front de gel dépassait de beaucoup la vitesse critique au-delà de laquelle des lentilles de glace ne peuvent se former; la condition de température imposée à la surface supérieure de l'éprouvette est cependant très sévère et peu réaliste.

Gradient de température

Entre la surface et le pied de l'éprouvette il existe une différence de température de 20°C (procédure lente). Il s'établit donc un gradient thermique d'environ 1.5°C par cm, qui est à peu près dix fois plus grand qu'en nature. Le gradient thermique produit le flux de chaleur et influence le flux d'eau. Il détermine largement la vitesse du gonflement.
On pourrait facilement diminuer le gradient de la température jusqu'à environ 0.5°C par cm et ainsi se rapprocher à la réalité. Les températures à appliquer seraient de - 4°C à la surface et de + 2°C au pied de l'éprouvette. La réalisation de gradients thermiques encore plus faibles poserait cependant beaucoup de problèmes.

5. GONFLEMENT AU GEL SELON PROCEDURES ACTUELLES

5.1 MODES OPERATOIRES

Deux procédures ont été utilisées pour les essais systématiques:
- la procédure IGB
- la procédure LMS

avec les différentes phases suivantes: tamisage, préparation, compactage, saturation et gel.
Les deux procédures se distinguent à partir de la saturation.

Tamisage

Les dimensions du moule (diamètre 56 mm, hauteur 100 mm) exigent que le diamètre des grains soit plus petit que 10 mm. Selon la norme SN 670'376: Stabilisation des sols au ciment, un essai reste valable si le pourtentage des grains inférieurs à 10 mm est au minimum de 45 % (D_{max} = 60 mm). La Grave II en contient 59 %. Le pourcentage suivant est donc éliminé:

Grave II	41%
Grave III	26%
Limon	0%

Les éprouvettes soumises aux essais de gonflement ont donc les granulométries modifiées du tableau 5.1.
Après élimination des grains > 10 mm un échantillon de Grave II contient 20% de particules fines et correspond à un GC-CL. Un échantillon de Grave III en contient 57% et correspond à un CL.

Préparation

Le sol, tamisé à 10 mm, est séché au four à 105°C, puis refroidi à la température ambiante. On ajoute l'eau nécessaire en malaxant bien l'échantillon à la main. Pour homogénéiser la teneur en eau, on la met dans un sac en plastique bien fermé pendant 24 heures. Un échantillon de 6 kg suffit pour compacter six éprouvettes.

SOL	Grave II	Grave III	Limon
< 10 mm	100%	100%	100%
< 2 mm	63%	81%	100%
< 0.06 mm	20%	57%	88%
< 0.02 mm	17%	43%	69%
< 0.002 mm	5%	15%	22%
gravier	37%	19%	0%
sable	43%	24%	12%
limon	15%	42%	66%
argile	5%	15%	22%

Tableau 5.1 Essais de gonflement : granulométrie des éprouvettes après élimination des grains > 10 mm

Compactage

L'énergie de compactage a été fixée à 0.76 MJ par m^3, ce qui correspond à 25 coups pour chacune des trois couches (poids du marteau 0.8 kg; hauteur de chute 0.305 m). Ce compactage correspond à celui de l'essai SN 670'376: Stabilisation des sols au ciment. Il se fait dans un moule en acier revêtu à l'intérieur de deux feuilles d'acétate d'une épaisseur de 0.2 mm. Une fente permet de démouler facilement l'éprouvette compactée. Pour éviter l'adhésion entre les deux feuilles d'acétate, elles sont séparées par une couche de graisse silicone.
On compacte ainsi 18 éprouvettes, soit une série de 6 éprouvettes pour chaque teneur en eau.

Saturation

La saturation a lieu dans le congélateur avec des conditions thermiques et hydrauliques bien déterminées. La température de l'eau est maintenue à 5°C environ. Son niveau se trouve à environ 15 mm au-dessus de la surface inférieure de l'éprouvette. Au cours de la saturation, on fait des lectures du gonflement. Les tiges qui servent à mesurer le gonflement sont séparées de l'éprouvette par des petites plaquettes en matière plastique.

Avec la **procédure IGB** la température de l'air est maintenue à 4°C. Généralement la stabilisation du volume est atteinte après deux jours. Pour nos essais on a choisi une durée constante de saturation de 64 heures (Fig. 5.1 ligne traitillée).
Avec la **procédure LMS** la température de l'air est maintenue à 5°C. La période de saturation a été fixée à 16 heures (Fig. 5.1 ligne pleine).

Gel

Les 18 éprouvettes sont isolés latéralement par un isolant thermique. Le programme de refroidissement de l'air fait l'objet de la figure 5.1. La température de l'eau a oscillé en moyenne entre 4°C et 6°C avec des valeurs extrêmes à 3°C et 7°C.

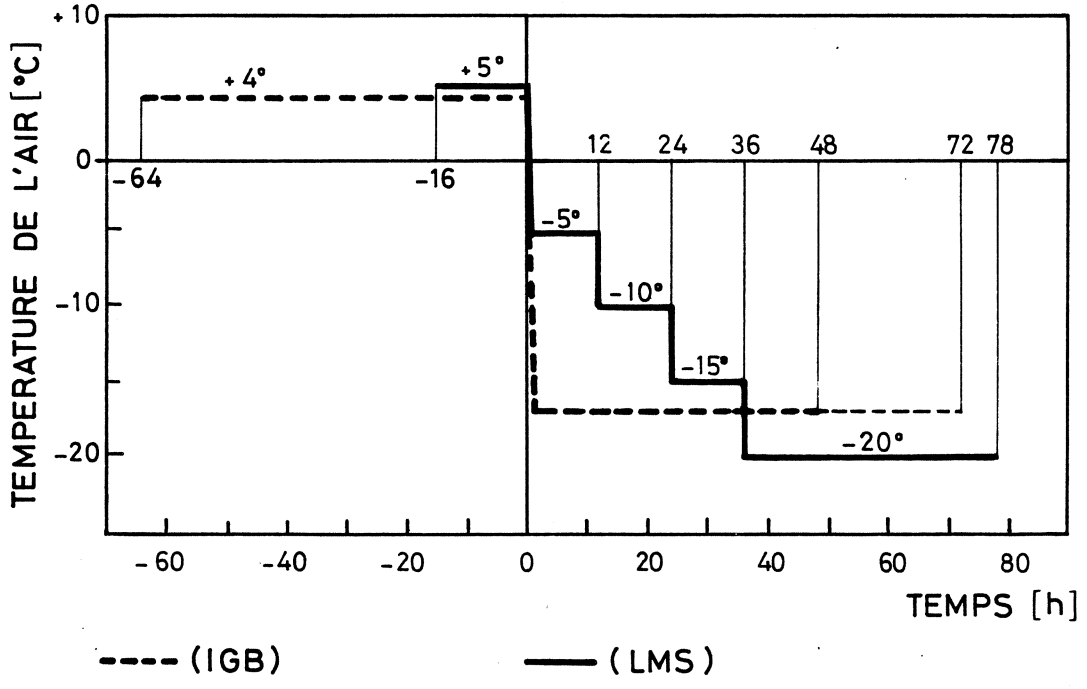

Fig. 5.1 Essais de gonflement : température de l'air pendant le gel

Avec la **procédure IGB** l'essai se fait à température constante. L'air est refroidi à - 17°C en une heure, puis cette température est maintenue pendant tout l'essai. Il est arrêté si la vitesse de gonflement est inférieure à 1 mm par jour. La durée minimale de la période du gel est de deux jours, la durée maximale de trois jours. Les trois sols types ont tous demandé une durée de trois jours.
La **procédure LMS** est un essai à température variable. Pendant 36 heures, l'air est refroidi en quatre paliers jusqu'à - 20°C, puis cette température est maintenue constante pendant le reste de l'essai. La durée de la période du gel est de 78 heures.

A la fin de l'essai on mesure le poids et la hauteur de chaque éprouvette. Puis on détermine l'endroit et l'épaisseur des lentilles de glace. Enfin, on mesure la teneur en eau de la partie gelée et de la partie non gelée.

5.2 RESULTATS

5.2.1 Résultats généraux

Les figures 5.2 à 5.4 démontrent le comportement des trois sols types au cours de l'essai de gonflement en fonction de la teneur en eau initiale, w_i. En haut, le compactage est exprimé par la masse volumique apparente sèche (ρ_{di}), le graphique du milieu donne la variation de la teneur en eau et celui du bas le gonflement dû au gel. La procédure IGB est représentée par des cercles et la procédure LMS par des triangles. Un symbole correspond à la valeur moyenne de six éprouvettes testées en même temps. La dispersion des résultats est exprimée par leurs écarts types. Pour compléter la courbe Proctor on a ajouté quelques éprouvettes - représentées par une croix - qui n'ont pas été soumises au gel.
Les mesures des teneurs en eau initiales n'ont pas pu être corrigées comme on l'a fait lors de l'essai CBR_3 car les teneurs en eau finales n'étaient pas assez fiables. Ainsi la masse volumique apparente sèche initiale, ρ_{di}, n'atteint pas la précision de celle déterminée lors des essais CBR_3. Pour cette raison on a renoncé à présenter les résultats en fonction de ρ_{di}.

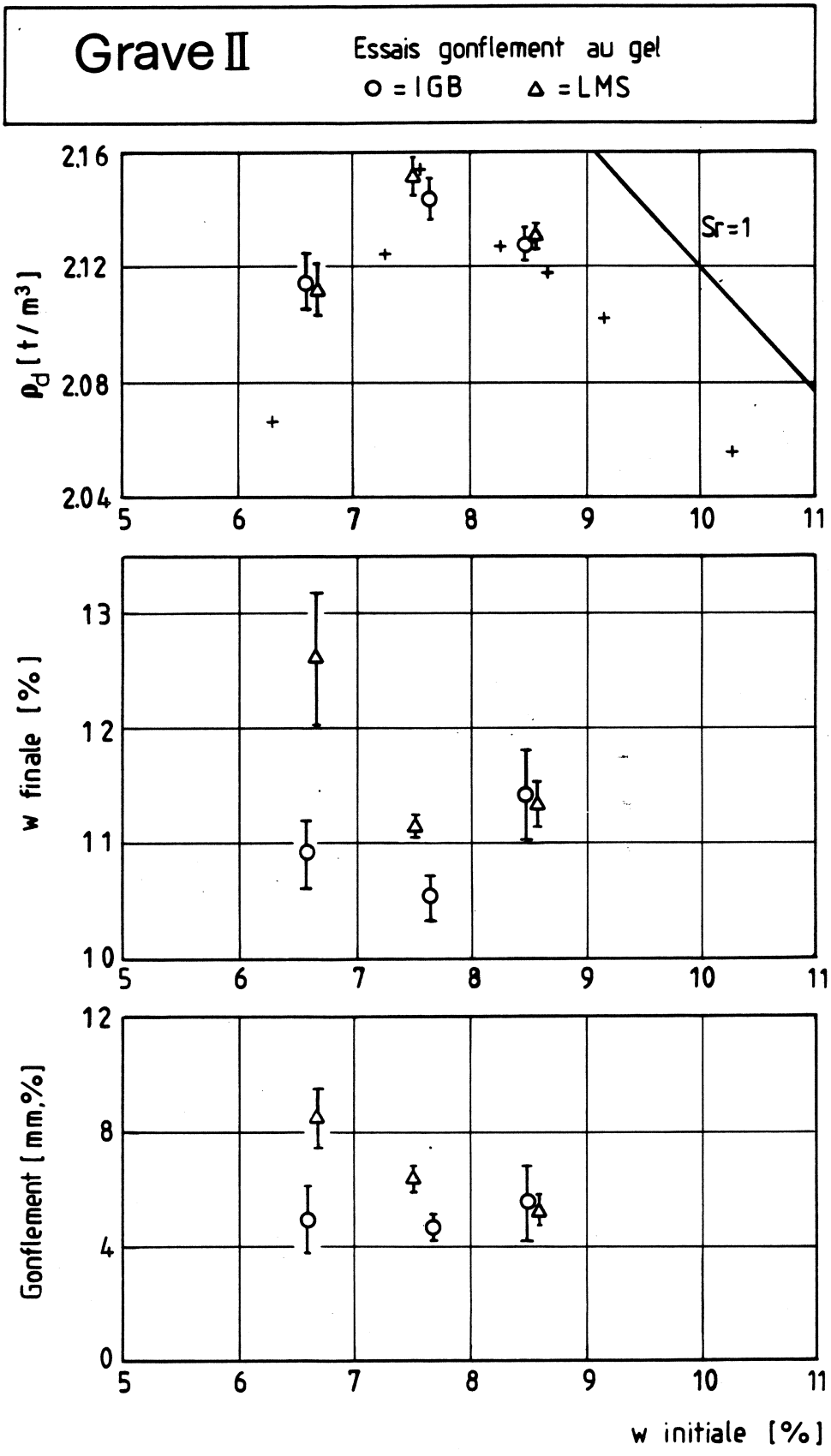

Fig. 5.2 Essais de gonflement : Résultats Grave II

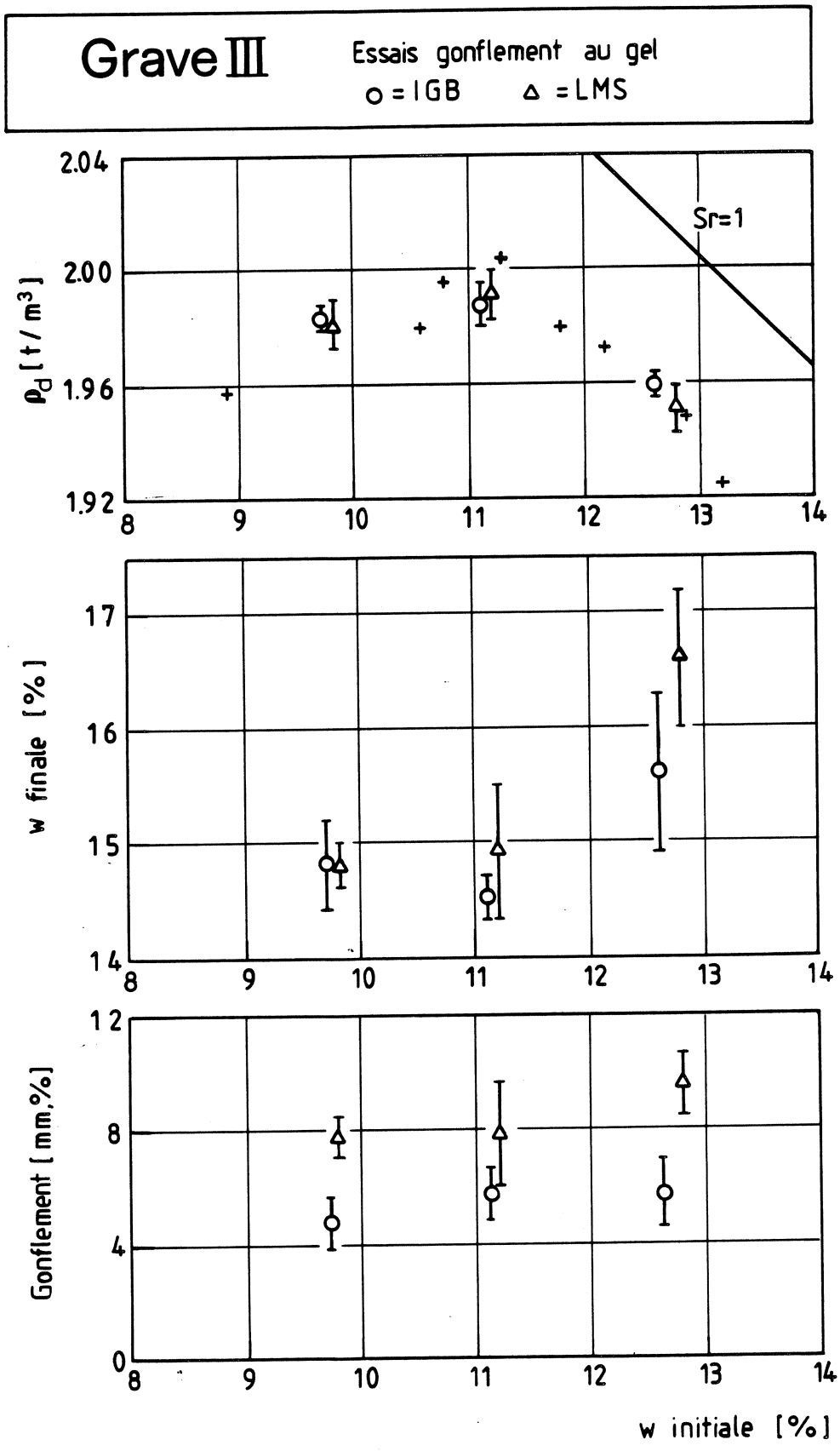

Fig. 5.3 Essais de gonflement : Résultats Grave III

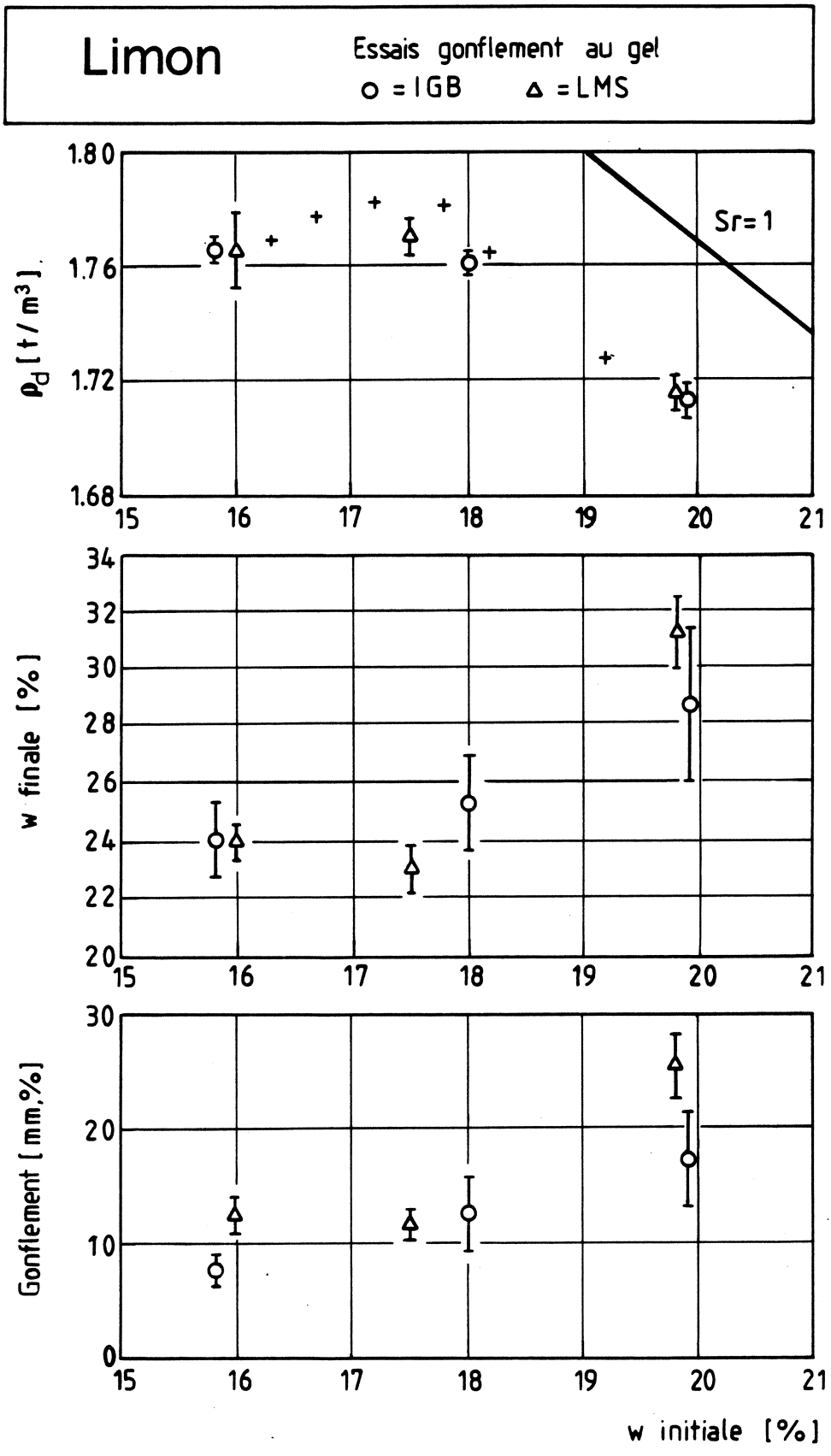

Fig. 5.4 Essais de gonflement : Résultats Limon

Pendant les essais CBR_3 on avait constaté que le gonflement au gel dépendait de la position de l'éprouvette dans le congélateur. Pendant les essais de gonflement on n'a pas pu contrôler si la position de l'éprouvette influençait les résultats car on a examiné trois différentes teneurs en eau initiales en même temps. A l'emplacement No 1 du congélateur (voir fig. 4.10) se trouvaient toujours les éprouvettes compactées à $w_i < w_{opt}$, à l'emplacement No 2 celles compactées à w_{opt} et à l'emplacement No 3 celles compactées à $w_i > w_{opt}$. Ainsi, le gonflement des éprouvettes compactées sur la branche sèche pourrait être éventuellement surestimé, et celui des éprouvettes compactées sur la branche humide sous-estimé.
L'interprétation des résultats n'est donc pas toujours très facile. L'étude des lentilles de glace (endroit, nombre, épaisseur) peut cependant donner certaines explications aux différents comportements des éprouvettes pendant l'essai de gonflement.
Le gonflement au gel est produit principalement par le développement de lentilles de glace. Le gonflement dû aux changements de phase de l'eau interstitielle (voir tableau 5.2) est faible relativement à celui produit par les lentilles. Pour le déterminer on a admis que l'éprouvette était entièrement saturée et qu'elle était gelée à 60 %.

	Grave II	Grave III	Limon
ρ_d [t/m^3]	2.13	1.98	1.75
ρ_s [t/m^3]	2.69	2.71	2.74
w_{sat} [%]	9.8	13.6	20.6
θ_{sat} [%]	20.9	26.9	36.1
ε [%]	**1.3**	**1.6**	**2.2**

Tableau 5.2 Gonflement ε dû au changement de phase de l'eau interstitielle

Une lentille de glace ne peut se former que si le front de gel pénètre l'éprouvette avec une vitesse inférieure à la vitesse critique, v_{crit}. En outre, la formation des lentilles de glace est favorisée aux endroits des inhomogénéités comme par exemple entre deux couches de compactage (surtout pour $w_i < w_{opt}$).
La **vitesse de propagation du front de gel** dépend du programme d'abaissement des températures de l'air, de la tempéra-

ture de l'eau baignant le pied de l'éprouvette et des caractéristiques thermiques du sol examiné, soit la chaleur latente de fusion [$J \cdot m^{-3}$], la chaleur spécifique [$J \cdot m^{-3} \cdot °C^{-1}$] et la conductibilité thermique [$W \cdot m^{-1} \cdot °C^{-1}$].
La **vitesse critique** dépend elle des caractéristiques hydrauliques de l'éprouvette qui déterminent la quantité d'eau s'écoulant vers le front de gel. Ce sont la conductibilité hydraulique (perméabilité) et la succion qui sont les deux fonctions de la teneur en eau. Il est difficile d'estimer l'influence d'une augmentation de la teneur en eau sur la vitesse critique car la conductibilité hydraulique augmente tandis que la succion diminue.
Le tableau 5.3 montre comment le gonflement en fin d'essai varie par rapport à une teneur en eau initiale croissante.

	Procédure	
	IGB	LMS
Grave II	reste constant	diminue fortement
Grave III	reste constant	augmente légèrement
Limon	augmente fortement	augmente fortement

Tableau 5.3 Essai de gonflement: variation du gonflement par rapport à une teneur en eau initiale croissante.

5.2.2 Analyse des lentilles de glace

L'analyse des lentilles de glace (endroit, épaisseur, nombre) permet d'expliquer en partie le comportement différent des six séries examinées:

Grave II - Procédure IGB
Comme la teneur en eau initiale est faible, la conductibilité thermique est élevée; l'application immédiate de la température négative détermine donc une propagation très rapide du front de gel.
On n'observe qu'une lentille de glace de 2 à 3 mm d'épaisseur dont la base se trouve à une hauteur de 44 mm (moyenne de 18 éprouvettes), soit à environ 30 mm au-dessus du niveau de l'eau.

Grave II - Procédure LMS
Par rapport à la procédure IGB, la vitesse de propagation du front de gel est plus faible. On observe la lentille de glace principale à une hauteur de 42 mm. Son épaisseur est de 1 à 3 mm. En outre quelques éprouvettes montrent une deuxième lentille dont l'épaisseur est très fine. Cette première lentille se trouve à une hauteur d'environ 70 mm soit à l'interface entre la deuxième et la troisième couche de compactage.

Grave II - Comparaison des deux procédures
Une inhomogénéité dans l'éprouvette, apparaissant surtout si $w_i < w_{opt}$, peut favoriser la formation d'une lentille de glace. Le gonflement au gel des éprouvettes compactées sur la branche sèche peut ainsi dépasser celui des éprouvettes compactées sur la branche humide. C'est ce qu'on observe en exécutant la procédure LMS. Par contre, en exécutant la procédure IGB, le gonflement ne dépend pas de w_i. Cela vient du fait que la vitesse de propagation du front de gel est trop grande: même si l'éprouvette possède des inhomogénéités, aucune lentille de glace ne peut se former. Sur les éprouvettes compactées sur la branche humide, qui sont assez homogènes, on observe le même gonflement pour les deux procédures.

Grave III - Procédure IGB
Par rapport à la Grave II, la vitesse de propagation du front de gel n'est que peu réduite. On observe, comme dans la Grave II, une seule lentille de glace d'une épaisseur de 2 à 3 mm. Sa base se trouve à 45 mm.

Grave III - Procédure LMS
On observe toujours deux lentilles de glace: la lentille qui se forme en dernier (épaisseur 2 à 3 mm, base à 43 mm de hauteur) et la lentille supérieure (épaisseur < 1 mm, base à 73 mm). La lentille supérieure se développe sur un interface entre deux couches de compactage.

Grave III - Comparaison des deux procédures
La procédure IGB donne, pour les trois séries d'essais, le plus petit gonflement. Apparemment, la vitesse de propagation du front de gel dépasse toujours v_{crit} et aucune lentille de glace ne peut se développer. La procédure LMS induit une vitesse de propagation du front de gel plus faible et une légère inhomogé-

néité suffit à initialiser la formation d'une lentille de glace.
Les gonflements mesurés avec la procédure IGB ne dépendent pas de la teneur en eau initiale car aucune lentille de glace ne peut se former pendant que le front de gel pénètre. Ceux mesurés avec la procédure LMS sont un peu plus importants et croissent légèrement avec la teneur en eau initiale.

Limon - Procédure IGB
La teneur en eau élevée de ce sol type réduit fortement la vitesse de propagation du front de gel.
On observe le plus souvent deux lentilles de glace:
- La série des six éprouvettes compactée sur la branche sèche a une lentille de glace finale (qui se forme en dernier) d'une épaisseur de 2 à 5 mm et dont la base se trouve à 40 mm de hauteur. Deux des éprouvettes ont une deuxième lentille de glace, fine, à une profondeur de 53 mm.
- La série compactée à l'optimum montre toujours au moins deux lentilles de glace. La lentille finale est soit propre (glace pure, épaisseur 5 à 6 mm), soit sale (glace mélangée à des grains, épaisseur 10 à 14 mm); sa base se trouve à une hauteur de 38 mm. La lentille supérieure, dont l'épaisseur ne dépasse pas 1 mm, se trouve à une profondeur de 55 mm.
- La série compactée sur la branche humide montre également au moins deux lentilles de glace. La lentille finale est généralement sale - avec parfois les trois derniers millimètres propres - et a une épaisseur de 9 à 26 mm; sa base se trouve à une hauteur d'environ 37 mm. La lentille supérieure a une épaisseur de 1 mm et se trouve à une profondeur de 50 mm.

Limon - Procédure LMS
Cette procédure conduit à la plus lente pénétration du front de gel. On observe une à plusieurs lentilles de glace:
- La série des six éprouvettes compactée sur la branche sèche a toujours une lentille de glace finale d'une épaisseur de 1 à 2 mm, dont la base se trouve à 41 mm; trois de ses éprouvettes montrent des autres lentilles à différents niveaux.
- La série compactée à l'optimum a une lentille de glace finale (épaisseur 2 à 3 mm, base à 41 mm) et une série de lentilles très minces à une profondeur d'environ 40 mm.
- La série compactée sur la branche humide a une lentille de glace finale propre (épaisseur de 3 à 4 mm) ou sale (épaisseur de 6 à 9 mm), avec une base à 35 mm de hauteur et, quatre à huit lentilles dont l'épaisseur varie entre 0.5 à 1 mm.

La lentille supérieure se trouve généralement à une profondeur de 40 mm.

Limon - Comparaison des deux procédures
La Procédure LMS donne généralement le plus grand gonflement. Les séries avec $w_i = w_{opt}$ ne sont pas à comparer sans autre, car leurs teneurs en eau initiales ne sont pas identiques. Sur les éprouvettes des séries avec $w_i \geq w_{opt}$ on observe au-dessus de la lentille de glace finale - formée souvent de plusieurs lentilles - une zone avec plusieurs lentilles; avec la procédure IGB on n'observe qu'une seule lentille.
La zone de l'éprouvette où la vitesse de propagation du front de gel est inférieure à v_{crit} est importante pour les deux procédures, ce qui permet le développement de plusieurs lentilles de glace. En augmentant la teneur en eau initiale le gonflement s'accroît.

5.2.3 Gonflement en fonction du temps

Les figures 5.5 à 5.7 montrent, pour les trois sols types, le gonflement en fonction du temps. Chaque courbe représente une série de six éprouvettes examinées en même temps. La déformation initiale correspond au gonflement qui se produit au cours de l'imbibition.
Le gonflement dû au gel commence dès les premières heures. Au début, la vitesse de gonflement est élevée (propagation rapide du front de gel, provoquant le changement de phase de l'eau interstitielle) puis elle diminue. Après 3 jours les éprouvettes continuent cependant à gonfler.
Les courbes montrent plusieurs irrégularités dues aux variations de la température de l'eau et l'abaissement discontinu de la température de l'air (Procédure LMS). Les essais exécutés avec les modes opératoires actuels ne permettent donc pas de déterminer une vitesse de gonflement caractéristique.
La figure 5.8 est une synthèse des trois figures précédentes; elle ne représente que les séries compactées à l'optimum Proctor. Il faut noter que les deux séries du Limon sont compactées à des teneurs en eau légèrement différentes (voir Fig. 5.4).
D'une façon générale, les gonflements ne diffèrent pas beaucoup entre les deux procédures.
En comparant les trois sols types, on voit que le gonflement du Limon dépasse largement celui des graviers alors que la différence entre la Grave II et la Grave III est faible.

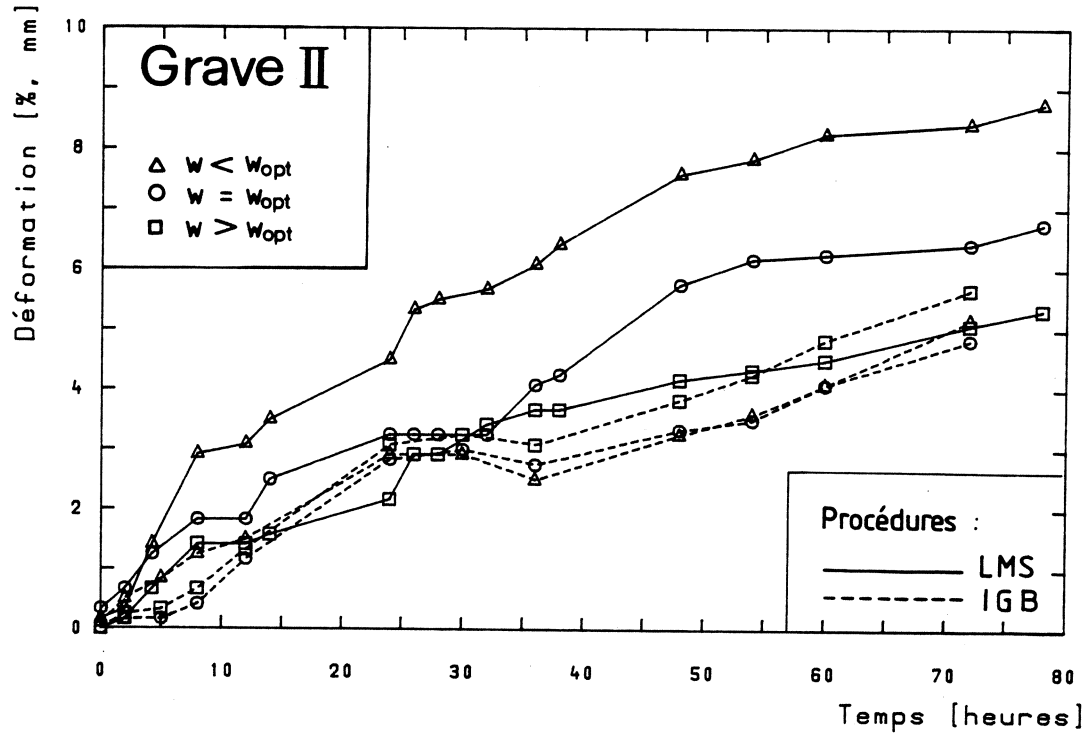

Fig. 5.5 Grave II : Gonflement en fonction du temps

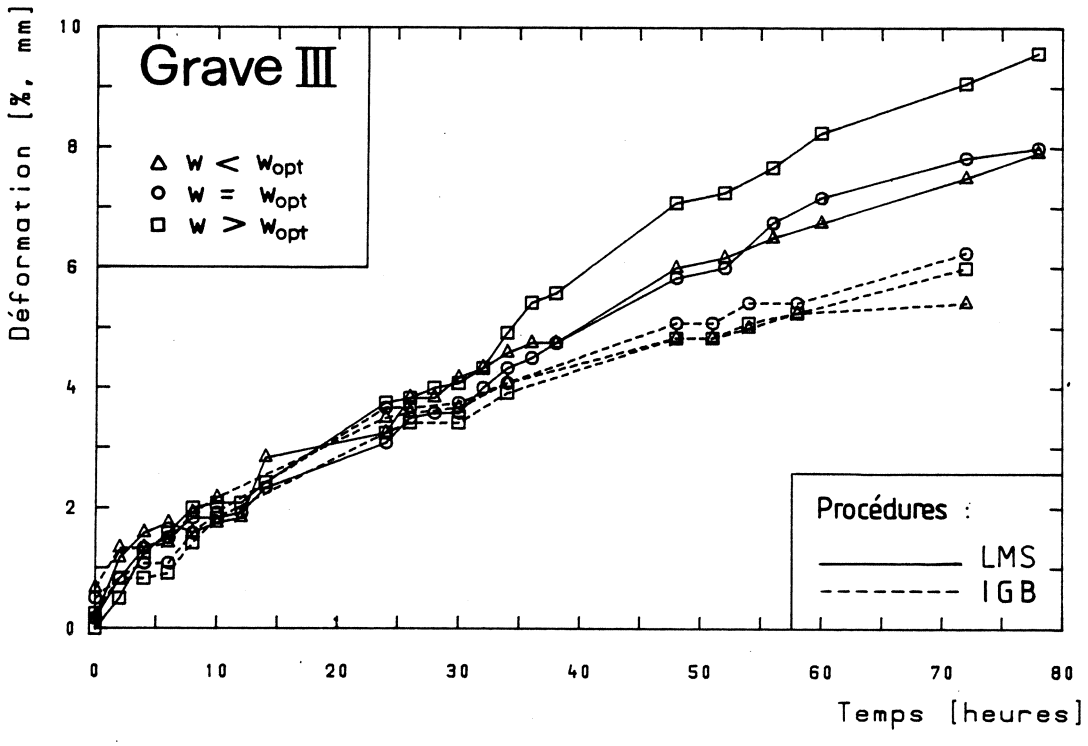

Fig. 5.6 Grave III : Gonflement en fonction du temps

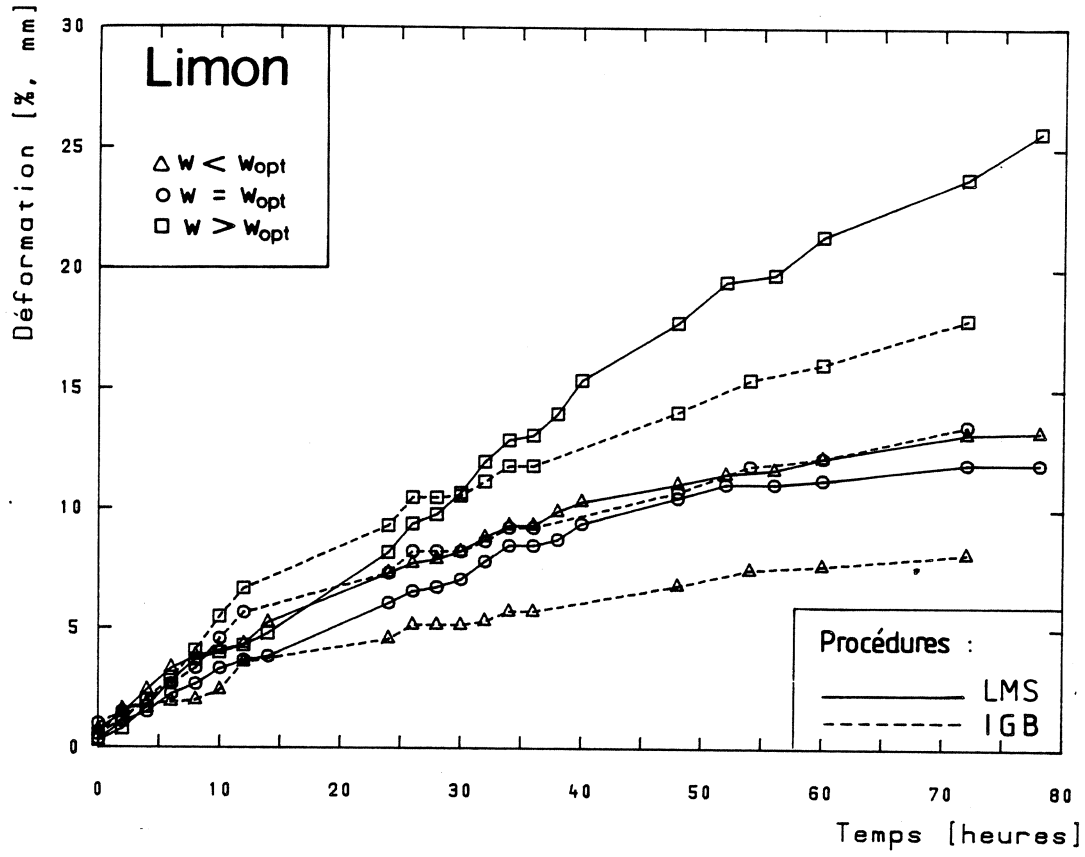

Fig. 5.7 Limon : Gonflement en fonction du temps

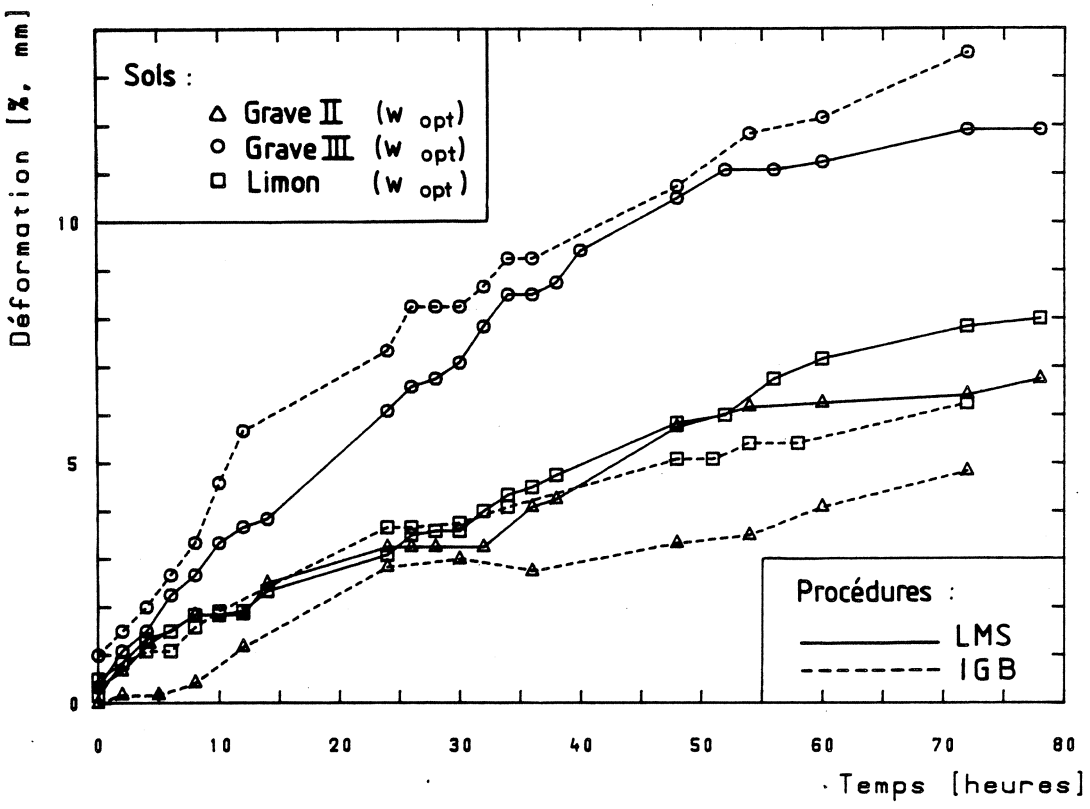

Fig. 5.8 Gonflement en fonction du temps pour les trois sols

5.3 CRITIQUE

5.3.1 Procédures

Rappelons tout d'abord que le gonflement ne suffit pas à déterminer la sensibilité au gel d'un sol. L'ameublement irréversible d'un sol soumis à des cycles de gel-dégel, soit sa diminution de portance, ne peut pas être en effet estimé à partir du seul essai de gonflement au gel.

Saturation

Les deux procédures diffèrent: La procédure IGB prévoit une période de saturation (stabilisation du volume), tandis que la procédure LMS se contente d'une période d'accommodation. Pour les éprouvettes compactées sur la branche sèche, le degré de saturation peut influencer significativement le gonflement au gel. En compactant les éprouvettes sur la branche humide (proche de l'optimum) on peut renoncer à la période de saturation.

Gel

Les deux procédures diffèrent totalement.
La **procédure IGB** est un essai en régime permanent: Le front de gel est maintenu au même niveau en imposant des températures constantes sur les faces inférieures et supérieures de l'éprouvette. Dans les Graves, il ne se forme qu'une seule lentille de glace. La vitesse de gonflement maximale est observée lorsque le régime permanent est atteint.
Pendant la première moitié de l'essai, la **procédure LMS** tend à simuler un régime transitoire par abaissement progressif de la température de l'air (5°C toutes les douze heures). Il est probable qu'à chaque palier d'abaissement de la température de l'air, la vitesse de propagation du front de gel dépasse la vitesse critique. Malgré le fait que la température de l'air soit abaissée progressivement, seul le Limon forme des séries de lentilles de glace; la Grave III ne forme elle que deux lentilles. Pendant la deuxième moitié de l'essai le régime est permanent comme dans la procédure IGB.
Une procédure qui s'arrête lorsque la vitesse du front de gel s'annule devrait mieux déterminer la sensibilité au gel du sol testé.

5.3.2 Appareillage

L'appareillage actuel présente les deux inconvénients majeurs suivants:
- le diamètre du moule est trop petit,
- le gradient de la température est trop élevé.

Dimensions du moule

Le diamètre du moule devrait permettre de tester des sols grossiers sans procédure de préparation modifiant le comportement au gel des échantillons. L'élimination des grains les plus grands peut être nécessaire, mais ne devrait pas modifier les caractéristiques de l'échantillon.
Relativement à sa largeur, la hauteur du moule doit rester limitée pour éviter des frottements excessifs entre ses parois et l'éprouvette.
L'utilisation d'un moule CBR serait plus favorable.

Gradient de température

A la fin de l'essai, selon procédure LMS, il y a une différence de 25°C entre le sommet et le pied de l'éprouvette; avec la procédure IGB elle est de 21°C. Il en résulte un gradient thermique d'environ $2°C \cdot cm^{-1}$, soit un gradient quelque dix fois supérieur à celui rencontré en nature. Le gradient thermique induit le flux de chaleur et agit sur le flux d'eau. Il détermine largement la vitesse de gonflement.
Il est donc souhaitable d'imposer un gradient thermique un peu plus réaliste et de régler d'une manière précise la température aux deux extrémités de l'éprouvette.

6 NOUVEL ESSAI (CBR3 ET GONFLEMENT)

6.1. CAHIER DES CHARGES

L'essai de détermination de la sensibilité au gel qui pourrait être normalisé en Suisse doit être un essai pouvant être utilisé aussi bien pour les matériaux de l'infrastructure stabilisés ou non que pour les matériaux gélifs de la superstructure, soit essentiellement les graves II stabilisées au ciment ou non.
Sa procédure doit être aussi simple que possible et son appareillage le moins coûteux possible de façon à ce qu'il puisse être acquis par plusieurs laboratoires. Cet essai doit cependant produire des résultats comparables et donc avoir un mode opératoire précis et restrictif.
L'appareillage sera le même pour l'essai de gonflement et l'essai CBR3 et ces deux essais devraient pouvoir être exécutés en même temps.
Les principales conditions auxquelles devra répondre ce nouvel essai et son dispositif, conditions qui peuvent être contradictoires, sont les suivantes:

a) Essai indépendant des conditions thermiques et hydrauliques auxquelles sera soumis le matériau dans la nature.
b) Cellule d'assez grandes dimensions pour pouvoir contenir des sols grossiers. Les dimensions du moule CBR satisfont à cette condition.
c) Dispositif d'essai compact en système ouvert, autonome, ne nécessitant pas une grande chambre frigorifique par trop coûteuse et encombrante.
d) Dispositif garantissant des conditions thermiques et mécaniques identiques d'un essai à l'autre.
e) Dispositif d'essai pas trop coûteux pour qu'il puisse être acquis par plusieurs laboratoires voire même être utilisé dans des laboratoires de chantier.
f) Vitesse de propagation du front de gel et allure des isothermes parfaitement déterminées; isothermes les plus horizontales possible.
g) Enregistrement automatique mais simple (mécanique) du gonflement en fonction du temps, de façon à réduire le temps consacré à l'essai par le personnel de laboratoire.
h) Essai de relativement courte durée (max. 5 jours ?).
i) Cellule pouvant subir un compactage AASHO-standard.

k) Dispositif et procédure se rapprochant d'un essai éprouvé possédant un critère de gélivité associé; ceci pour pouvoir utiliser rapidement les résultats de cet essai sans devoir procéder à de longues séries de tests systématiques et comparatifs.

6.2 APPAREILLAGE

6.2.1. Description de l'appareillage (Fig.6.1)

L'échantillon est compacté dans un **moule** dont les dimensions correspondent au moule CBR à une petite différence près. Cette différence provient de sa conicité qui sert à réduire le frottement pendant le gonflement. Les dimensions exacts de l'éprouvette sont:

- Hauteur: 127.0 mm
- Diamètre inférieur: 152.1 mm
- Diamètre supérieur: 156.2 mm
- Volume: 2.370 l

Afin d'éliminer le pont thermique constitué par un moule métallique, le moule est construit en résine époxy ayant une grande résistance mécanique. Le moule est équipé, pour nos essais, de cinq thermistances (AD 592) sertis dans des capsules en cuivre; ces thermistances ne sont nécessaires qu'à la mise au point du nouveau dispositif d'essai et seront supprimées dans une éventuelle exécution standard. L'**embase** du moule, construit en PVC, est pourvu de nombreux trous qui garantissent la circulation de l'eau vers l'éprouvette. Elle est séparé de l'éprouvette par un papier filtre. Le moule est entouré d'un isolant thermique d'une épaisseur de 45 mm. Il s'agit d'Alveolit (mousse en polyéthylène) dont la conductibilité thermique et le pouvoir d'absorption d'eau sont faibles et la résistance mécanique assez élevée.
Le moule est placé dans l'**enceinte** construite en PVC. Cette enceinte a deux fonctions. Elle sert de réservoir à l'eau baignant le pied de l'éprouvette (30 mm environ au-dessus de la face inférieure de l'éprouvette) et de chambre climatisée à 4°C environ par un circuit d'eau. L'isolation thermique de l'enceinte, en polystyrène extrudé dur, a une épaisseur de 20 mm.

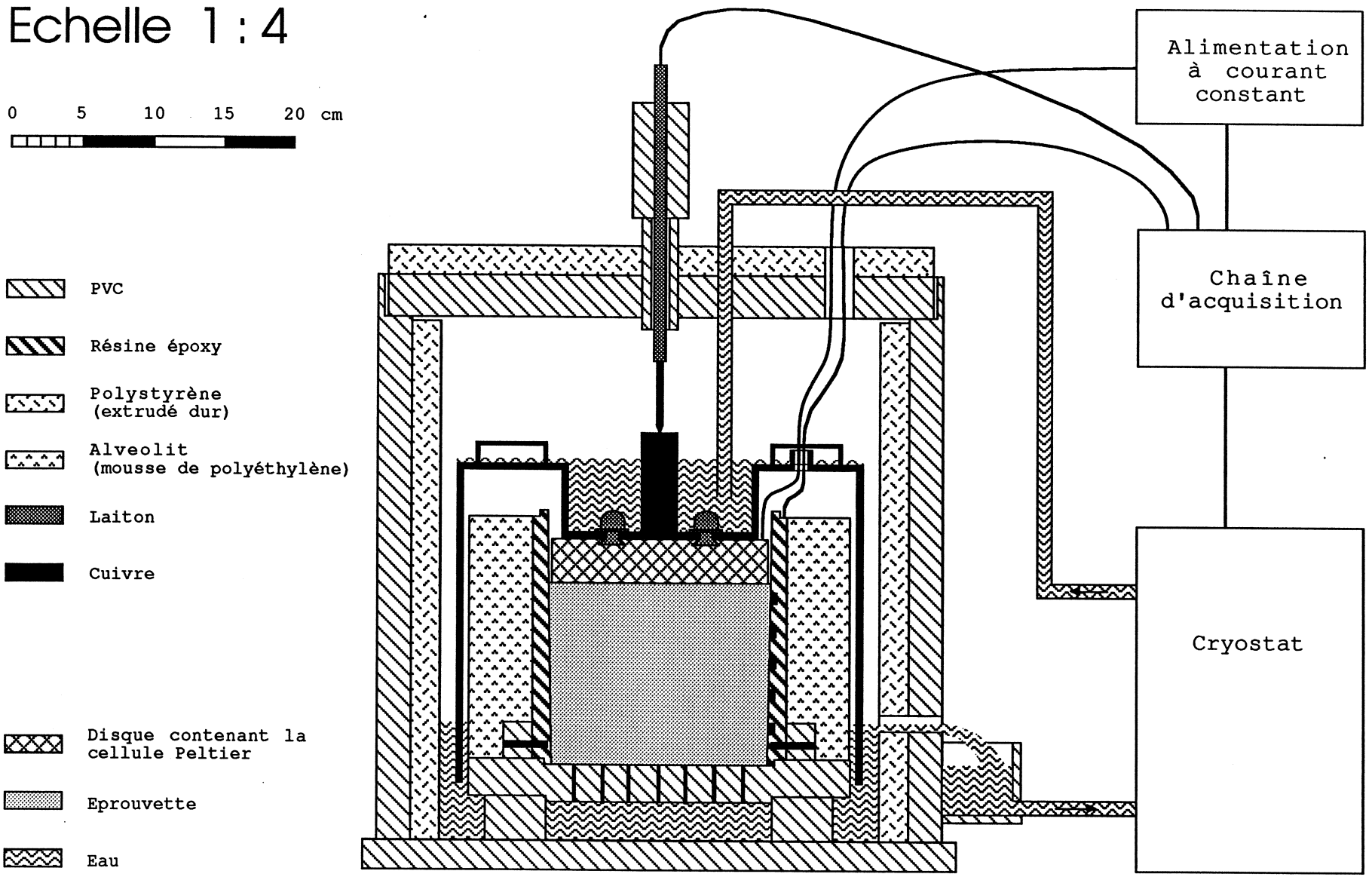

Fig. 6.1 Nouveau dispositif d'essai

Un disque contenant une cellule Peltier surmonte l'éprouvette. Il est vissé contre le **cylindre de cuivre** qui forme un petit réservoir au-dessus du disque et dont les parois plongent dans l'eau au pied de l'éprouvette. Le réservoir alimenté par l'eau thermostatisée à 4.0°C sert à maintenir la température constante sur le côté chaud de la cellule Peltier (voir § 6.2.2). En outre le cylindre de cuivre, refroidi à 4°C, entoure toute l'éprouvette et la sépare de l'eau.
Deux types du **disque** contenant la **cellule Peltier** ont été développés. Le prototype I contenait huit cellules "Gambion-801-2001", le prototype II décrit ci-dessous possède une seule cellule "Gambion-801-2000". La mise en place de cette cellule Peltier minuscule est délicate. Le disque et sa fixation contre le cylindre de cuivre font l'objet de la figure 6.2. La cellule Peltier est serrée entre deux plaques de cuivre, l'une en contact avec l'éprouvette, l'autre vissée au cylindre de cuivre. La plaque supérieure agrandie par un anneau en PVC est vissée soigneusement (Gambion conseille une charge maximale de 15 kg par cellule) contre la plaque inférieure. Afin d'éviter un pont thermique, des vis en Polyamide sont utilisées pour cela. Entre les deux plaques se trouve un isolant thermique (Alveolit) légèrement comprimé. Il doit garantir que tout le flux de chaleur produit par la cellule Peltier ne soit transmis qu'à l'éprouvette. En plus il rend difficile l'accès de l'eau vers la cellule Peltier. La cellule elle-même est rendue étanche au moyen d'Araldit. Une thermistance AD 592 est placée au centre de la plaque inférieure.
Un **capteur inductif** pour mesurer le gonflement de l'éprouvette est fixé au couvercle de l'enceinte. Sa résolution est de 0.01 mm.
Un **cryostat** lié au bain d'eau (Type Haake F3) maintient la température du circuit d'eau à 4°C. Une pompe d'un débit d'environ 10 $l \cdot min^{-1}$ alimente le petit réservoir formé par le cylindre en cuivre.
Une **alimentation** avec affichage digital de l'ampérage impose le courant à la cellule Peltier. La puissance requise est de 5 Watts avec un courant maximal de 3 Ampères.
Une **chaîne d'acquisition** (HP 3497A et Perex Perifile 8051) est utilisée pour enregistrer la température du circuit d'eau, les températures mesurées avec les six thermistances, le gonflement et la tension entre les deux bornes de la cellule Peltier.

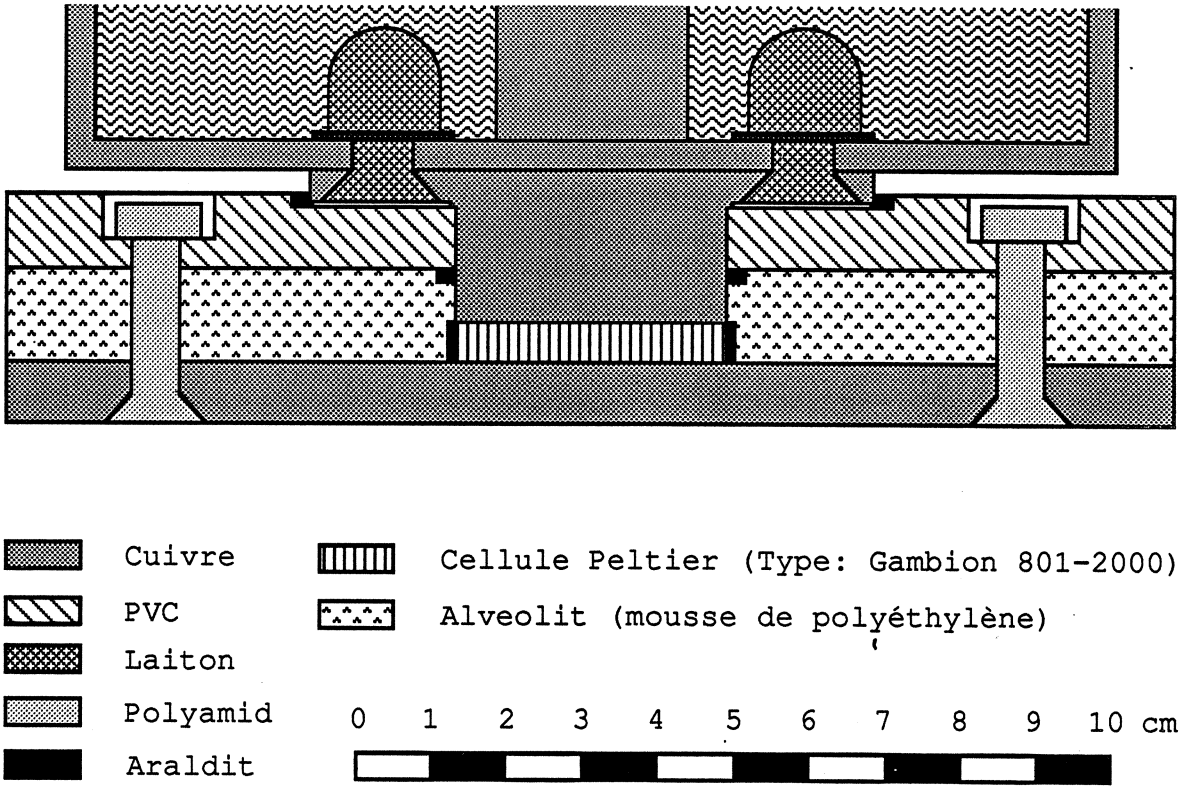

Fig. 6.2 Disque contenant la cellule Peltier vissé contre le cylindre en cuivre

6.2.2 Principe de la cellule Peltier

Une cellule Peltier utilise l'effet thermoélectrique qui est une transformation réversible de l'énergie électrique en énergie thermique. Sur la figure 6.3 elle est employée comme thermopompe. Elle fournit de l'énergie-chaleur à une source chaude consommant une énergie électrique. Autrement dit et comme illustré, en imposant à la cellule un courant électrique, un flux de chaleur se produit de l'éprouvette vers l'eau thermostatisée à 4°C.
Une cellule Peltier est constituée d'une juxtaposition d'éléments semi-conducteurs thermoélectriques, sertis dans de la matière plastique ou céramique.

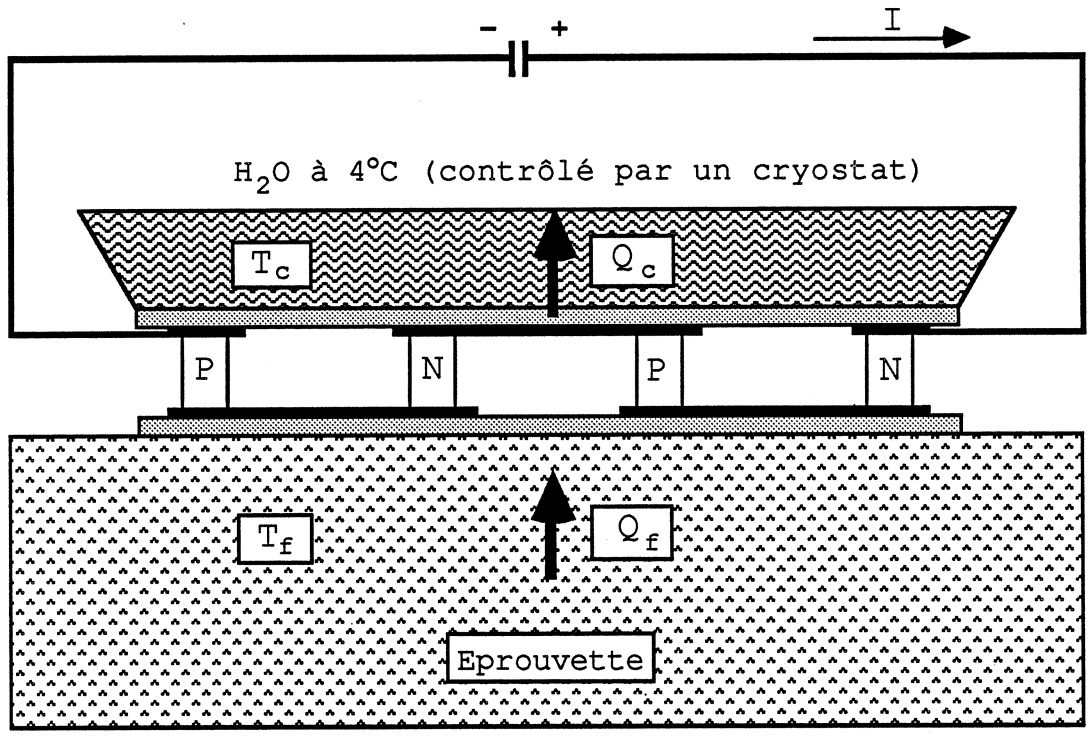

Fig. 6.3 Principe de la cellule Peltier

Les éléments semi-conducteurs (P, N) sont liés par des petites plaquettes de cuivre. Les caractéristiques d'une cellule Peltier sont son coefficient de Seebeck, sa résistance électrique et sa conductance, tous dépendants de la température. La cellule Peltier utilisée a comme dimensions: 40·40·5 mm.
Le flux de chaleur brut, Q_f [Watt], traversant la surface de l'éprouvette peut être déterminé par l'équation 6.1:

$$Q_f = a \cdot T_f \cdot I - 0.5 \cdot I^2 \cdot R - K \cdot \Delta T \qquad (6.1)$$

avec :

T_f [°K]: température au côté froid de la cellule
ΔT [°K]: différence de température entre les deux côtés de la cellule
I [A]: courant passant dans la cellule
a [V/°K]: coefficient de Seebeck de la cellule
R [Ω]: résistance électrique de la cellule
K [W/°K]: conductance thermique de la cellule

Le flux de chaleur brut est composé du flux net (l'énergie extraite de l'éprouvette) et du flux passant au travers de l'éprouvette.
L'utilisation d'une cellule Peltier permet théoriquement d'imposer un flux de chaleur net constant. On détermine le flux de chaleur au pied de l'éprouvette (flux passant au travers de l'éprouvette) et on adapte, manuellement ou automatiquement, soit l'intensité du courant, soit la température de l'eau baignant le côté chaud de la cellule Peltier. Une autre possibilité est d'imposer un flux de chaleur brut constant au cours de l'essai par réglage du courant. L'équation 6.1 montre qu'en travaillant avec un ampérage constant, Q_f diminue lorsque ΔT augmente.

6.3 MODE OPERATOIRE

L'essai exécuté avec le nouvel appareillage comprend le gel, le dégel et le poinçonnement à la presse CBR. En ce qui concerne la préparation de l'éprouvette, le mode opératoire suit celui de l'essai CBR_3 jusqu'à y compris l'imbibition de quatre jours (voir chapitre 4.1).

Mise en place de l'éprouvette

On recouvre la surface de l'éprouvette d'une feuille d'aluminium afin de la protéger de sa destruction lors du retrait de la cellule Peltier; puis on place l'éprouvette entourée de son isolant thermique dans l'enceinte. Ensuite on y place le cylindre de cuivre avec le disque contenant la cellule Peltier. Ainsi on applique une surcharge de 13.3 kg soit une contrainte de 7 kPa.
Une fois tous les câbles connectés, on enclenche le cryostat qui abaisse puis maintient la température du circuit d'eau à 4°C. L'éprouvette est refroidie à cette température par sa face supérieure et sa face inférieure. L'eau baigne sa base sur 30 mm de hauteur. Après 24 heures on mesure une température uniforme d'environ 4°C sur toute la hauteur de l'éprouvette. Le gel peut alors commencer.

Gel

La cellule Peltier est alimentée par un courant constant qui détermine un flux de chaleur légèrement variable dépendant de la température sur son côté froid. Cette température est celle de la surface de l'éprouvette qui elle-même dépend des caractéristiques thermiques du sol. Le flux de chaleur brut diminue ainsi durant l'essai. Quant au flux de chaleur net, correspondant à l'énergie extraite de l'éprouvette, il diminue aussi au cours de l'essai et d'une manière plus forte.
Le courant imposé à la cellule Peltier a été déterminé d'après le critère suivant: Dans le Limon, le front de gel doit atteindre le milieu de l'éprouvette après 24 heures. Le prototype I, utilisant huit cellules Peltier, a été alimenté avec un courant constant de 0.81 ampères, le prototype II, avec sa seule cellule, a été alimenté sous 1.65 ampères. La période du gel dure 24 heures.

Dégel

Après les 24 heures de gel, le circuit d'eau à 4°C et l'alimentation électrique de la cellule Peltier sont arrêtés. L'eau dans les réservoirs des faces supérieures et inférieures de l'éprouvette se réchauffe lentement par conduction au travers de l'enceinte qui reste fermée. L'éprouvette, entourée latéralement d'un bon isolant thermique, se réchauffe en même temps simultanément par le haut et par le bas. Après environ huit heures, l'éprouvette est complètement dégelée. Elle est cependant maintenue dans l'enceinte durant une période de 24 heures au total, pendant laquelle l'échange de l'eau par la base est possible.

Pour la suite le mode opératoire suit à nouveau celui de l'essai CBR_3, décrit au § 4.1.

6.4 RESULTATS: COMPARAISON AVEC LES ESSAIS ACTUELS

Le nouvel essai au gel peut être divisé en trois parties: la préparation qui est identique à celle de l'essai CBR3 actuel, la période du gel-dégel pendant laquelle l'éprouvette se trouve dans l'enceinte du nouveau dispositif d'essai et le poinçonnement CBR exécuté selon la procédure actuelle. Les résultats des essais entrepris sont présentés aux § 6.4.1, 6.4.2 et 6.4.3 pour chacune de ces parties et sont comparés avec les procédures lente et rapide de l'essai CBR3 actuel.

6.4.1 Saturation

Les figures 6.4 à 6.6 montrent la relation entre la teneur en eau initiale et la masse d'eau absorbée. La teneur en eau initiale a été corrigée comme décrit au § 4.2.1. On constate que, pour une teneur en eau initiale identique, la masse d'eau absorbée est significativement plus élevée dans le nouveau moule époxy que dans le moule en acier (valeurs calculées pour un même volume de 2.292 l, correspondant au moule CBR en acier). Ce phénomène a été observé pour les trois sols types.

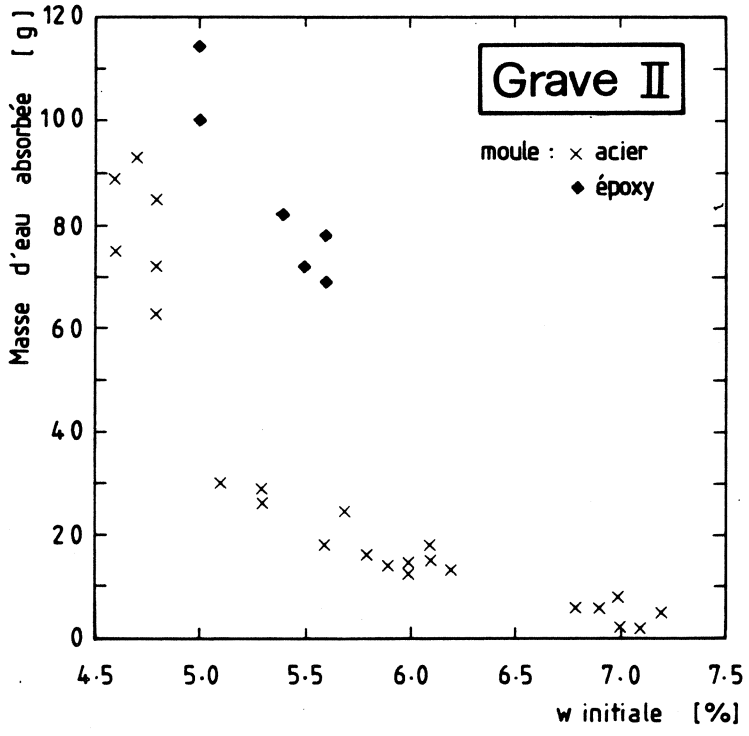

Fig. 6.4 Grave II : masse d'eau absorbée pendant la saturation

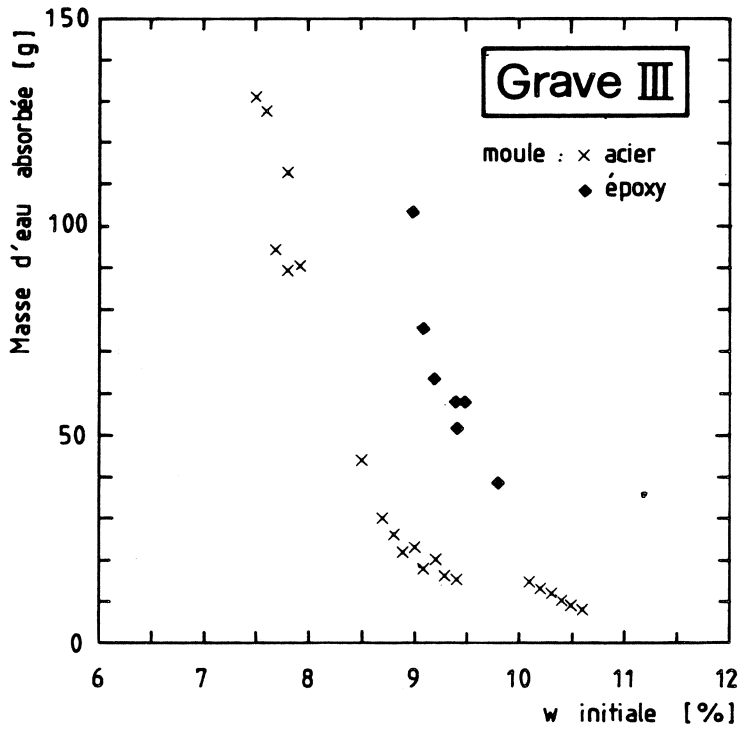

Fig. 6.5 Grave III : masse d'eau absorbée pendant la saturation

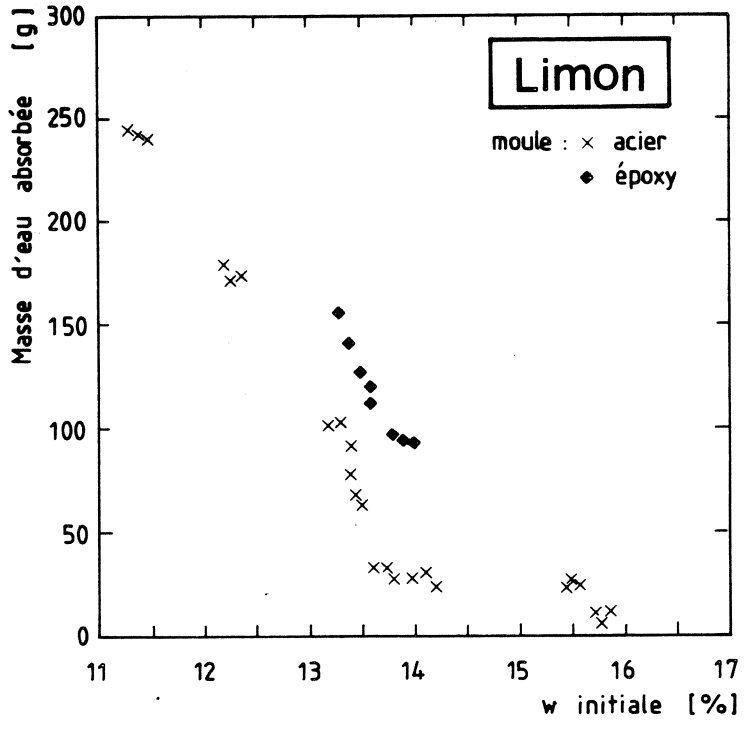

Fig. 6.6 Limon : masse d'eau absorbée pendant la saturation

Cette différence constatée dans la masse d'eau absorbée est due à un moins bon compactage dans le moule époxy. Une partie de l'énergie de compactage se dissipe de par la rigidité plus faible du moule époxy (module de Hooke de l'acier six fois plus élevé), et, éventuellement, de par la conicité du moule (le plus grand diamètre se trouve en bas). Comme l'énergie de compactage active est plus petite, la teneur en eau optimum du matériau compacté dans le nouveau moule époxy est plus élevée que celle obtenue dans un moule en acier.
La comparaison avec les procédures actuelles doit être faite toujours sous cet angle.

6.4.2 Gel-dégel

Les figures 6.7 à 6.9 montrent le gonflement obtenu pendant le gel et le tassement pendant le dégel pour des éprouvettes soumises à différentes procédures. En ce qui concerne les procédures actuelles on ne montre - à l'exception de la Grave II - que les courbes correspondant à un compactage proche de l'optimum Proctor. Les courbes des procédures actuelles donnent la déformation verticale moyenne d'une série de trois éprouvettes. Les courbes du nouvel essai montrent la déformation d'une seule éprouvette testée avec le prototype II.
Il faut noter enfin que les éprouvettes soumises à la nouvelle procédure ont généralement une masse volumique légèrement plus faible que celles soumises à la procédure actuelle.

Grave II
Le gonflement obtenu avec le nouvel appareillage est de quelque 3 mm. Avec la procédure lente actuelle, le gonflement varie fortement en fonction de la teneur en eau initiale. Avec ces deux procédures, le gonflement résiduel après dégel ne dépasse jamais 1 mm, ce qui prouve sa faible gélivité.
La teneur en eau optimum est de 5.3 % en utilisant le moule en acier. Pour le moule en époxy elle est un peu plus élevée. L'éprouvette avec w_i = 5.6 % devrait correspondre approximativement à l'optimum et celle avec w_i = 5.0 % se trouver déjà sur la branche sèche. Avec la nouvelle procédure le comportement des deux éprouvettes (5.0 % et 5.6 %) ne diffère que peu. Par contre, avec la procédure Lente actuelle le comportement des deux éprouvettes (branche sèche à 4.7 % et optimun à 5.2 %) est très différent.
La procédure rapide actuelle produit un gonflement très faible qui ne peut être interprété.

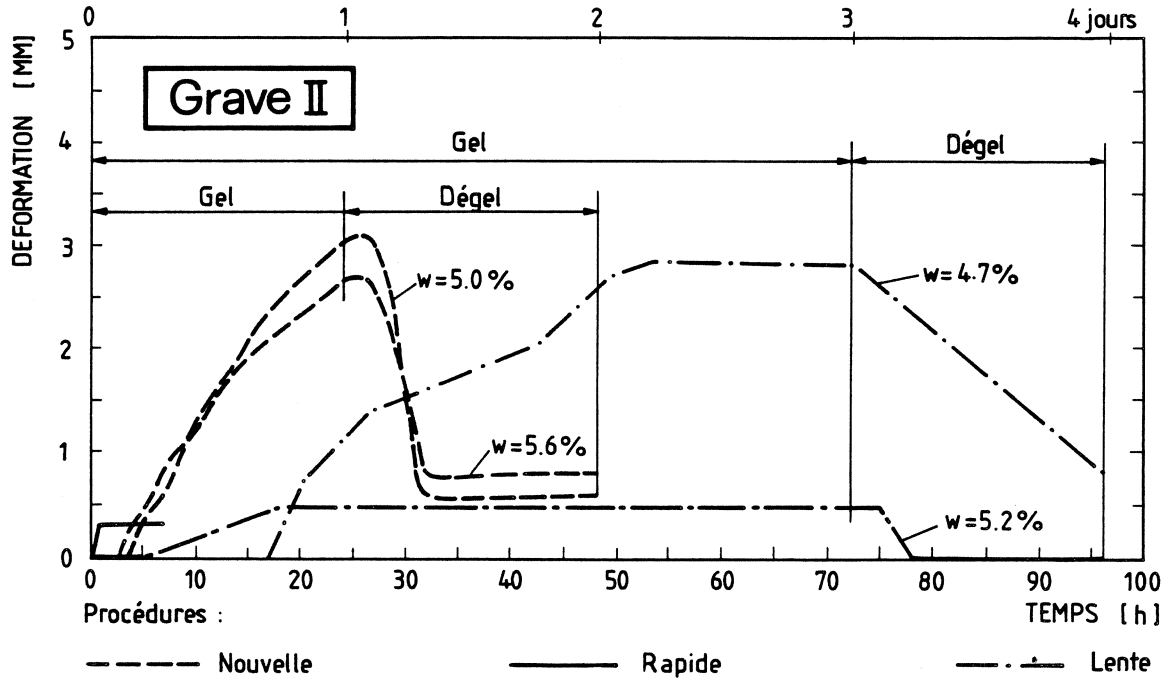

Fig. 6.7 Grave II : déformations verticales de l'éprouvette pendant le gel et le dégel

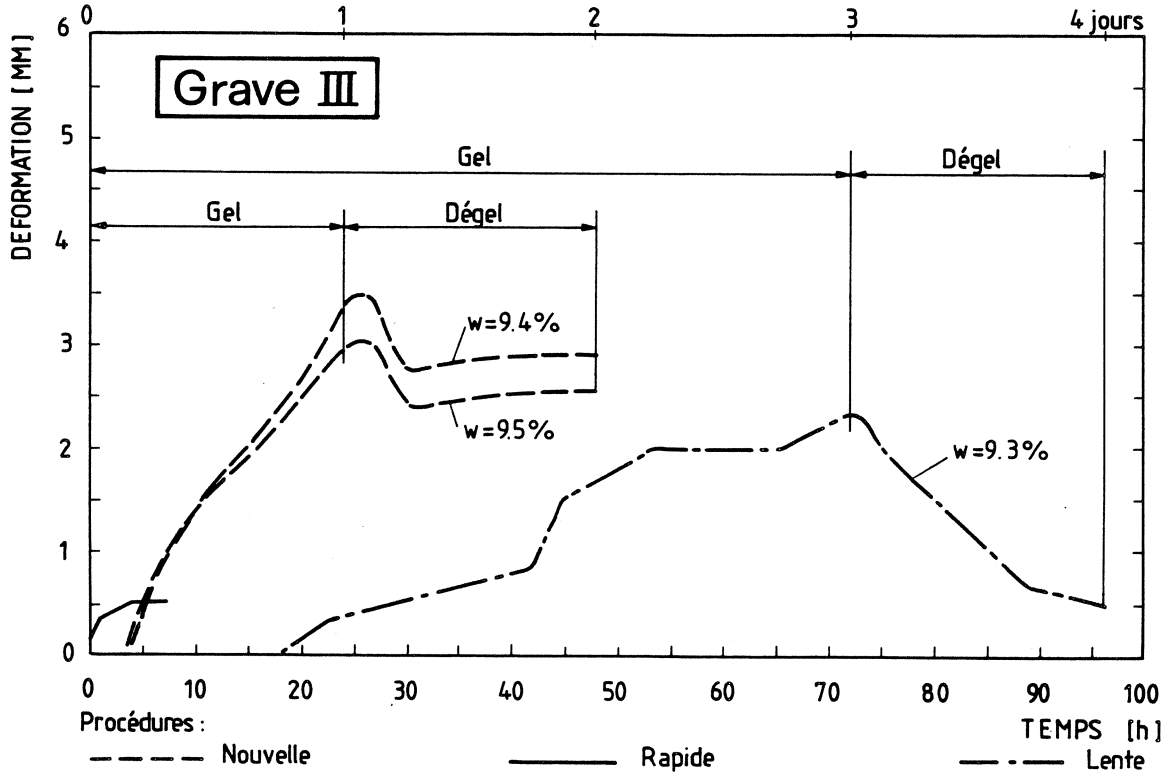

Fig. 6.8 Grave III : déformations verticales de l'éprouvette pendant le gel et le dégel

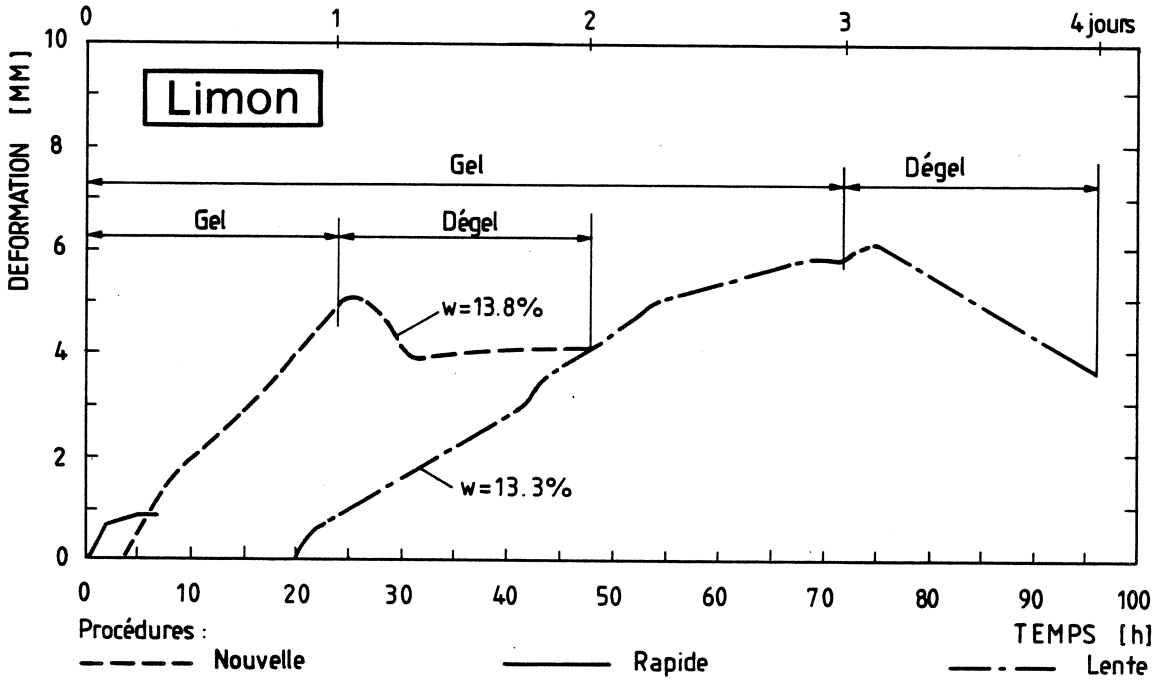

Fig. 6.9 Limon : déformations verticales de l'éprouvette pendant le gel et le dégel

Grave III

Les deux procédures lente et nouvelle produisent des gonflements au gel comparables. Le gonflement résiduel après dégel est par contre très différent. Le nouvel essai produit un gonflement résiduel élevé avec une valeur minimale juste après le dégel suivie d'un léger re-gonflement. Avec la procédure Lente actuelle, le gonflement disparaît presque entièrement au cours du dégel.

La teneur en eau optimum est de 8.7 % dans le moule en acier; l'éprouvette compactée à 9.3 % se trouve donc sur la branche humide. Dans le nouveau moule époxy les éprouvettes (w_i = 9.4 % et 9.5 %) devraient être proches de l'optimum.

Quant à la procédure rapide actuelle elle conduit à des gonflements un peu plus élevés que ceux obtenus sur la Grave II mais toujours trop faibles pour être exploités.

Limon
Les gonflements après gel comme les gonflements résiduels après dégel obtenus avec la nouvelle procédure et la procédure lente actuelle sont comparables.
La teneur en eau optimum est de 13.9 % dans le moule en acier. La teneur en eau initiale des éprouvettes représentées est donc toujours légèrement en-dessous de w_{opt}.

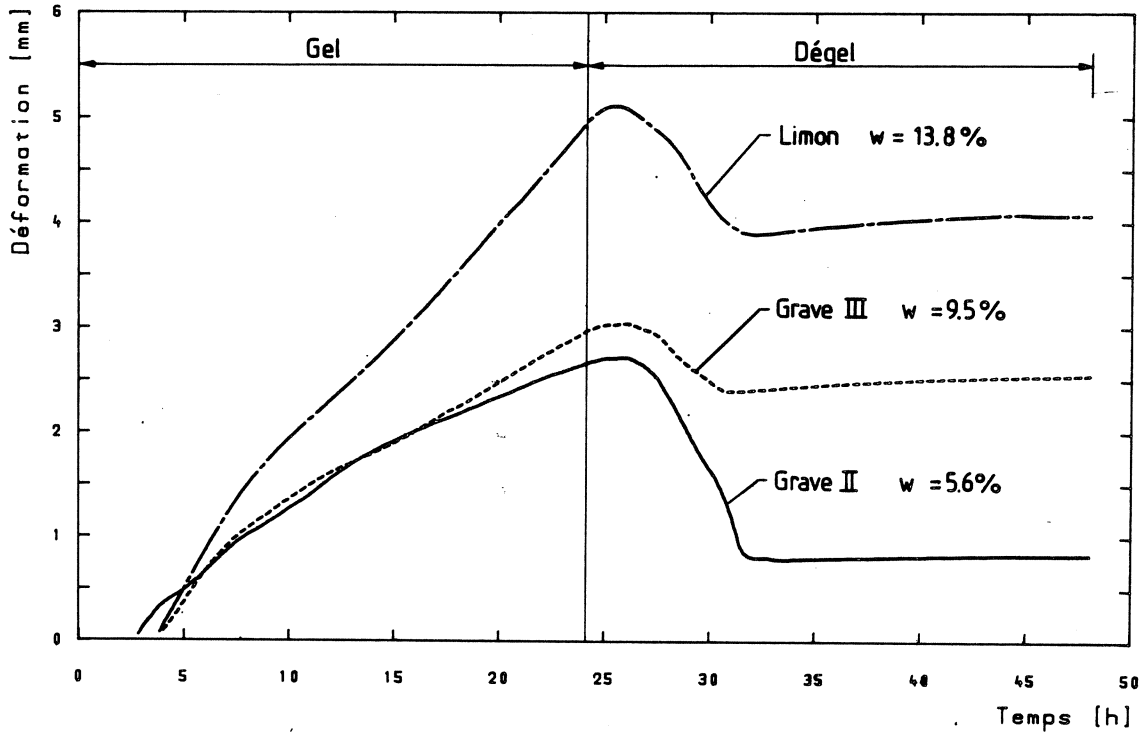

Fig. 6.10 Déformations pendant gel-dégel pour les trois sols types soumis au nouvel essai

Comparaison des trois sols types
La comparaison des trois sols types testés avec le prototype II fait l'objet de la figure 6.10 et permet les constatations suivantes:
Après environ 4 heures de gel les éprouvettes commencent à gonfler. Au début du gel la **vitesse de gonflement** est semblable pour les deux Graves II et III; celle du Limon est environ 50 % plus grande. Pendant le gel la vitesse de gonflement diminue pour les Graves - plus fortement pour la Grave II que pour la

Grave III - tandis qu'elle reste plus ou moins constante pour le Limon.
Après 24 heures, le **gonflement total** des deux Graves atteint environ 60 % de celui du Limon. Quoique la cellule Peltier soit mise hors service après 24 heures les éprouvettes continuent à gonfler pendant environ deux heures. Il est important de noter que le gonflement de la Grave II, peu gélive (degré de gélivité 1 à 2), est approximativement égal à celui de la Grave III gélive (degré de gélivité de 3).
La plus grande partie du **tassement** se produit pendant le premier tiers du dégel; il n'est pas proportionnel au degré de gélivité des sols testés et son interprétation n'est pas évidente. Une fois l'échantillon complètement dégelé, on observe un léger gonflement sur Le Limon et sur la Grave III.
Le **gonflement résiduel** après dégel est un paramètre intéressant car il est une mesure de l'ameublissement du matériau testé. Le Limon qui est le matériau le plus gélif subit le plus grand ameublissement alors que la Grave II qui est le matériau le moins gélif subit elle l'ameublissement le plus faible.
Avec la nouvelle procédure d'essai, le gonflement résiduel est le **seul** paramètre de déformation qui permet de reconnaître les trois sols types.

La comparaison des gonflements obtenus avec le nouvel appareillage avec ceux dérivés de l'essai gonflement au gel selon les procédures actuelles IGB ou LMS est difficile, car l'énergie de compactage n'est pas la même pour les deux essais. Les éprouvettes soumises aux essais CBR_3 selon la procédure actuelle et à la nouvelle procédure sont compactées avec une énergie de 1.15 $MJ \cdot m^{-3}$, alors que celles soumises à l'essai de gonflement au gel selon procédures actuelles sont compactées avec une énergie de 0.76 $MJ \cdot m^{-3}$. Ainsi la masse volumique ρ_{dopt} est de 7 % plus faible pour les éprouvettes de l'essai de gonflement actuel, ce qui conduit à des teneurs en eau optimum plus élevées.
Pour cette raison, on a renoncé à comparer en détail les gonflements des deux essais.
Enfin, l'essai actuel de gonflement au gel comme le nouvel essai montrent que le gonflement total n'est pas un bon critère pour la détermination de la sensibilité au gel, surtout parce que le gonflement total de la Grave II ne diffère que très peu de celui de la Grave III.

6.4.3 Poinçonnement CBR

Les figures 6.11 à 6.13 représentent, en fonction de la teneur en eau initiale w_i, le comportement des trois sols types pendant les différentes périodes des essais exécutés avec la nouvelle procédure et les procédures actuelles. En haut, le degré de compactage est exprimé par la masse volumique apparente sèche (ρ_{di}); le graphique du milieu montre la variation de la teneur en eau au cours de l'essai et celui du bas, la valeur CBR_3. Par rapport aux essais actuels le nouvel essai conduit à une masse volumique des éprouvettes un peu plus faible (entre 2 et 3 %). La teneur en eau finale est, surtout pour les Graves, plus élevée, ce qui devrait être dû au moindre compactage.
En ce qui concerne le poinçonnement CBR, les valeurs obtenues avec la procédure lente actuelle et la nouvelle procédure sont semblables, ceci à l'exception de la Grave II où les valeurs obtenues avec le nouvel appareillage sont plus faibles. C'est probablement la conséquence d'une masse volumique ρ_d plus faible des éprouvettes compactées dans le nouveau moule époxy qui augmente, pour la Grave II, la gélivité du sol testé.

Comme nous l'avons montré au § 4.2, il est avantageux de représenter la valeur CBR_3 dans une échelle logarithmique. On avait trouvé, pour les deux procédures rapide et lente actuelles une relation linéaire entre $\log(CBR_3)$ et log(% grains fins) avec des éprouvettes compactées à l'optimum. Pour le nouvel essai la même relation fait l'objet de la figure 6.14; elle démontre le comportement des dix éprouvettes soumises à la nouvelle procédure. Malgré l'usage de deux prototypes différents, on obtient une assez bonne corrélation.
L'utilisation des résultats d'un seul prototype et la seule prise en compte des éprouvettes compactées à l'optimum améliorerait la corrélation.
La figure 6.15 représente la même relation obtenue par les trois procédures, rapide, lente et nouvelle, pour les seules éprouvettes compactées à l'optimum. La pente de la nouvelle procédure se situe entre celles des procédures actuelles. On constate que la nouvelle procédure conduit,

- pour la Grave II, à une diminution de la capacité portante par rapport aux procédures actuelles,
- pour la Grave III, à des résultats s'approchant de la procédure lente actuelle,
- pour le Limon, au même résultat que la procédure lente actuelle.

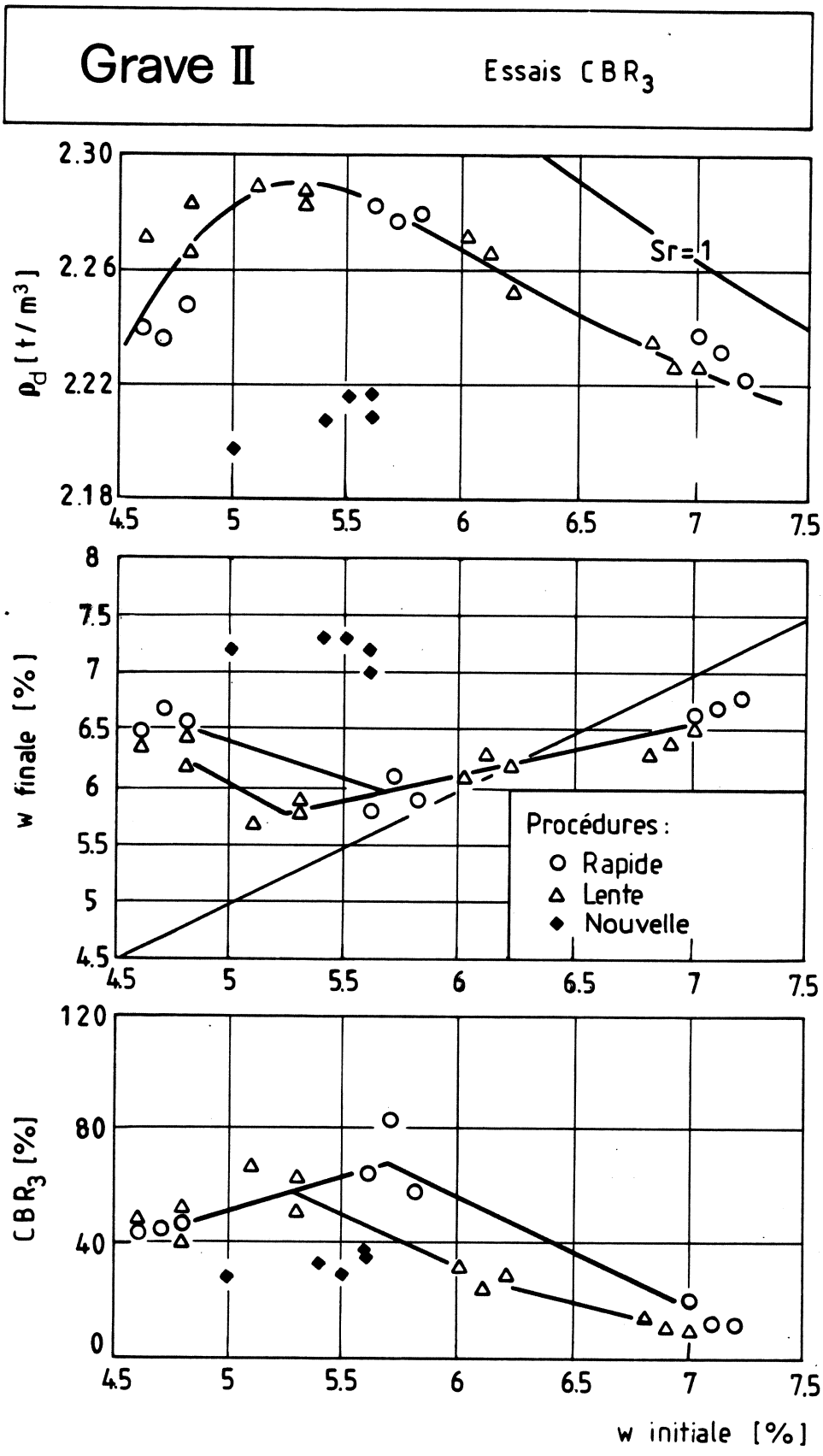

Fig. 6.11 Grave II : ρ_d, w finale et CBR3 en fonction de w_i

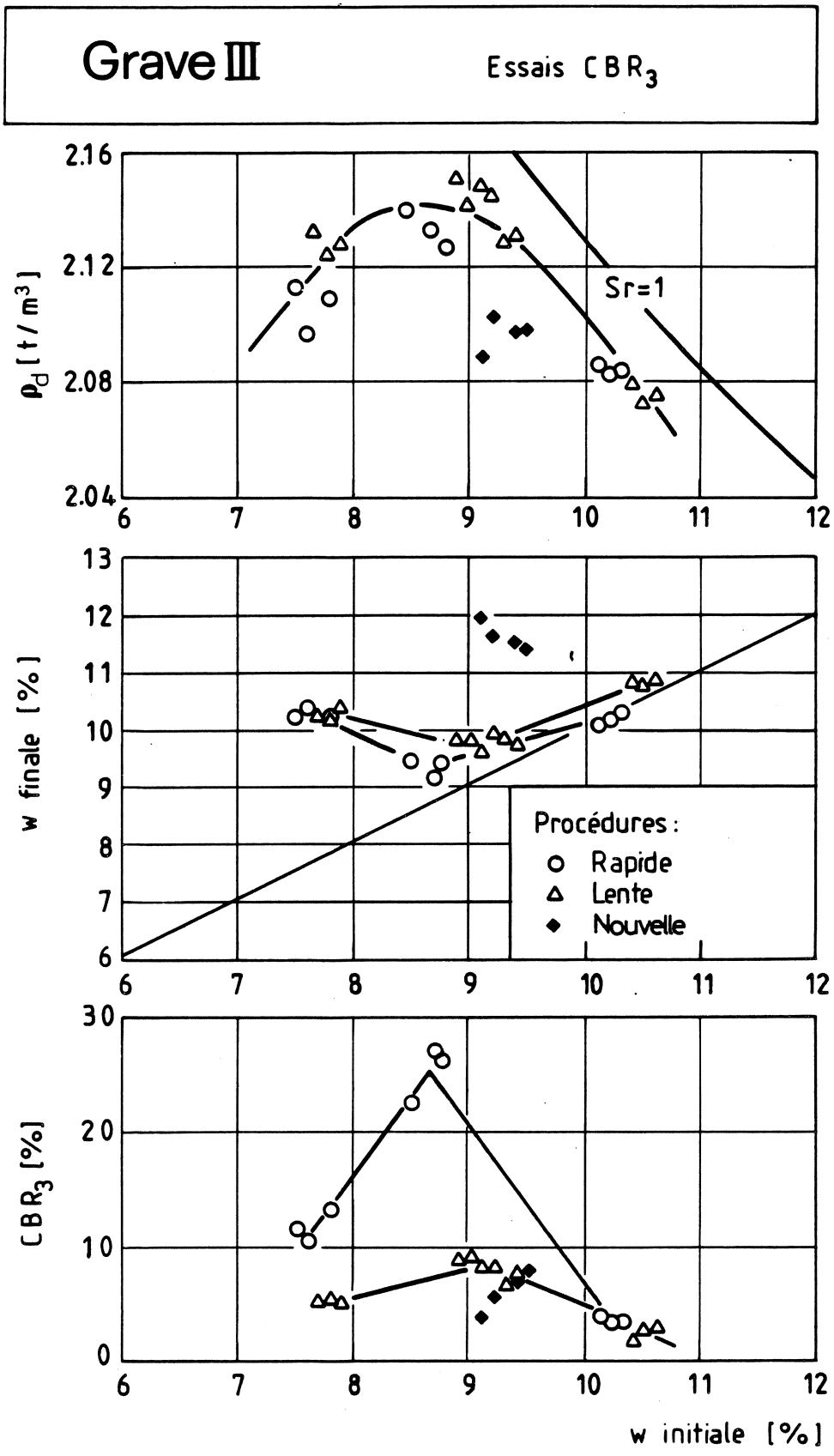

Fig. 6.12 Grave III : ρ_d, w finale et CBR_3 en fonction de w_i

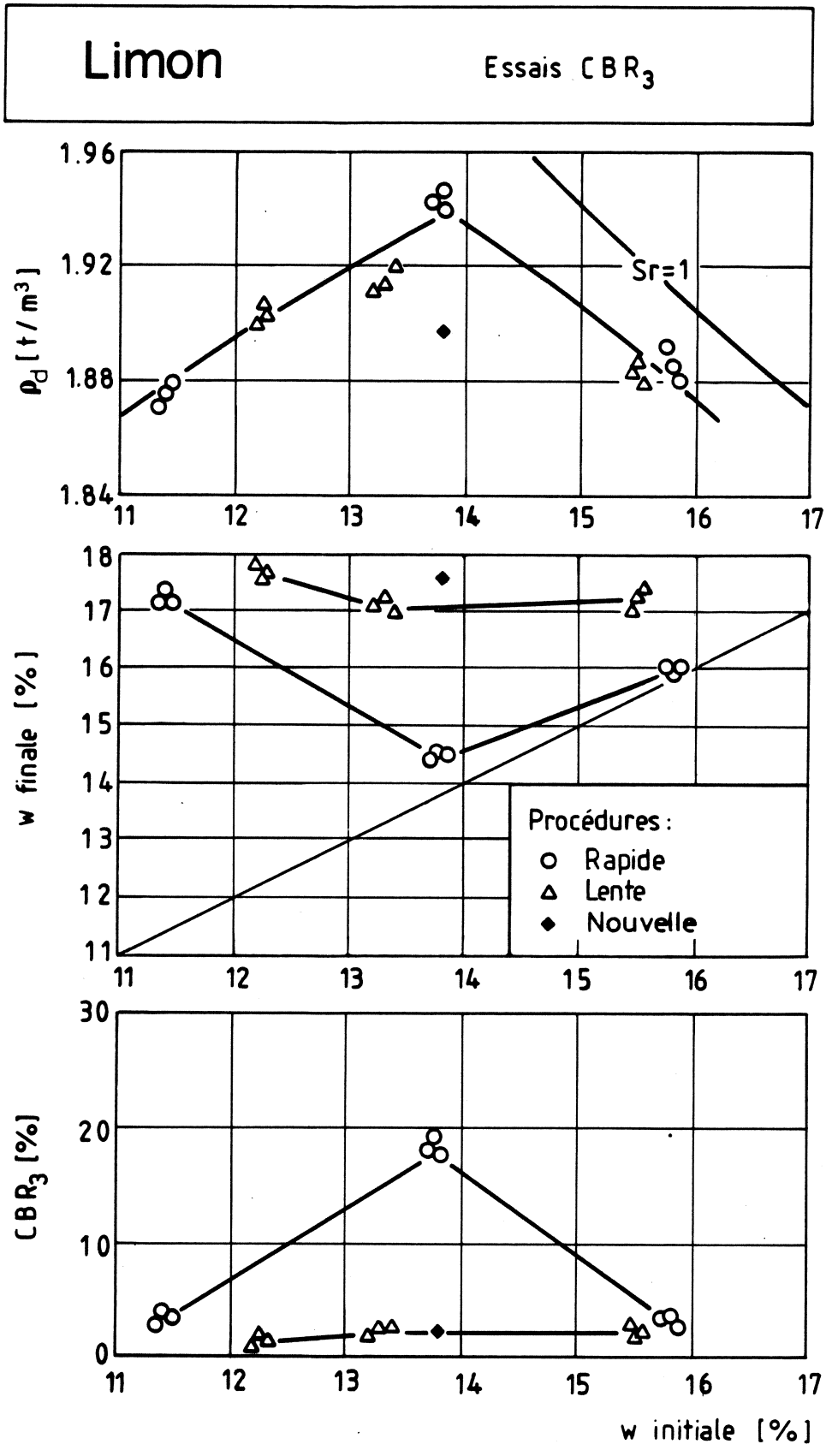

Fig. 6.13 Limon : ρ_d, w finale et CBR_3 en fonction de w_i

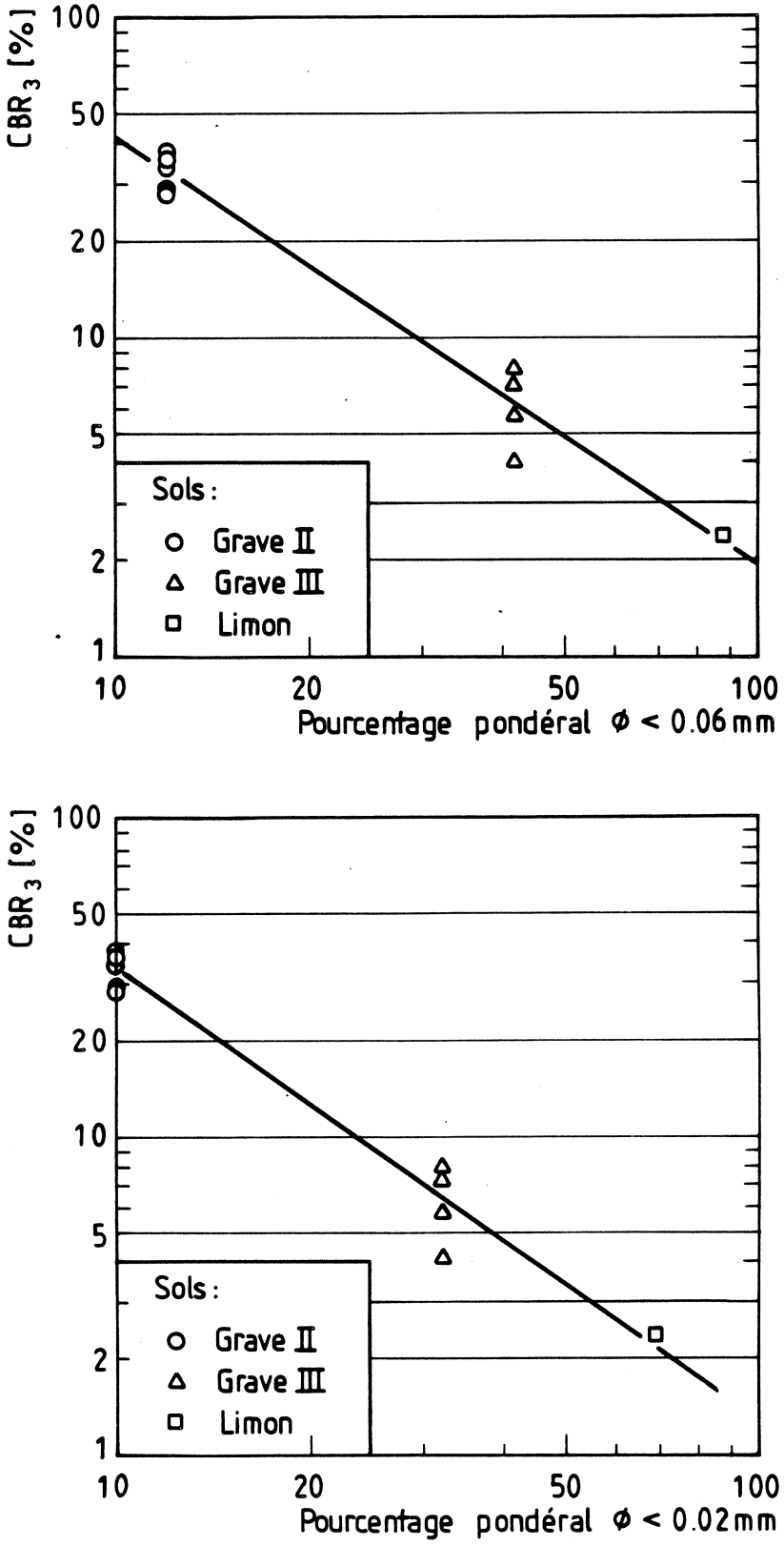

Fig. 6.14 CBR3 en fonction du pourcentage des fins pour la nouvelle procédure (prototypes I et II)

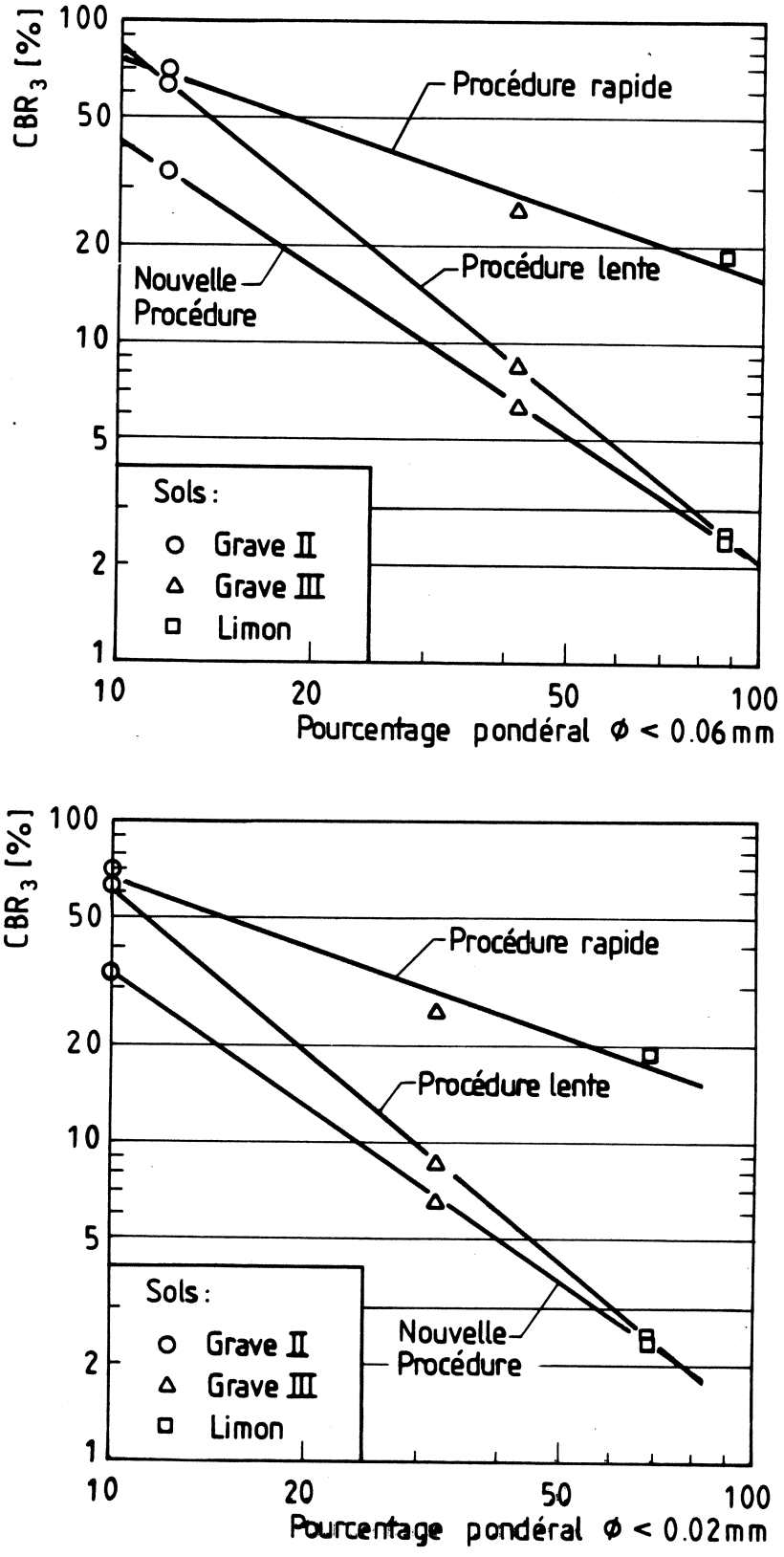

Fig. 6.15 CBR3 en fonction du pourcentage des fins et pour chaque procédure

Une autre représentation intéressante de la valeur CBR_3 en échelle logarithmique est son rapport avec le gonflement résiduel après dégel. La figure 6.16 illustre cette relation au moyen des dix éprouvettes testées avec les prototypes I (symboles vides) et II (symboles noirs).
Les droites de régression, correspondant chacune à un des prototypes du nouvel appareillage, sont curieusement presque parallèles. Un sol dont le gonflement résiduel est nul n'est pas sensible au gel est sa capacité portante devrait être indépendante de la procédure et de l'appareillage utilisés.
En enlevant le point marqué par une flèche (il s'agit d'une éprouvette Grave II avec w_i = 5.0 %, la seule éprouvette qui n'est pas compactée à l'optimum), on obtient la figure 6.17 qui est plus satisfaisante. Les deux droites de régression, qui ont toutes les deux un coefficient de corrélation de 1.00, se touchent pour un gonflement résiduel nul à la valeur CBR_3 de 70.
Le gonflement résiduel après dégel paraît être un bon paramètre pour estimer la sensibilité au gel et pourrait éventuellement remplacer la valeur CBR_3 qui, dans les sols grossiers, est fortement influencée par la proportion de cailloux sous le poinçon; dans tous les cas il permet son contrôle. Pour confirmer cette idée, il faudrait cependant entreprendre de très nombreux essais sur des matériaux à minéralogie et à forme de grains différente.
Cette relation entre le $\log(CBR_3)$ et le gonflement résiduel après dégel n'a pas pu être démontrée avec la procédure lente actuelle.

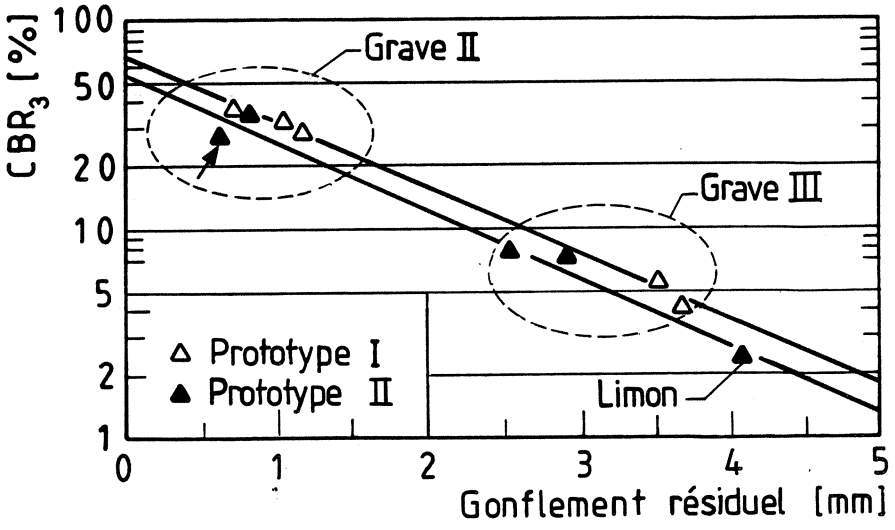

Fig. 6.16 CBR_3 en fonction du gonflement résiduel

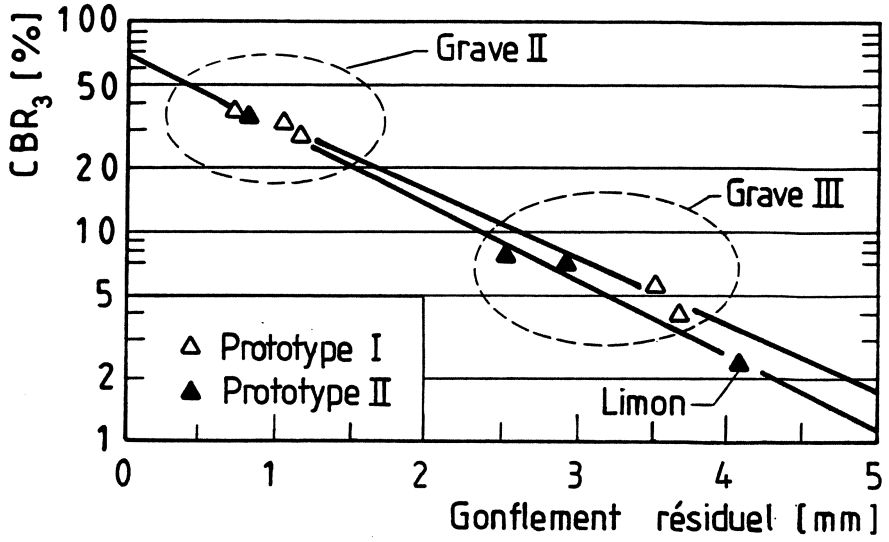

Fig. 6.17 CBR3 en fonction du gonflement résiduel avec les éprouvettes compactées à l'optimum.

6.5 AUTRES RESULTATS

6.5.1 Propagation du front de gel

La figure 6.18 montre l'évolution de l'isotherme 0°C en fonction du temps pour les trois sols types testés. Au début de l'essai, le front de gel pénètre très rapidement (40 mm par heure pour la Grave II). L'eau interstitielle ne gèle pas tout de suite en-dessous de 0°C; la première nucléation se produit d'un coup après deux à quatre heures de gel et l'éprouvette commence à gonfler. Le changement de phase brutal d'un important volume d'eau libère une quantité importante d'énergie qui réchauffe l'éprouvette. L'isotherme 0°C remonte alors jusqu'à ce qu'un équilibre énergétique soit atteint, puis il redescend à une vitesse plus modérée. Cette vitesse n'est pas constante, mais - ce qui est important - elle est monotone.

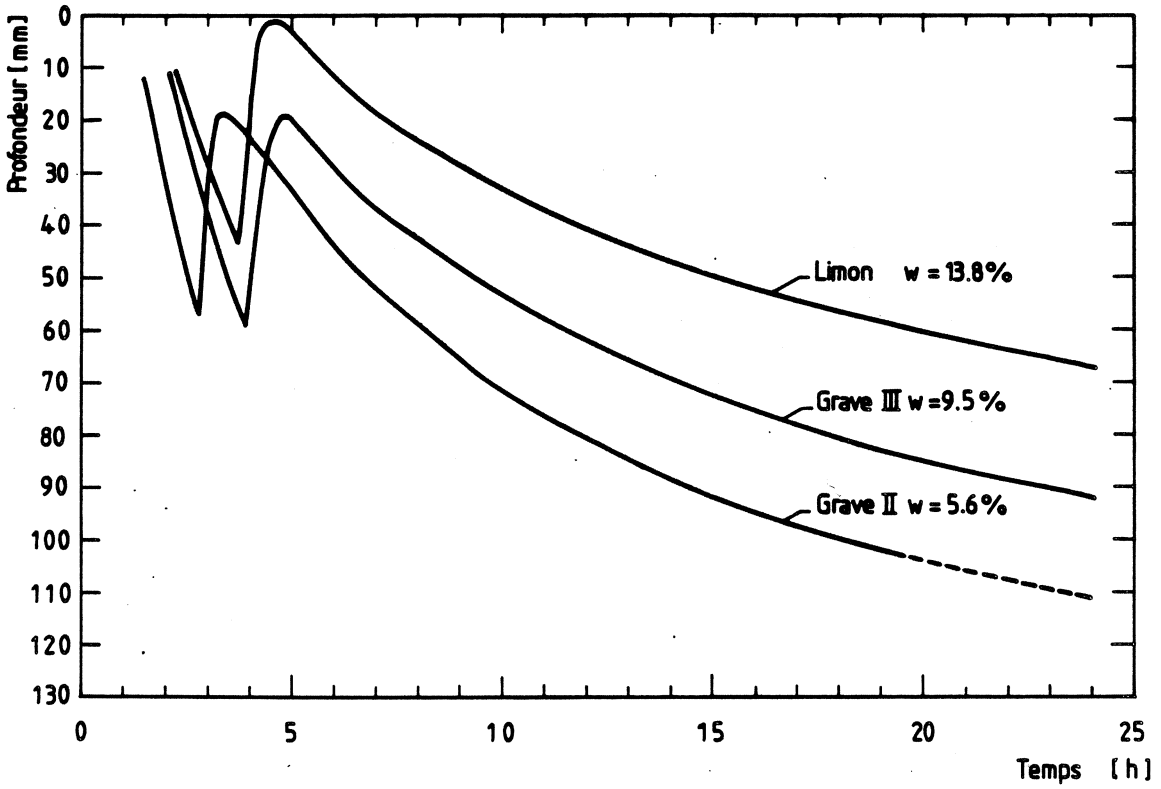

Fig. 6.18 Evolution de l'isotherme 0°C en fonction du temps

Le tableau 6.1 donne quelques valeurs de cette vitesse en mm par heure (il s'agit de la valeur moyenne de deux à trois éprouvettes).

	Grave II	Grave III	Limon
2 heures après la nucléation	9.73	10.32	6.71
5 heures après la nucléation	5.79	5.61	4.70
10 heures après la nucléation	3.71	3.41	3.12
20 heures après la nucléation	1.90	1.65	1.30

Tableau 6.1 Vitesses de propagation du front de gel en $mm \cdot h^{-1}$

6.5.2 Flux de chaleur brut

La figure 6.19 montre, pour deux sols différents (Grave II et Limon), la variation du flux de chaleur brut en fonction du temps; il a été calculé d'après la formule 6.1. Le flux de chaleur brut est composé de l'énergie extraite de l'éprouvette et du flux de chaleur passant au travers de celle-ci.

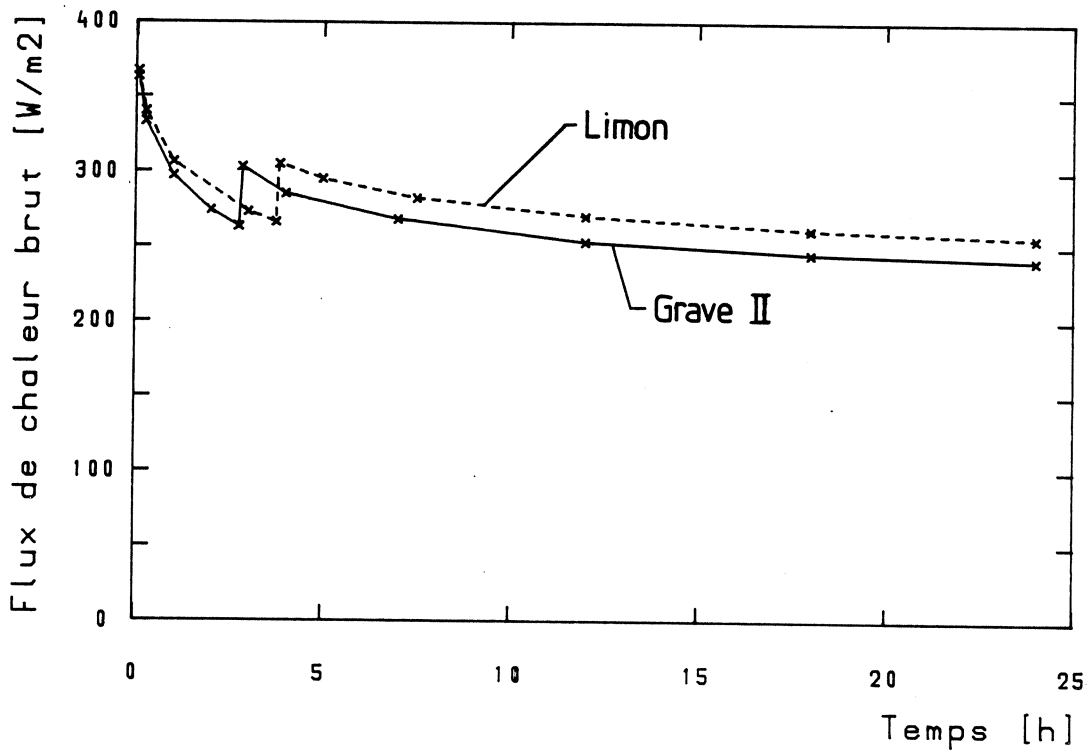

Fig. 6.19 Flux de chaleur brut en fonction du temps

On remarque l'affinité avec les isothermes de 0°C (Fig. 6.18); après la nucléation la courbe du flux de chaleur brut décroche également vers le haut. Par la suite, ce flux de chaleur diminue de façon monotone d'environ 300 à 250 $W \cdot m^{-2}$. La courbe correspondante à la Grave III se trouve entre celles représentées. Le flux de chaleur brut n'est guère influencé par le type du sol.

6.5.3 Gradient de température

Le gradient de température, qui est probablement le paramètre d'essai le plus important, est analysé sur les figures suivantes par des tautochrones.
La figure 6.20 montre, pour une éprouvette de Grave III, quelques tautochrones caractéristiques. La nucléation a lieu après 2.17 heures. La partie supérieure de l'éprouvette se réchauffe alors jusqu'à t = 2.67 heures; à ce moment le gradient de température est le plus faible de tout l'essai. Ensuite, et pendant tout le reste de l'essai, le gradient de température augmente légèrement. Les tautochrones sont presque linéaires: on n'observe pas de différence entre la zone gelée et la zone non gelée.

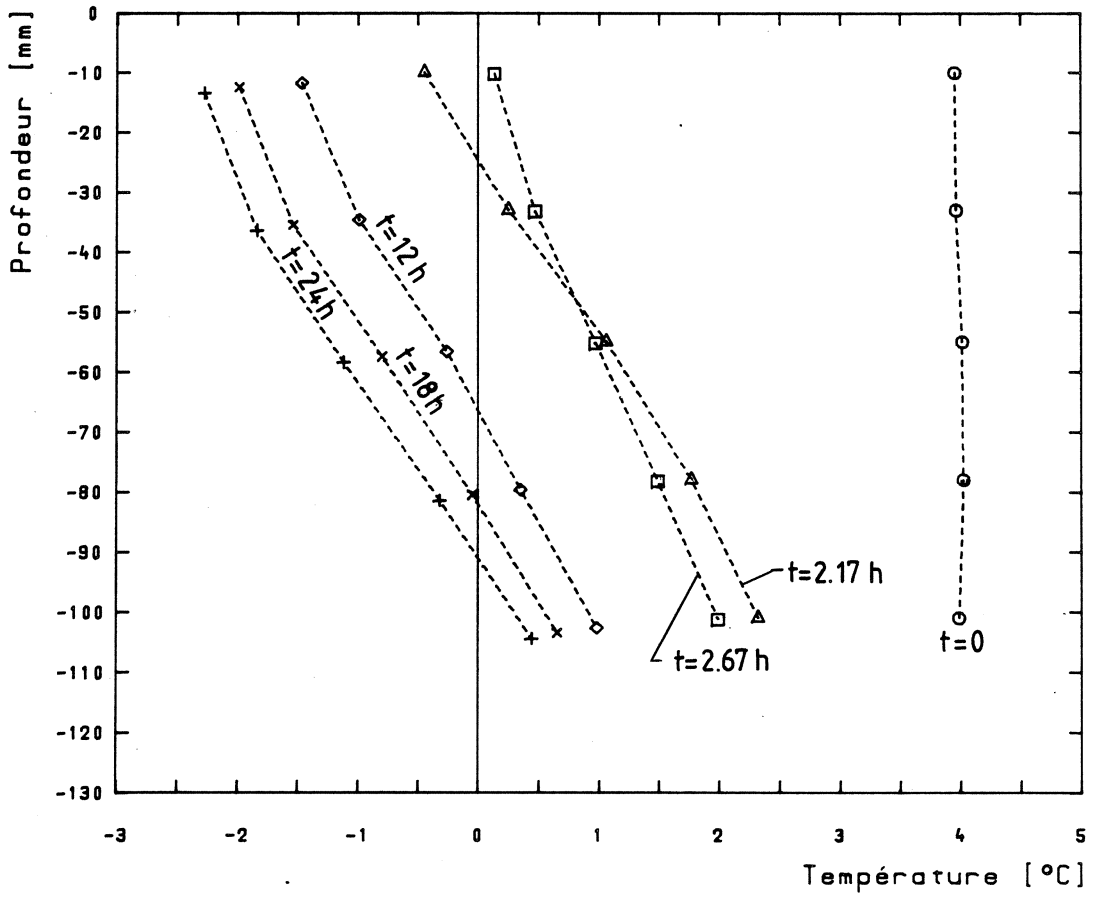

Fig. 6.20 Grave III : tautochrones pendant le gel

La faible diminution du gradient thermique dans la partie supérieure de l'éprouvette est probablement due à une inhomogénéité du sol causée par une diminution de la teneur en eau vers le haut. Une erreur de mesure n'est cependant pas à exclure.
La comparaison des tautochrones des trois sols fait l'objet des deux figures 6.21 et 6.22. La situation après 12 heures de gel est représentée sur la figure 6.21 et celle après 24 heures, correspondant à la fin de la période du gel, sur la figure 6.22. Les trois tautochrones correspondent aux trois éprouvettes dont l'isotherme 0°C est donné sur la figure 6.18.
Le gradient thermique est presque constant sur la hauteur de l'éprouvette et ne dépend guère du sol testé. La valeur moyenne de tous les essais effectués avec le prototype II est de 0.26°C par centimètre après 12 heures de gel et de 0.30°C par centimètre après 24 heures de gel.

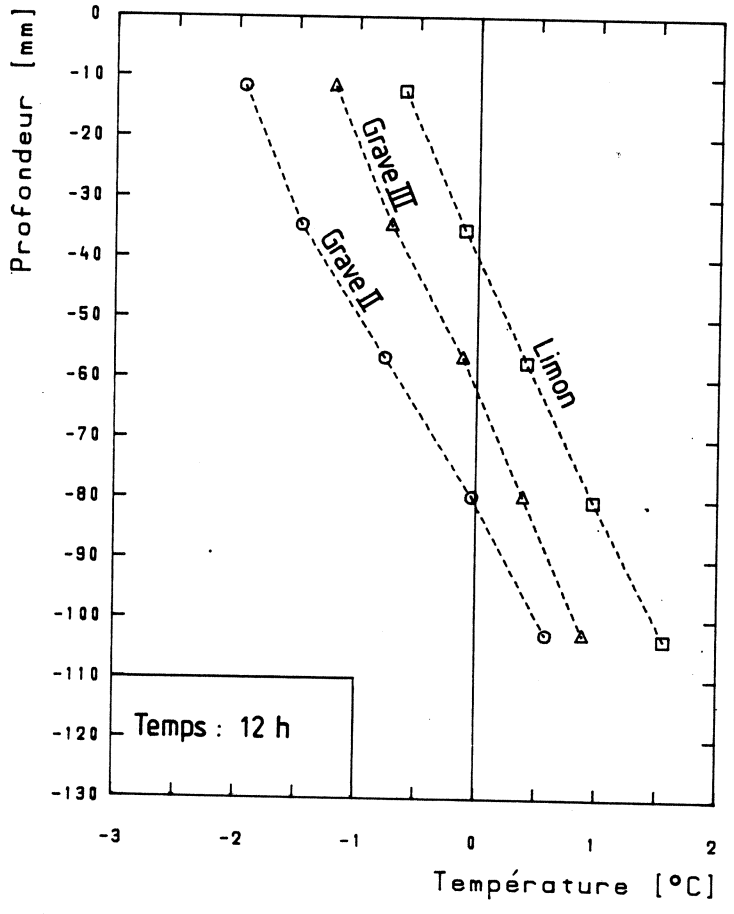

Fig. 6.21 Tautochrones des 3 sols types après 12 heures de gel

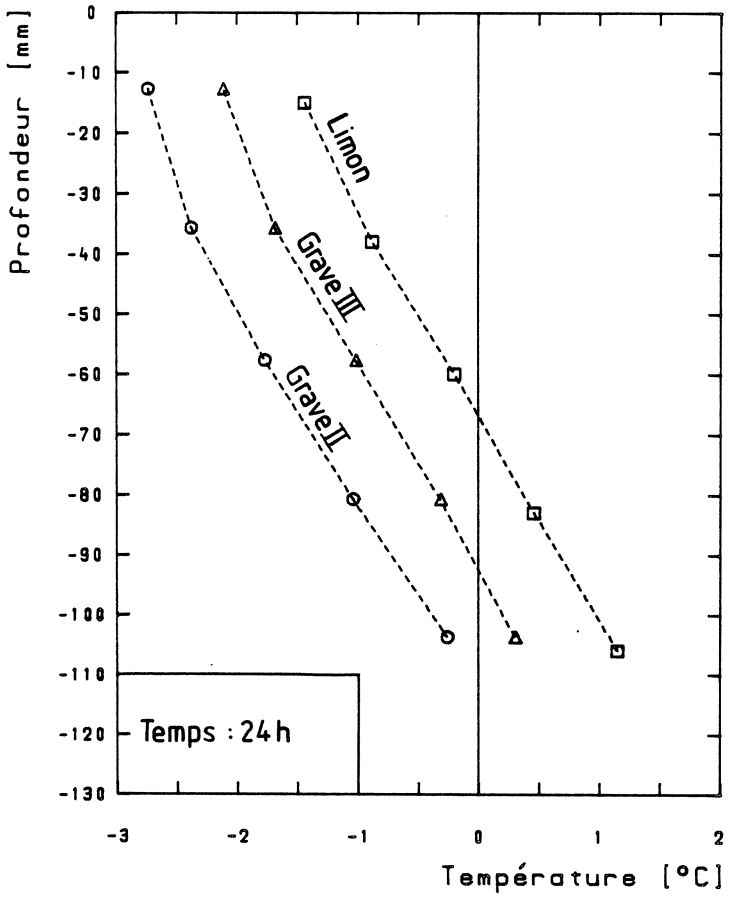

Fig. 6.22 Tautochrones des 3 sols types après 24 heures de gel

Si on extrapole les tautochrones des figures 6.20 à 6.22 jusqu'au pied de l'éprouvette on constate que la température ne correspond pas à celle de l'eau (4°C) et qu'elle dépend du type de sol. Ces deux phénomènes s'expliquent par le fait que l'embase en PVC, d'une épaisseur de 26 mm, agit comme isolant. La conductibilité thermique du PVC est en effet plus que dix fois inférieure à celle du sol.
La grande différence entre les températures des trois sols types est donc causée par l'embase: à la fin de l'essai la température au milieu de l'éprouvette est de - 1.5°C pour la Grave II, de - 0.8°C pour la Grave III et de - 0.1°C pour le Limon.

6.5.4 Lentilles de glace

Quelques essais ont été arrêtés après la période du gel afin d'examiner le résultat physique du gel. Grâce à la conicité du moule, le démoulage se fait facilement. Les photographies 6.1 et 6.2 montrent deux éprouvettes soumises à la procédure décrite au § 6.3, tandis que la photographie 6.3 provient d'une éprouvette soumise à une procédure différente décrite plus bas.

La **photographie 6.1** montre une éprouvette de Grave III avec le côté froid en haut. Le gonflement mesuré après le gel est de 3.42 mm. Les lentilles de glace sont fines et parfois peu visibles; leur extension est discontinue et faible. Afin de mieux visualiser les lentilles, la photographie est prise quelques minutes après le démoulage, après que les lentilles soient dégelées en surface.
La dernière lentille de glace se trouve à environ 51 mm du pied de l'éprouvette (79 mm de profondeur). La figure 6.23, qui montre quelques isothermes calculées pour le même essai, permet de déterminer la température de cette dernière lentille de glace: - 0.4°C à la fin de l'essai.
La figure 6.24 présente la relation entre la propagation de l'isotherme - 0.4°C et la vitesse de gonflement. Le premier point, à gauche en haut, représente la situation après 5.5 heures de gel. L'intervalle des points est toujours d'une heure; l'espace horizontale entre deux points représente donc la vitesse de propagation du front de gel. La vitesse de gonflement est toujours calculée pour une période d'une heure. La vitesse de gonflement diminue d'abord puis, au moment où l'isotherme - 0.4°C atteint une profondeur d'environ 50 mm, elle augmente.
La photographie 6.1 montre que la zone gelée peut être divisée en deux parties. Les 50 mm supérieurs (côté froid) sont presque libres des lentilles de glace; on y observe quelques lentilles isolées et non continues sur la largeur de l'éprouvette. A partir d'une profondeur de 50 mm, on peut apercevoir de nombreuses lentilles dont l'extension horizontale est limitée à quelques centimètres. En outre, l'espace entre deux lentilles diminue avec la profondeur.

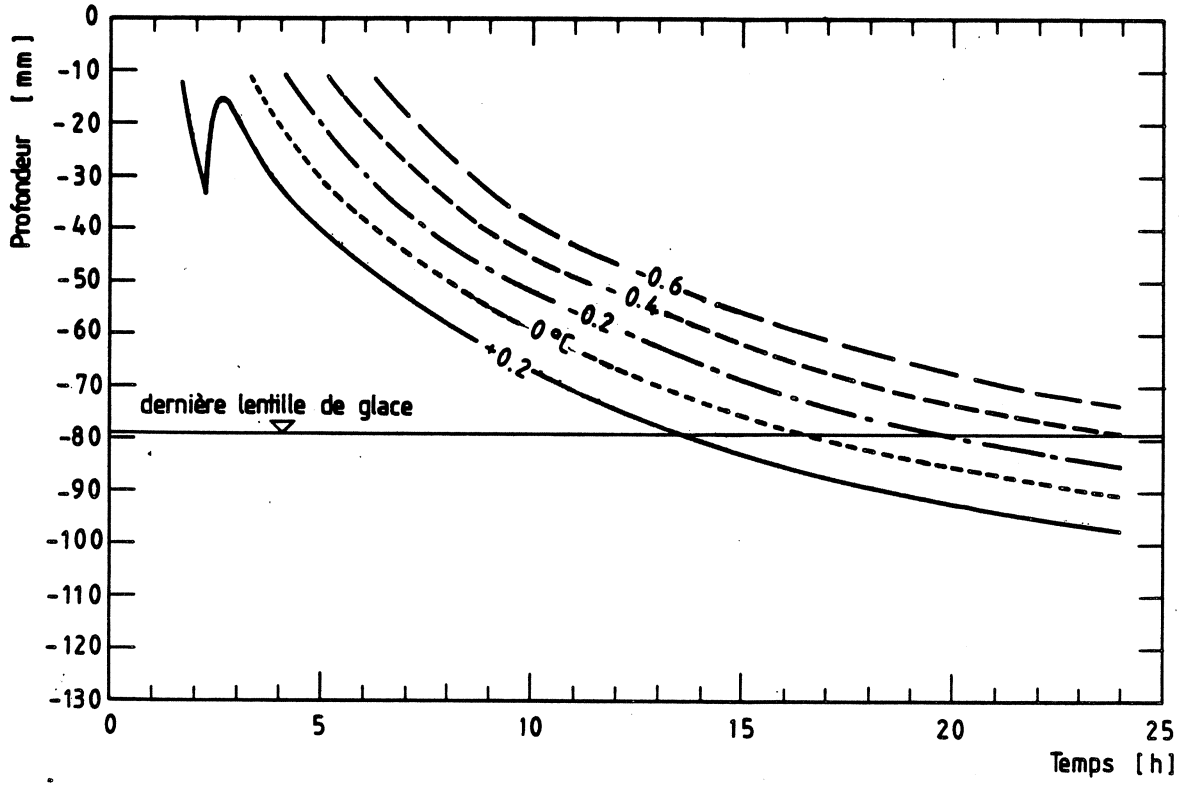

Fig. 6.23 Grave III : isothermes en fonction du temps

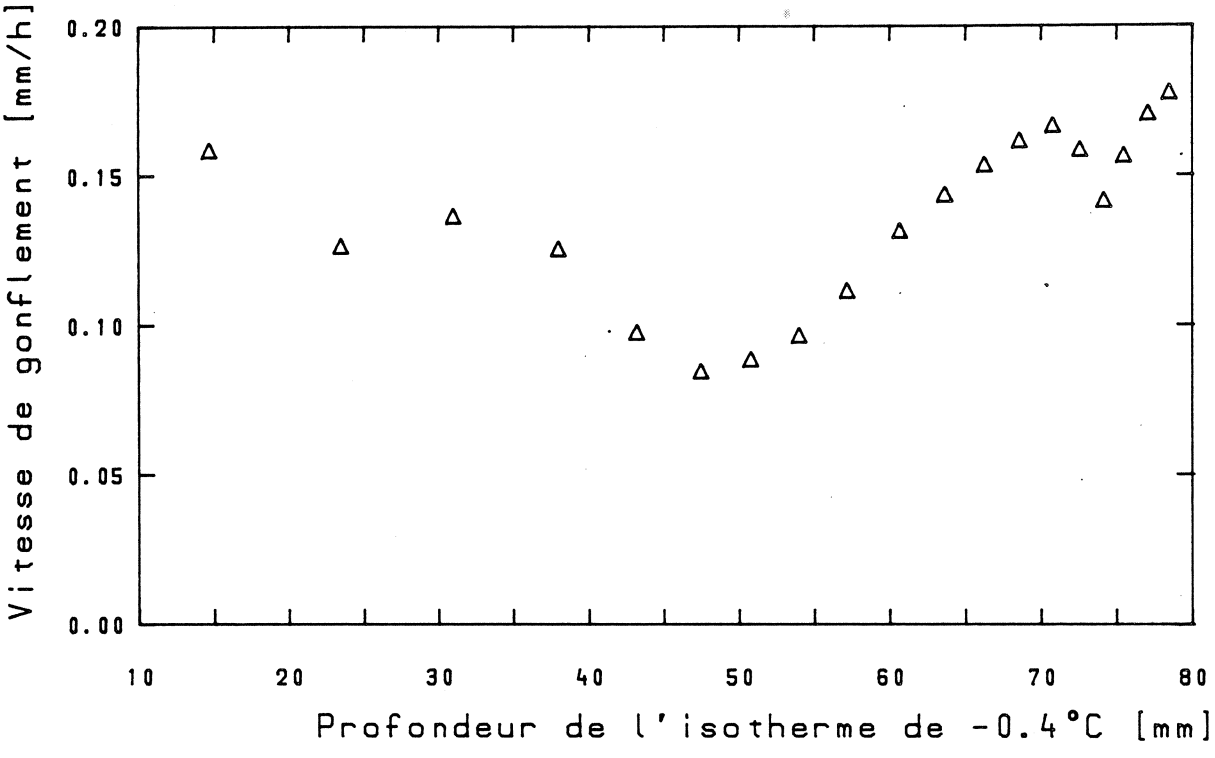

Fig. 6.24 Grave III : vitesse de gonflement en fonction de la profondeur de l'isotherme -0.4°C

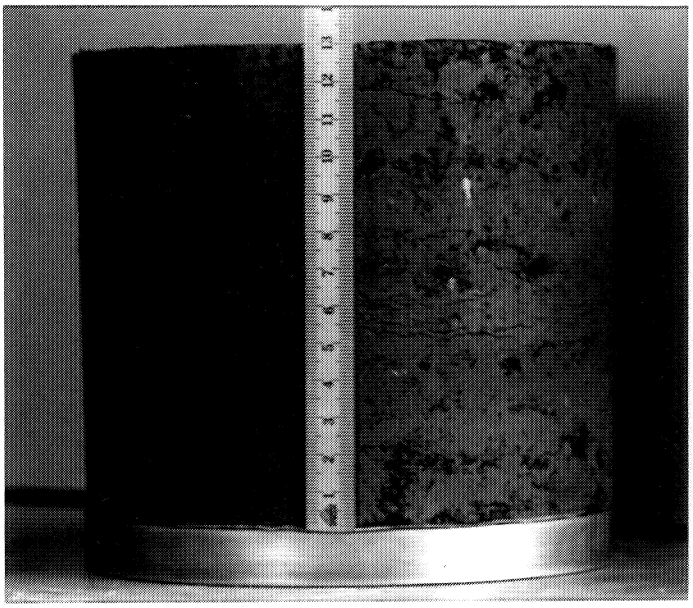

Photo 6.1

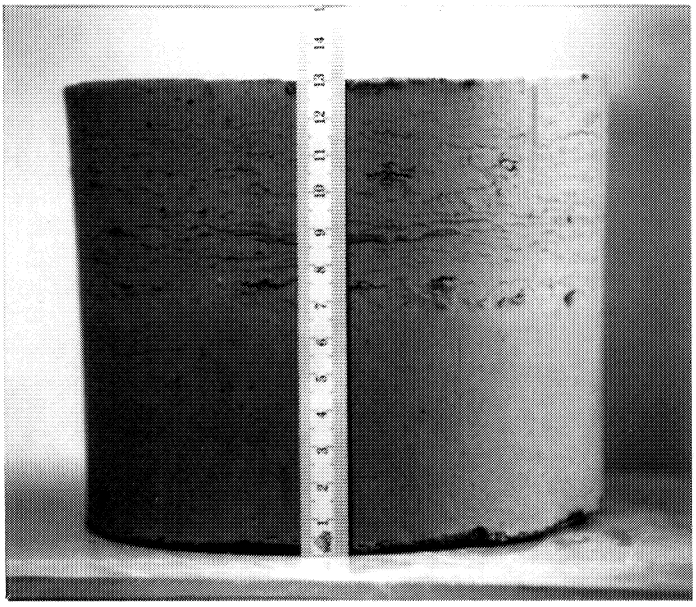

Photo 6.2

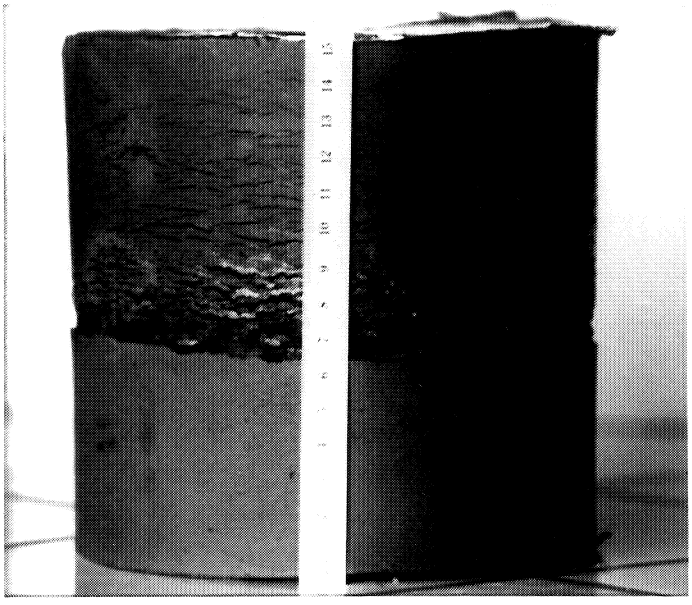

Photo 6.3

Le gonflement qui se produit avant que l'isotherme - 0.4°C atteigne une profondeur de 50 mm est probablement dû au changement de phase de l'eau interstitielle. Pendant cette période, le développement des lentilles de glace est empêché par une trop grande vitesse du front de gel. Plus le front de gel pénètre, plus sa vitesse de propagation diminue (sur la figure 6.24, elle est exprimée par l'espace horizontal entre deux points) ce qui explique la diminution de la vitesse de gonflement. Quand l'isotherme - 0.4°C atteint une profondeur d'environ 50 mm, la vitesse du front de gel est suffisamment faible (environ 4 mm par heure) pour permettre le développement de lentilles de glace; l'augmentation correspondante de la vitesse de gonflement est bien visible sur la figure 6.24. Parallèlement, la quantité d'eau transformée en glace par unité de temps augmente et avec elle la chaleur latente de fusion libérée, ce qui retarde la propagation du front de gel.

La **photographie 6.2** montre une éprouvette d'un Limon. Le gonflement mesuré après le gel est de 4.57 mm. Au contraire de l'éprouvette "Grave III", les lentilles de glace sont réparties sur toute la zone gelée. Elles sont également fines et leur extension est discontinue et faible. Afin de mieux les visualiser, la photographie est prise après un dégel superficiel de quelques minutes.
La dernière lentille de glace se trouve à une profondeur de 62 mm (68 mm du pied). A la fin de l'essai, la température mesurée à ce niveau était de - 0.35°C. La relation entre la propagation de l'isotherme - 0.35°C et la vitesse de gonflement fait l'objet de la figure 6.25.
Le premier point, en haut à gauche, représente la situation après 8.5 heures de gel. L'intervalle entre les points est toujours d'une heure; l'espace horizontal entre deux points représente donc la vitesse de propagation du front de gel. La vitesse de gonflement est calculée toujours pour une période d'une heure. La vitesse de gonflement diminue d'abord puis au moment où l'isotherme - 0.35°C atteint une profondeur d'environ 30 mm, elle devient constante pendant neuf heures. Pendant ce temps, le front de gel pénètre jusqu'à une profondeur de 55 mm et sa vitesse diminue progressivement jusqu'à moins de 2 mm par heure. A ce moment, là on constate une augmentation de la vitesse de gonflement.

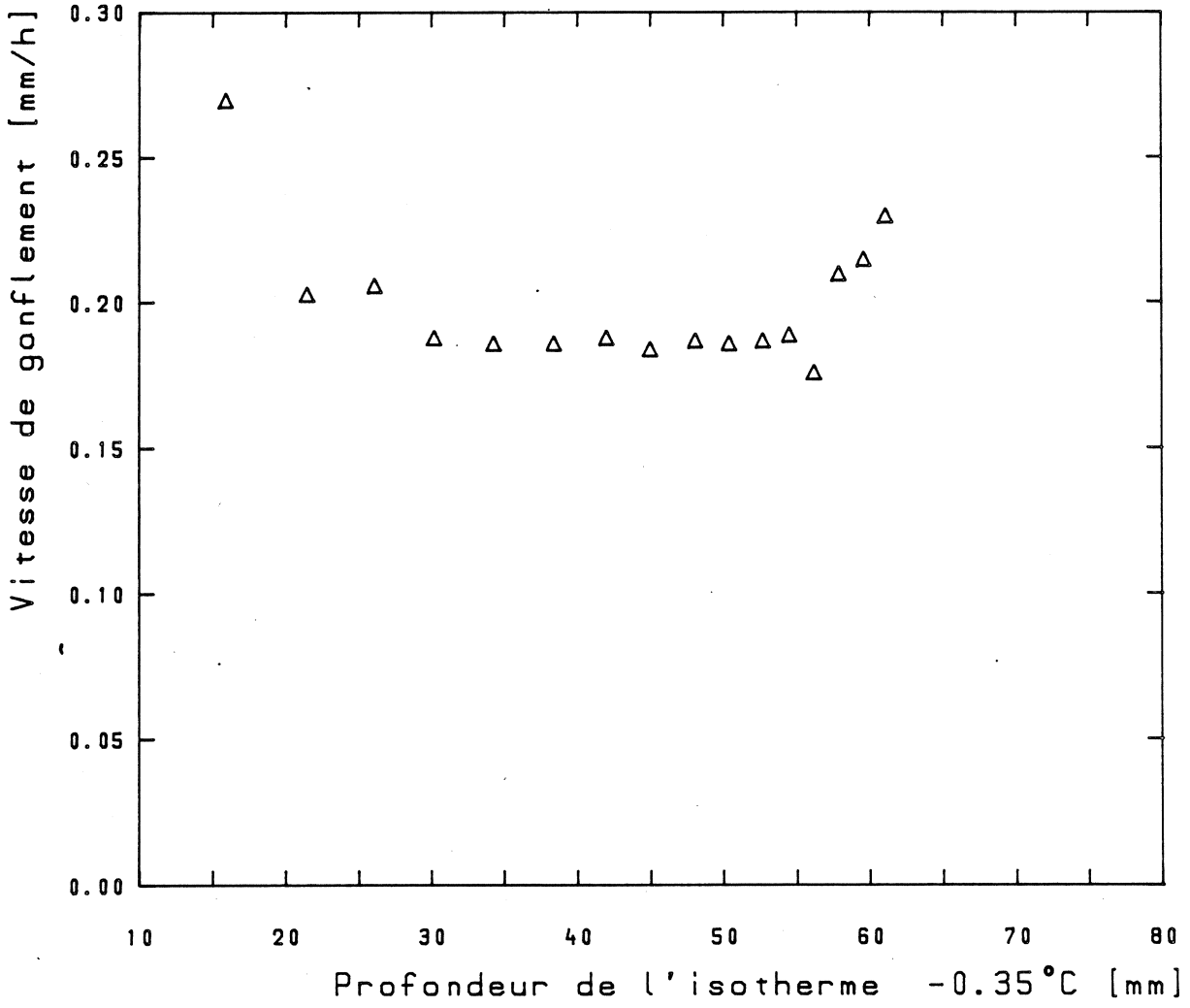

Fig. 6.25 Limon : vitesse de gonflement en fonction de la profondeur de l'isotherme -0.35°C

La photographie 6.2 montre des lentilles de glaces à partir d'une profondeur de 10 mm; la plus importante se trouve à une profondeur de 55 mm. La raison de la formation de cette lentille de glace est incertaine; il se peut qu'il soit dû à l'inhomogénéité de l'éprouvette. Comme l'éprouvette est compactée en cinq couches d'une épaisseur à peu près constante de 27 mm, ce niveau pourrait coincider avec l'interface entre la deuxième et la troisième couche de compactage.

La **photographie 6.3** montre une éprouvette d'un limon soumise au gel pendant plus de six jours. Malgré des conditions initiales différentes de celles des autres essais, la partie su-

périeure ressemble à celle visible sur la photographie 6.2: nombreuses lentilles fines avec une extension horizontale limitée, et quelques lentilles plus épaisses à partir d'une profondeur d'environ 50 mm. Au lieu d'arrêter l'essai après 24 heures, celui-ci a été poursuivi en maintenant l'alimentation des cellules Peltier. Le front de gel continue à pénétrer pendant environ deux jours, pendant lesquels il se forme une zone à forte concentration de lentilles de glace de presque 2 cm d'épaisseur. Pendant les 3 derniers jours de cet essai, le front de gel n'a plus pénétré et une lentille de glace pure d'une épaisseur de 6 mm s'est formée à environ 9 cm de profondeur. Au début de cette dernière période de 3 jours, la vitesse de gonflement était de 0.12 mm par heure et, à la fin, de 0.06 mm par heure.

6.6 CRITIQUE

6.6.1 Préambule

Les essais systématiques selon les procédures suisses actuelles de l'essai de gonflement au gel et de l'essai CBR3, ainsi que ceux exécutés selon la nouvelle procédure avec le nouvel appareil que nous proposons, procédure qui réunit l'essai de gonflement et le poinçonnement CBR, ont montré que le nouvel essai était beaucoup plus satisfaisant que ceux exécutés aujourd'hui. Le nouvel appareillage et la procédure utilisée ne sont cependant pas encore parfaits et doivent être encore modifiés sur certains points discutés ci-après.
En outre, de nouveaux tests systématiques devraient encore être réalisés avec l'appareil amélioré.

6.6.2 Mode opératoire

Les essais exécutés jusqu'à maintenant montrent qu'il devrait être possible de réaliser un essai gel-dégel pendant une semaine de travail. Ceci implique qu'il faudrait renoncer à la période de saturation proprement dite, ce qui signifie que la teneur en eau initiale de l'échantillon soit légèrement plus élevée que la teneur en eau optimale. Le déroulement de l'essai pourrait être le suivant:

Premier jour:	Préparation de l'échantillon
Deuxième jour:	Compactage suivi de la mise en place de l'éprouvette dans le dispositif. L'éprouvette est ensuite soumise à une surcharge, et refroidie à environ + 2°C.
Troisième jour:	Gel de l'éprouvette
Quatrième jour:	Dégel de l'éprouvette
Cinquième jour:	Poinçonnement CBR

Pour pouvoir comparer le nouvel essai aux essais CBR_3 selon procédures actuelles, la période de **saturation** de quatre jours a été maintenue. La mesure de la quantité d'eau absorbée pendant la saturation a permis de mettre en évidence certains aléas dans le compactage et dans la détermination de la teneur en eau initiale. Si l'on renonce à cette période de saturation hors du dispositif d'essai, il serait alors avantageux de mesurer la quantité d'eau absorbée pendant les différentes phases de l'essai pour vérifier le bon compactage de l'éprouvette.
La **surcharge** doit en principe être maintenue constante durant tout l'essai. Avec le nouvel appareillage et pendant le cycle de gel-dégel, la surcharge est fixée à 7 kPa par le poids de la tête du dispositif. Pendant la période de saturation et lors du poinçonnement CBR, cette surcharge était de 4.5 kPa comme dans l'essais CBR_3, selon la procédure actuelle.
La nouvelle tête proposée au § 6.6.3 devrait permettre de maintenir la surcharge constante.
L'instant de la **nucléation** est aléatoire. Elle s'est produite en général dans nos essais après deux à quatre heures. On a constaté que cette indétermination dans le moment de formation des premiers cristaux de glace conduisait à des différences dans l'allure des gonflements.
Il serait intéressant de déclencher artificiellement la nucléation à un moment précis, en faisant varier la puissance de réfrigération ou en secouant l'éprouvette, mais cela n'est pas facile.

6.6.3 Dispositif de gel

Pour pouvoir être acquis par de nombreux laboratoires, l'appareillage doit être aussi simple que possible tout en garantissant dans le temps la reproductibilité des résultats. Il doit pouvoir être reconstruit en tout temps et sa durabilité doit être telle, que les résultats puissent être comparés sur de

longues périodes. Enfin, le bon fonctionnement de l'appareillage doit pouvoir être contrôlé régulièrement.
L'emploi d'une cellule Peltier pour le refroidissement de l'éprouvette ne répond pas tout à fait à ces critères ceci pour les raisons suivantes:

Construction:

1. L'appareillage exige une cellule Peltier bien déterminée, dont la production n'est pas assurée à long terme.
2. Selon la firme la variation du rendement d'une cellule Peltier oscille autour de ± 5%.
3. Le montage de la cellule Peltier lors de la construction de l'appareil est difficile et exige beaucoup de soins. La solution utilisée pour nos essais n'est pas satisfaisante.

Durabilité:

On ne connaît rien de la durabilité des cellules Peltier. En outre, les propriétés des matériaux plastiques utilisés pour son enchâssure et son isolation peuvent varier dans le temps.

Contrôle:

Le bon fonctionnement de l'appareillage doit pouvoir être contrôlé à intervalle régulier avec un matériau standard. Avec une cellule Peltier, la température de la face froide de l'éprouvette devrait être mesurée, ce qui complique et renchéri le dispositif d'essai.

En conservant les principes de l'essai proposé, le refroidissement de la face supérieure froide de l'éprouvette pourrait être réalisé par une tête métallique refroidie par la circulation d'un fluide caloporteur, dont la température serait réglée par un cryostat. La plaque inférieure serait maintenue à une température constante légèrement positive par un fluide thermostatisé, ceci comme dans la nouvelle procédure présentée dans ce rapport; la température de la tête métallique serait elle progressivement abaissée au cours de l'essai.
Les températures appliquées seraient ainsi identiques pour tous les sols à tester comme, par conséquent, le gradient thermique. Les vitesses de propagation du front de gel seraient donc, à l'inverse de celles produites par la cellule Peltier, moins dépendantes des sols testés.

La construction d'un tel dispositif n'est pas compliquée et son coût ne serait que légèrement supérieur à celui de l'appareil construit pour nos essais. En outre, ce dispositif garantirait mieux la reproductibilité de l'essai et permettrait facilement de s'assurer de son bon fonctionnement en contrôlant la température des deux fluides thermostatisés.

6.6.4 Moule et son embase

Le compactage dans le nouveau **moule** en époxy conduit à des masses volumiques un peu plus faibles que celles obtenues dans le moule actuel en acier. Ceci est la conséquence de la rigidité moindre du moule époxy (module de Hooke 6 fois plus élevé pour l'acier) et, peut-être, de la conicité du moule (pendant le compactage, le plus grand diamètre se trouve en-dessous).
La rigidité du moule époxy devrait pouvoir être un peu augmentée en épaississant ses parois. Quant à la conicité du moule, dont le but est la diminution du frottement pendant le gonflement de l'éprouvette, son utilité est discutable car, lors du dégel qui est une phase importante du nouvel essai, il agit dans le sens contraire en empêchant un peu le tassement de l'éprouvette; cette rétention du tassement (de la reconsolidation) de l'éprouvette peut conduire à des valeurs CBR_3 plus faibles que celles obtenues dans un moule cylindrique.
L'**embase** en PVC agit comme une couche isolante entre l'éprouvette et le bain d'eau. Le gradient thermique dans l'éprouvette est ainsi diminué et il se rapproche de la réalité, ce qui est avantageux; le bain d'eau ne peut en effet être refroidi à moins de + 4°C, sinon le cryostat gèle. Le désavantage est que la température à la partie inférieure de l'éprouvette dépend des sols testés et qu'ainsi, la profondeur du gel diffère fortement d'un sol à l'autre. Pour pouvoir comparer des paramètres comme la valeur CBR_3 et le gonflement résiduel après dégel pour différents types de sol, il faudrait que cette profondeur soit toujours du même ordre de grandeur.
En conclusion, l'embase devrait être en métal.

6.7 CRITERES ASSOCIES

Pour évaluer pratiquement la sensibilité au gel de matériaux routiers ou d'un terrain naturel, il faut disposer d'une méthode, soit d'une méthode indirect ou d'un essai, et d'un **critère associé** à cette méthode. Pour un essai de gonflement, les cri-

tères peuvent être, entre autres, la vitesse de gonflement (voir par exemple le tableau 2.1), le gonflement après une certaine durée du gel (tableau 2.5) ou encore la pente de la relation gonflement - racine carrée de l'indice de gel de l'essai (tableau 2.4). Lors d'un essai avec un ou plusieurs cycles de gel-dégel, le critère associé est généralement la valeur du poinçonnement CBR après le dernier dégel (tableau 2.2 par exemple).

Les **essais de gonflement** réalisés aujourd'hui en Suisse n'ont pas de critère associé car il sont surtout utilisés pour comparer le comportement au gel de différents sols ou de différentes solutions de stabilisation.

- L'**essai CBR3** sert avant tout à qualifier les graves pour fondation; le critère associé est le rapport entre la valeur CBR_1 (après compactage et sans gel) et la valeur CBR_3.

Quant au **nouvel essai** proposé dans ce rapport, les critères associés pourraient être:

- le gonflement total à la fin du gel,
- la vitesse de gonflement pendant un intervalle de temps choisi,
- la valeur du gonflement résiduel après dégel,
- ou le coefficient CBR_3 lié ou non aux coefficients CBR_1 et CBR_2.

Nous avons démontré au § 6.4.2 que les deux premiers critères sont mauvais et ne permettent notamment pas de différencier la sensibilité au gel des Graves II et III.

Le gonflement résiduel est par contre intéressant, car c'est une mesure fiable et direct de l'ameublissement après le cycle gel-dégel du sol testé. Son choix permettrait en outre de se passer du poinçonnement CBR après le dégel; cette opération est cependant rapide et simple. Pour utiliser ce gonflement résiduel il faudrait corréler ce critère avec les critères employés aujourd'hui en Suisse, soit le pourcentage des grains fins, l'indice de plasticité et la classification USCS (SN 670'145), soit le rapport CBR_1/CBR_3 (SN 670'120b); cela demanderait de nombreux essais systématiques sur différents types de sols.

Enfin, le choix de la valeur CBR_3 comme critère ne nécessiterait par contre que peu d'essais complémentaires, ceci mis à part les essais nécessaires au perfectionnement de l'appareillage. C'est en effet un des critères utilisés actuellement, notamment pour la qualification des graves II.

Ces essais complémentaires devraient en particulier vérifier, pour la grave II, la valeur limite du rapport CBR_3/CBR_1 de la norme SN 670'120b : Grave pour couches de fondation, car la va-

leur CBR3 est, aujourd'hui, le plus souvent déterminée par la procédure rapide du mode opératoire en vigueur. Comme nous l'avons montré, les coefficients CBR3 obtenus avec cette procédure rapide sont trop élevés et mesurent très mal la sensibilité au gel de ce type de grave.
La valeur CBR3 obtenue avec le nouvel essai pourrait aussi contribuer à la détermination du **degré de gélivité** qui n'est aujourd'hui défini que par la classification USCS, le pourcentage des particules plus petite que 0.02 mm et l'indice de plasticité.
Une méthode de dimensionnement au gel basée sur cette valeur CBR3 pourrait aussi être envisagée à l'avenir; les nouvelles normes suisses de dimensionnement n'utilisent en effet que le degré de gélivité pour tenir compte du gel.

7 CONCLUSIONS

L'examen des modes opératoires des essais au gel exécutés à l'étranger et les essais qui font l'objet de ce rapport nous ont montré que, pour pouvoir caractériser correctement la sensibilité au gel d'un sol naturel ou d'un matériau routier, il fallait exécuter un essai qui inclut le dégel et la mesure directe de la diminution de la portance après le dégel.
C'est aussi l'avis du groupe de travail "Essais de susceptibilité au gel" de l'AICPR (Association Internationale Permanente des Congrès de la Route) présidée par M THAGESEN (DK). Ce groupe a donné les recommandations suivantes lors du Congrès de la route de Sydney (1983) :
"... La méthode devrait répondre aux conditions suivantes :
- elle doit être fiable et reproductible;
- elle doit être aussi simple et facile d'exécution que possible;
- elle doit être liée au gonflement par le gel et/ou à la diminution de capacité portante;
- elle doit être applicable à toute la gamme des types de matériaux, non seulement les sols à grains fins mais aussi les matériaux pour couches de base et de fondation."

Le nouvel essai que nous proposons suit assez bien ces recommandations:
- L'essai est simple à exécuter, ne dure que cinq jours et son appareillage n'est pas trop couteux;
- il inclut un cycle complet de gel / dégel et les gradients de température mesurés pendant le gel sont plus réalistes que ceux mesurés selon les procédures actuelles de l'essai de gonflement et de l'essai CBR_3;
- le moule utilisé (moule CBR) permet le test de matériaux d'un diamètre maximum de 20 mm.

Quant à la fiabilité et la reproductibilité de la méthode l'appareillage que nous avons construit et testé a encore des défauts qu'il faudra corriger et dont nous discuterons plus loin.

Le nouvel essai permet de déterminer plusieurs paramètres caractérisant la sensibilité au gel d'un sol, soit:
- le gonflement total pendant le gel,
- la vitesse de gonflement pendant le gel,
- le gonflement résiduel après dégel,
- et la diminution de la capacité portante après dégel par un poinçonnement CBR.

Nos essais ont montré que seuls les deux derniers permettaient de caractériser correctement la sensibilité au gel d'un sol. Pour les trois sols types utilisés pour les essais, la corrélation entre leur gonflement résiduel et le coefficient CBR3 est très bonne et il pourrait le remplacer. Ce gonflement résiduel devrait cependant être corrélé avec des coefficients CBR3 obtenus sur d'autres types de matériaux. Le gonflement résiduel peut aussi être avantageusement utilisé pour comparer divers types de sols ou solutions de stabilisation et remplacer ainsi le gonflement total des essais de gonflement actuels selon procédures IGB ou LMS qui, comme nous l'avons démontré, n'est pas un bon critère.

Si les principes de l'essai proposé nous paraissent répondre à ce que l'on peut attendre aujourd'hui d'un essai de mesure de la sensibilité au gel d'un sol naturel ou d'un matériau routier, l'appareillage testé n'a donc pas répondu à tous nos espoirs.
La **cellule Peltier** prévue en tête de l'éprouvette comme source de froid présente bien des inconvénients. Sa simplicité apparente est un leurre car ses caractéristiques sont difficiles à maîtriser et leur stabilité dans le temps n'est pas garantie; en outre, sa mise en oeuvre n'est pas facile. Nous prévoyons de la remplacer par une tête en métal, réfrigérée par un fluide, tête qui sera en contact direct avec l'éprouvette. Ce dispositif nécessitera un deuxième équipement de réfrigération.
Le choix d'un matériau plastique pour l'**embase** du moule n'est pas très heureux car son pouvoir isolant intervient défavorablement dans le déroulement de l'essai. L'embase devra être construite en métal.
Enfin, en ce qui concerne le **moule**, si sa construction en matière plastique empêche la formation d'un pont thermique perturbateur, elle a l'inconvénient de réduire la rigidité du moule et de conduire, lors du compactage de l'éprouvette, à des masses volumiques légèrement plus faibles que celles obtenues dans le moule CBR en acier. Cette rigidité doit être augmentée.

Ces recherches sur la mise au point et la normalisation d'un nouvel essai de mesure de la sensibilité au gel des sols et autres matériaux, plus satisfaisant que les essais de gonflements et l'essai CBR3 actuels ne sont donc pas terminées. Un appareillage amélioré doit encore être développé et testé selon un programme semblable à celui déjà réalisé. Un grand pas a cependant déjà été fait dans l'amélioration de la détermination

fiable et simple de la sensibilité au gel, domaine qui restera toujours important dans nos régions que ce soit pour la construction et la réfection des routes ou pour celles des voies ferroviaires.

8 BIBLIOGRAPHIE

BRANDL H. (1980). The influence of mineral composition on frost susceptibility of soils. 2nd International Symposium on Ground Freezing, Trondheim, proceedings, pp 815-823.

CHAMBERLAIN E.J. (1981). Comparative evaluation of Frost-Susceptibility Tests. Transportation Research Board, Record 809.

CHAMBERLAIN E.J., CARBEE D.L. (1981). The CRREL frost heave test, USA. Frost I Jord No. 22, Oslo.

CHAMBERLAIN E.J. (1984). A Freeze Thaw - Test to determine the frost susceptibility of soils. Internal Report, U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, 1-21.

CSATHY T.I., TOWNSEND D.L. (1962). Pore size and field frost performance of soils. Highway Research Board, Bulletin 331, pp. 67-80.

GARAND P., LADANYI B. (1982). Frost susceptibility testing of a compacted glacial till. 3th International Symposium on Ground Freezing, Hanover, New Hampshire, proceedings, pp 277-284.

GASKIN P., RAYMOND G. (1973). Pore size distribution as a frost susceptibility criterion. Symposium on Frost Action on Roads, Oslo, Vol. 1, pp. 295-309.

GASKIN P., TESTER R. (1985). Frost susceptibility of a granular road base with high fines content. Communication at the 4th International Symposium on Ground Freezing, Sapporo.

GIUDICETTI F. (1973). Die Tragfähigkeit eines Bodens beim Auftauen - Bestimmung im Laboratorium mit der CBR-Methode. Dissertation Nr. 5187 an der Eidgenössischen Technischen Hochschule in Zürich.

HOEKSTRA P., CHAMBERLAIN E., FRATE T. (1965). Frost heaving pressures. U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Research Report 176.

JESSBERGER H.L. (1973). Die Tragfähigkeit von frostempfindlichem Boden als Parameter für die Bemessung von Strassen sowie als Masstab für die Bewertung von Frostkriterien. Strasse und Autobahn 12/1973.

JESSBERGER H.L., CARBEE D.L. (1970). Influence of frost action on the bearing capacity of soils. Highway Research Board, Record No. 304.

JONES R.H., HURT K.G. (1978). An osmotic method for determining rock and aggregate suction characteristics with application to frost heave studies. Quarterly Journal of Engineering Geology, Vol. 11, pp. 245-252.

JONES R.H., DUDEK S.J-M. (1979). Comparaison of the Precise Freezing Cell with other facilities for frost-heave-testing. Transportation Research Board, Record No. 705.

JONES R.H. (1980). Developments and applications of frost susceptibility testing. Ground Freezing 1980, Developments in geotechnical engineering, No. 28, Elsevier.

KAPLAR C.W. (1974). Freezing test for evaluating relative frost susceptibility of various soils. U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Technical Report, 250, pp. 40.

L.C.P.C. (1978). Essai de gonflement au gel des sols. (Avant-projet de mode opératoire).

LOMAS K.J., JONES R.H. (1981). Evaluation of a Self-Refrigerated Unit for frost-heave testing. Transportation Research Board, Record 809.

MAAG G. (1966). Ein physikalisches Frostkriterium. Strasse und Verkehr, Vol. 52, Nr. 8, pp. 431-434.

MAGEAU D., Sherman M. (1983). Frost cell design and operation. 4th International Conference on Permafrost, Fairbanks, proceedings, pp. 767-772.

MARTIN R.T., WISSA A. (1973). Frost susceptibility of Massachusetts soils. Evaluation of rapid frost susceptiblity tests. Massachusetts Institute of Technology, Soils publ. 32, pp. 256.

McCABE E., KETTLE R. (1985). Thermal aspects of frost action. Communication at the 4th International Symposium on Ground Freezing, Sapporo.

PENNER E. (1957). Soils moisture tension and ice segregation. Highway Research Board, Bulletin 168, pp. 50-64.

PHUKAN, MORGENSTERN, SHANNON (1979). Development of a frost heave soil classification system. Fluor Northwest, Inc., Fairbanks, AK, Revised interim report, Vol. 1, 81 pp.

REED M., LOVELL C., ALTSCHAEFFL A., WOOD L. (1979). Frost heaving rate predicted from pore size distribution. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 16, pp. 463-472.

SHERWOOD P.T. (1981). British experience with the frost susceptibility of roadmaking materials. Frost I Jord No. 22.

SN 640'317a (1988, projet). Dimensionnement - Terrain et infrastructure. Union des professionnels suisses de la route.

SN 670 120b (1980). Graves pour couches de fondation - Prescriptions de qualité. Union des professionnels suisses de la route.

SN 670 145 (1970). Gel - Gélivité des sols. Union des professionnels suisses de la route.

SN 670 320a (1973). Essais - Essais CBR en laboratoire. Union des professionnels suisses de la route.

SN 670 376 (1971). Stabilisation des sols au ciment - Détermination du dosage. Union des professionnels suisses de la route.

STENBERG L., FREDEN S. (1980). Frost heave tests on tills with an apparatus for constant heat flow. Communication at the 2nd International Symposium on Ground Freezing, Trondheim.

STENBERG L. (1985). Apparatus for determination of frost susceptibility of soils. Communication at the 4th International Symposium on Ground Freezing, Sapporo.

THAGESEN et al. (1983). Essais de susceptibilité au gel. Rapport du comité technique des essais de matériaux routier. XVII congrès mondial de la route, Sydney.

TOWNSEND D.L., CSATHY T.I. (1963). Soil type in relation to frost action. Ontario Department of Highways, Toronto, Ontario Joint Highway Research Program, Rept. 15 and 29.

WILLIAMS P.J. (1966). Pore pressures at a penetration frost line and their prediction. Géotechnique, Vol. 16, No 3, pp. 187-208.

WILLIS E.A. (1930). Discussion on relation of frost phenomena to the subgrade by Burton and Benkėlman. Proc.,HRB, Vol.10.

WISSA A., MARTIN R., KOUTSOFTAS D. (1972). Equipment for measuring the water permeability as a function of degree of saturation for frost susceptible soils. Massachusetts Institute of Technology, Soils Publ. 316, 101 pp.

ZOLLER J.H. (1973). Frost heave and rapide frost heave test. Public Roads, Vol. 37, No. 6.