

Titre: Caractéristiques mécaniques du sel meuble
Title:

Auteurs: Jacques Ouellet, & Denis Gill
Authors:

Date: 1988

Type: Rapport / Report

Référence: Ouellet, J., & Gill, D. (1988). Caractéristiques mécaniques du sel meuble.
Citation: (Technical Report n° EPM-RT-88-18). <https://publications.polymtl.ca/9569/>

 Document en libre accès dans PolyPublie
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/9569/>
PolyPublie URL:

Version: Version officielle de l'éditeur / Published version

Conditions d'utilisation: Tous droits réservés / All rights reserved
Terms of Use:

 Document publié chez l'éditeur officiel
Document issued by the official publisher

Institution: École Polytechnique de Montréal

Numéro de rapport: EPM-RT-88-18
Report number:

URL officiel:
Official URL:

Mention légale:
Legal notice:

25 JUIL. 1988

EPM / RT-88 / 18

(
CARACTERISTIQUES MECANQUES
DU SEL MEUBLE
)

Jacques (OUELLET), étudiant au doctorat
Département de Génie minéral
Ecole Polytechnique de Montréal

Denis E. (GILL), Professeur
Département de Génie minéral
Ecole Polytechnique de Montréal

Service de l'édition

Ecole Polytechnique de Montréal

Juin, (1988)

Tous droits réservés. On ne peut reproduire ni diffuser aucune partie du présent ouvrage, sous quelque forme que ce soit, sans avoir obtenu au préalable l'autorisation écrite des auteurs.

Dépôt légal, 2^e trimestre 1988
Bibliothèque nationale du Québec
Bibliothèque nationale du Canada

Pour se procurer une copie de ce document, s'adresser aux:

Editions de l'Ecole Polytechnique de Montréal
Ecole Polytechnique de Montréal
Case postale 6079, Succursale A
Montréal (Québec) H3C 3A7
(514) 340-4000

Compter 0,10 \$ par page (arrondir au dollar le plus près) et ajouter 3,00 \$ (Canada) pour la couverture, les frais de poste et la manutention. Régler en dollars canadiens par chèque ou mandat-poste au nom de l'Ecole Polytechnique de Montréal. Nous n'honorons que les commandes accompagnées d'un paiement, sauf s'il y a eu entente préalable dans le cas d'établissement d'enseignement, de sociétés ou d'organismes canadiens.

SOMMAIRE

Ce document présente une revue de la littérature sur les propriétés mécaniques du sel meuble. Le terme sel meuble désigne un matériau granulaire composé à plus de 70% de halite. L'utilisation du sel meuble comme matériau de remblai dans les exploitations de sel gemme et de potasse est présentement considéré. Ce matériau sera également utilisé comme remblai pour les chambres d'entreposage des déchets nucléaires dans les dépôts de sel domal. A ces fins, il est nécessaire d'en connaître le comportement mécanique.

On y rapporte, d'abord, ses caractéristiques chimiques et physiques. Les mécanismes de déformation et de cimentation, sur le plan micromorphique, sont discutés en relation avec les différents facteurs environnementaux tel la température et le fluide interstitiel. Ensuite, les propriétés mécaniques à court terme et long terme sont examinées. On y discute le comportement contrainte-déformation et la résistance à la rupture.

Ces données expérimentales montrent que le sel meuble est un matériau présentant de la friction interne et que ses grains sont déformables. Il peut, par cimentation, développer suffisamment de cohésion pour se comporter comme un solide poreux. Son comportement mécanique est non-linéaire et dépend

de la température, de sa teneur en eau, de sa teneur en insolubles, de son passé mécanique et du taux de mise en charge. Le degré de cimentation est un facteur important vis-à-vis la résistance à la rupture à court et à long terme. Le sel meuble montre des déformations différées.

• Finalement, une vue d'ensemble sur l'information disponible dans la littérature et les données manquantes pour l'élaboration d'un modèle constitutif du sel meuble est présentée.

TABLE DES MATIERES

	<u>PAGE</u>
SOMMAIRE	iv
TABLE DES MATIERES	vi
LISTE DES TABLEAUX	viii
LISTE DES FIGURES	ix
LISTE DES NOTATIONS	xvi
CHAPITRE I - INTRODUCTION	1
I.1 - Préambule	1
I.2 - L'objectif du rapport	4
I.3 - Définition du terme sel meuble	4
CHAPITRE II - PROPRIETES MECANQUES DU SEL MEUBLE	6
II.1 - Caractéristiques physiques du sel meuble	7
II.1.1 - Composition du sel meuble	8
II.1.2 - Propriétés chimiques et physiques	10
II.1.3 - L'eau dans le sel meuble	15
II.1.4 - Granulométrie du sel meuble	17
II.1.5 - Mécanismes de déformation	19
II.1.6 - Mécanismes de cohésion	26
II.1.7 - Conclusion	32
II.2 - Propriétés mécaniques à court terme	33
II.2.1 - Densité et caractéristiques de compactage	33
II.2.2 - Compressibilité du sel meuble	36
II.2.2.1 - Compression hydrostatique	37

II.2.2.2 - Compression confinée	40
II.2.2.3 - Perméabilité du sel meuble ...	43
II.2.3 - Résistance au cisaillement	45
II.2.3.1 - Essais de compression	45
II.2.3.2 - Essais de cisaillement direct	51
II.2.4 - Conclusion	53
II.3 - Propriétés mécaniques à long terme	53
II.3.1 - Compressibilité du sel meuble	54
II.3.1.1 - Fluage en compression hydrostatique	54
II.3.1.2 - Fluage en compression confinée	58
II.3.2 - Lois de fluage volumétrique	61
II.3.3 - Fluage sous contraintes déviatoriques ...	69
II.3.3.1 - Fluage en compression uniaxiale	69
II.3.3.2 - Fluage en compression triaxiale	72
II.3.4 - Conclusion	73
II.4 - Conclusion	74
CHAPITRE III - ETAT DES CONNAISSANCES	75
III.1 - Préambule	75
III.2 - Données expérimentales disponibles	75
III.3 - Conclusion	76
BIBLIOGRAPHIE	78

LISTE DES TABLEAUX

- Tableau 1: Hygroscopicité de la halite (Kaufman, 1971).
- Tableau 2: Hygroscopicité de la sylvite (Adams et Merz, 1929).
- Tableau 3: Granulométrie du sel meuble.
- Tableau 4: Propriétés mécaniques de la halite (Lawrence, 1970).
- Tableau 5: Limites plastiques pour la halite (Hersey et al, 1972).
- Tableau 6: Paramètres de densité du sel meuble.
- Tableau 7: Essais triaxiaux de Pufahl et Yoshida, 1982.
- Tableau 8: Valeurs des paramètres expérimentaux (équation II.13).
- Tableau 9: Paramètres de l'équation II.17.
- Tableau 10: Paramètres de l'équation d'Arrhénius.
- Tableau 11: Essais de fluage en compression uniaxiale (chargement à un seul palier).

LISTE DES FIGURES

- Figure II.1a: Hygroscopicité de la halite d'après Innes, 1937; absorption d'eau à 20°C dans une atmosphère saturée.
- Figure II.1b: Hygroscopicité de la halite d'après Innes, 1937; absorption d'eau à différentes températures dans une atmosphère saturée.
- Figure II.1c: Hygroscopicité de la halite d'après Innes, 1937; absorption d'eau à 20°C pour différentes humidités relatives.
- Figure II.2: Teneur en eau des rejets de potasse immédiatement après compactage et 30 minutes après la fin du compactage à 1,50 g/cm³ (d'après Pufahl et Yoshida, 1982).
- Figure II.3: Teneur en eau des rejets de potasse immédiatement après compactage et 30 minutes après la fin du compactage à 1,60 g/cm³ (d'après Pufahl et Yoshida, 1982).
- Figure II.4: Courbes de séchage des rejets de potasse à 100°C (d'après Pufahl et Yoshida, 1982).
- Figure II.5: Courbes granulométriques (1 à 5) de sels meubles testés par les divers auteurs cités dans ce texte.
- Figure II.6: Courbes granulométriques (6 à 16) de sels meubles testés par les divers auteurs cités dans ce texte.
- Figure II.7: Courbes granulométriques (17 à 21) de sels meubles testés par les divers auteurs cités dans ce texte.
- Figure II.8: Photographies au microscope à balayage électronique d'une poudre de halite à divers stade de compactage: a) avant compactage, b) à 35 MPa, c) à 70 MPa, d) à 140 MPa (Down, 1983).

- Figure II.9: Variation de la surface spécifique en fonction de la pression de chargement pour: $\circ$ sucre, $\square$ halite en poudre de 212 à 250 μm . Symboles blancs: perméamètre ALFA-MEC6E et symboles noirs: perméamètre Blaine (Alderborn et Nystrom, 1985).
- Figure II.10: Représentation graphique de la relation de Heckel (d'après Heckel, 1961).
- Figure II.11: Courbes de Heckel pour le compactage de poudres de halite de différents diamètres de particules: $\blacktriangle$ plus de 1,0 mm, $\bullet$ 800 à 1000 μm , $\circ$ 250 à 400 μm , $\square$ 63 à 90 μm (Hersey et al., 1972).
- Figure II.12: Courbes de Heckel pour 1. - Amylose V, 2. - halite, 3. - Phosphate bicalcique bihydraté (d'après DeBoer et al., 1978).
- Figure II.13: Photographies au microscope à balayage électronique d'une poudre de halite exposée à différentes humidités relatives pendant 100 heures: a) moulage epoxy montrant les points de soudure entre deux particules, b) particules exposées à R.H. = 33%, c) R.H. = 66%, d) R.H. = 84% (d'après Down et McMullen, 1985).
- Figure II.14: Gain de résistance en tension de comprimés de halite exposés à différentes humidités ambiantes (d'après Lordi et Shiromani, 1984).
- Figure II.15: Gain de résistance en tension de comprimés de sylvite exposés à différentes humidités ambiantes (d'après Lordi et Shiromani, 1984).
- Figure II.16: Densité de compactage en fonction de l'énergie de compactage utilisée pour le sel meuble sec (d'après Withiam et al., 1984).
- Figure II.17: Courbe de compactage pour des rejets de potasse, essai Proctor standard (d'après Pufahl et Yoshida, 1982).
- Figure II.18: Courbe de compactage pour des rejets de potasse contenant 10% d'insolubles, essai Proctor standard (d'après Pufahl et Yoshida, 1982).
- Figure II.19: Relation entre l'indice des vides et le poids volumique sec pour le sel meuble de la mine d'Asse (Liedtke et Bleich, 1985).

- Figure II.20: Essai de pénétration standard (SPT) sur un remblai de sel meuble de la chambre 8a, niveau 532m de la mine d'Asse en Allemagne (Liedtke et Bleich, 1985).
- Figure II.21: Courbes contrainte-déformation pour des essais de compression hydrostatique sur le sel meuble sec à différentes températures (Holcomb et Hannum, 1982).
- Figure II.22: Courbe contrainte-déformation avec cycles de déchargement et rechargement pour le sel meuble sec en compression hydrostatique (Holcomb et Hannum, 1982).
- Figure II.23: Agrandissement du cycle No 8 de la courbe présentée à la Figure II.22 (Holcomb et Hannum, 1982).
- Figure II.24: Variation du module de compressibilité K en fonction de la charge appliquée pour un essai de compression hydrostatique (Holcomb et Hannum, 1982).
- Figure II.25: Variation du module de compressibilité K en fonction de la porosité (IT Corporation, 1984).
- Figure II.26: Courbes contrainte-déformation pour le sel meuble en compression hydrostatique. Code d'identification: UG pour $C_u = 1$, WG pour $C_u = 8$, D pour sec, W pour saturé, 25 ou 100 pour la température en degrés Celsius (Pfeifle et al., 1987).
- Figure II.27: Courbe contrainte-déformation du sel meuble à sec de la mine d'Asse en compression confinée pour différentes densités initiales (Kappei et Gessler, 1984).
- Figure II.28: Essai de compression confinée avec cycle de déchargement et chargement pour le sel meuble sec de la mine d'Asse (Liedtke et Bleich, 1985).
- Figure II.29: Effet de la température sur les courbes contrainte-déformation du sel meuble sec en compression confinée (Hansen, 1976).

- Figure II.30: Variation du module de compressibilité sécant du sel meuble sec en fonction de la contrainte axiale en compression confinée (Liedtke et Bleich, 1985).
- Figure II.31: Variation du module de compressibilité sécant du sel meuble saturé en fonction de la contrainte axiale en compression confinée (Liedtke et Bleich, 1985).
- Figure II.32: Variation du module de compressibilité sécant du sel meuble saturé en fonction de la contrainte axiale en compression confinée pour un taux de déformation contrôlé de 0.0001 mm/min (Liedtke et Bleich, 1985).
- Figure II.33: Courbe contrainte-déformation pour le sel meuble sec en compression confinée et hydrostatique. Courbe représentant le modèle empirique de Kelsall et al., 1985.
- Figure II.34: Perméabilité du sel meuble en fonction de l'indice des vides pour l'eau saturée en sel. Le trait plein représente la relation de Shor et al, 1981 et le trait en pointillé, la relation de Kozeny-Carman.
- Figure II.35: Résistance en compression uniaxiale des rejets de potasse en fonction de la teneur en eau après curage suivant deux modes différents (Pufahl et Yoshida, 1982).
- Figure II.36: Résistance en compression uniaxiale en fonction de la teneur en eau avant et après curage des rejets de potasse (Pufahl et Yoshida, 1982).
- Figure II.37: Courbes contrainte-déformation pour les rejets de potasse après différents temps de curage à teneur en eau initiale donnée (Pufahl et Yoshida, 1982).
- Figure II.38: Résistance à la rupture en compression uniaxiale en fonction de la porosité pour le sel meuble (Wagner, 1980).
- Figure II.39: Courbes contrainte-déformation en compression uniaxiale du sel meuble pour différents indices des vides à pression de confinement nulle (Liedtke et Bleich, 1985).

- Figure II.40: Courbes contrainte-déformation en compression triaxiale du sel meuble pour différents indices des vides à pression de confinement de 5 MPa (Liedtke et Bleich, 1985).
- Figure II.41: Courbes contrainte-déformation en compression triaxiale du sel meuble pour différents indices des vides à pression de confinement de 10 MPa (Liedtke et Bleich, 1985).
- Figure II.42: Résistance au pic ($\sigma_1 - \sigma_3$) en fonction de l'indice des vides et de la pression de confinement du sel meuble de la mine d'Asse. Taux de déformation contrôlé à 10^{-4} s^{-1} (Liedtke et Bleich, 1985).
- Figure II.43: Résistance au pic ($\sigma_1 - \sigma_3$) en fonction de l'indice des vides et de la pression de confinement du sel meuble de la mine d'Asse. Taux de déformation contrôlé à 10^{-8} s^{-1} (Liedtke et Bleich, 1985).
- Figure II.44: Enveloppe de rupture de Mohr-Coulomb des rejets de potasse en compression triaxiale (Pufahl et Yoshida, 1982).
- Figure II.44b: Enveloppes de rupture pour le sel meuble à différents indices des vides et taux de déformation tirées des essais de compression uniaxiale et triaxiale de Liedtke et Bleich (1985).
- Figure II.45: Enveloppe de rupture de Mohr-Coulomb des rejets de potasse en cisaillement direct (Pufahl et Yoshida, 1982).
- Figure II.46: Courbes de fluage en compression hydrostatique du sel meuble, le temps d'application de la charge est de 20 minutes. Code: UG pour un $C_u = 1$, WG pour un $C_u = 8$, D pour sec, W pour saturé et le nombre pour la température (Pfeifle et al., 1987).
- Figure II.47: Variation du taux de fluage volumétrique en compression hydrostatique du sel meuble sec dans le temps pour les essais de Case et al., 1987.

- Figure II.48: Variation du taux de fluage volumétrique en compression hydrostatique du sel meuble sec dans le temps pour les différents paliers de chargement de l'essai #1 de Case et al., 1987.
- Figure II.49: Variation du taux de fluage volumétrique en compression hydrostatique du sel meuble sec dans le temps pour les différentes contraintes et températures. Les traits verticaux indiquant les durées maximum des essais au laboratoire (tiré de IT Corporation, 1984).
- Figure II.50: Essais de fluage en compression confinée pour le sel meuble saturé en eau: a) pour différentes charges appliquées et un diamètre moyen des particules de $178,8\mu\text{m}$; b) pour différents diamètres de particules et une charge de 155 bars (Shor et al., 1981).
- Figure II.51: Essais de fluage en compression confinée pour le sel meuble saturé en eau à différentes températures pour un diamètre moyen des particules de $322,2\mu\text{m}$ et une charge de 155 bars (Shor et al., 1981).
- Figure II.52: Essais de fluage en compression confinée pour le sel meuble saturé en eau de différentes granulométries à une charge de 155 bars (Shor et al., 1981).
- Figure II.53: Essais de fluage en compression confinée pour le sel meuble saturé avec divers fluides à une charge de 155 bars (Shor et al., 1981).
- Figure II.54: Variation du taux de fluage volumétrique du sel meuble en compression confinée en fonction du logarithme du temps (Liedtke et Bleich, 1985).
- Figure II.55: Courbe de fluage du sel meuble sec en compression hydrostatique. Le trait pointillé représente l'équation [II.14] lissée sur les données expérimentales de cet essai (Holcomb et Hannum, 1982).
- Figure II.56: Relation entre la constante a de l'équation [II.15] et la température (Holcomb et Hannum, 1982).

- Figure II.57: Courbe de fluage d'un essai de compression uniaxiale avec un seul palier de chargement pour les rejets de potasse (Pufahl et Yoshida, 1982).
- Figure II.58: Courbe de fluage de l'essai SC-300 en compression uniaxiale à plusieurs paliers de chargement pour les rejets de potasse (Pufahl et Yoshida, 1982).
- Figure II.59: Courbe de fluage de l'essai SC-302 en compression uniaxiale à plusieurs paliers de chargement pour les rejets de potasse (Pufahl et Yoshida, 1982).
- Figure II.60: Courbe de fluage de l'essai SC-305 en compression uniaxiale à plusieurs paliers de chargement pour les rejets de potasse (Pufahl et Yoshida, 1982).
- Figure II.61: Courbe de fluage de l'essai SC-306 en compression uniaxiale à plusieurs paliers de chargement pour les rejets de potasse (Pufahl et Yoshida, 1982).
- Figure II.62: Courbe de fluage en compression triaxiale sur les rejets de potasse, essai CC-4 (Pufahl et Yoshida, 1982).
- Figure II.63: Courbe de fluage en compression triaxiale sur les rejets de potasse, essai CC-2 (Pufahl et Yoshida, 1982).

LISTE DES NOTATIONS

A,B,D	Constantes expérimentales pour les équations II.1, II.10.
a,b,c,d	Des constantes expérimentales.
a _i	Des constantes expérimentales (i = 0 à 3).
c _i	Des constantes expérimentales (i = 1 à 7).
cm	Centimètre.
cP	Poise x 10 ⁻² .
c ['] & c ^{''}	Paramètres du critère de Mohr-Coulomb: cohésion et angle de friction interne en contraintes effectives.
°C	Degrés Celcius.
D	Densité relative dans la relation de Heckel.
D ₀	Densité relative initiale dans la relation de Heckel.
e	Indice des vides.
E	Module de Young.
G	Module de cisaillement.
I _i	Les invariants de contrainte (i = 1 à 3).
K	Module de compressibilité ou constante expérimentale dans la relation de Heckel.
K _s	Module de compressibilité sécant.
K _T	Module de compressibilité tangent.
K _I	Module de compressibilité du sel gemme intact.
K ₀	Module de compressibilité initial ou coefficient des terres au repos.
kPa	Kilopascal.
m	Unités de mètres.

m, p, A'	Constantes expérimentales.
m', n', p'	Constantes expérimentales.
mm Hg	Unité de pression en millimètres de mercure.
MPa	Mégapascal.
n	Porosité.
n_0	Porosité initiale.
$P_m(t)$	Perméabilité du sel meuble au temps t (équation II.6).
P	Pression appliquée.
Q, R	Constantes de l'équation d'Arrhénius.
R.H.	Humidité relative de l'air ambiant.
SPT	Essai de pénétration standard.
t	Le temps.
t_f	Temps nécessaire pour obtenir la rupture différée.
T	Température.
T_0	Constante de normalisation de la température.
w_0	Teneur en eau initiale.
w_f	Teneur en eau finale.
Z	Diamètre moyen des grains de sel (équation II.6).
Z_0	Diamètre moyen initial des grains de sel (équation II.6).
ϵ	Une déformation.
ϵ_i	Composante de déformation principale.
ϵ_m	Déformation moyenne.
ϵ_v	Déformation volumétrique.
ϵ_c	Déformation moyenne totale nécessaire pour obtenir une densité équivalente au sel gemme.

$\dot{\epsilon}$	Le taux de déformation.
$\dot{\epsilon}_v$	Taux de déformation volumétrique.
ϵ_p	Déformation instantannée (équation II.18).
$\dot{\epsilon}_{tr}$	Taux de fluage transitoire (équation II.19).
$\dot{\epsilon}_{svm}$	Taux de déformation à long terme (équation II.20).
ϵ_f	Déformation à la rupture différée.
$\epsilon_v(t)$	Déformation volumétrique au temps t .
ν	Coefficient de Poisson.
$\bar{\epsilon}(t)$	Indice des vides au temps t (équation II.6).
ρ_0	Densité initiale.
ρ_c	Densité instantannée après l'application de la charge (équation II.14).
ρ_d	Densité sèche.
σ	Une contrainte.
σ_i	Une composante de contrainte principale.
σ_m	La contrainte moyenne.
σ_o	Constante de normalisation de la contrainte.
σ_v	Contrainte selon la direction verticale.
σ_h	Contrainte selon la direction horizontale.
$\delta V/V_o$	Variation de volume (équation II.14).

CHAPITRE I

INTRODUCTION

I.1 - Préambule

L'exploitation des gisements de sel gemme ou de potasse stratiformes au Canada se fait avec un taux de recouvrement se situant entre 35% et 45% (Miller, 1983; Pufahl et al., 1983). Le taux de défrètement est même inférieur à ces pourcentages dans le cas de l'exploitation du sel diapirique des Iles-de-la-Madelaine (Québec). Les portions non exploitées sont laissées sous forme de piliers pour assurer la stabilité de la mine. Suite au traitement, les rejets constituent jusqu'à 65% de la masse extraite dans le cas de la potasse et 103% du volume extrait (Pufahl et al., 1983). D'où accumulation potentielle importante de rejets en surface. Ce qui représente des coûts importants et un problème environnemental sérieux.

Le recyclage, en tout ou en partie, de ces rejets serait avantageux. Plusieurs solutions sont proposées. Bleimeister (1971) mentionne les possibilités suivantes pour recycler les rejets de sel gemme:

- conversion en saumure pour évaporation subséquente ou utilisation dans l'industrie chimique,

- conversion des particules trop fines par compression à température et humidité contrôlée afin de former des particules plus grosses,
- utilisation de ces rejets pour la construction de rampes ou voies d'accès dans la mine.

Plus récemment, depuis 1977, dans le cadre de l'exploitation des mines de potasse en Saskatchewan l'idée d'utiliser les rejets de potasse comme matériau de remblais dans la mine a été proposée (Taylor et Butcher, 1983). Cette solution permettrait, à long terme, de récupérer les piliers laissés en place et une plus grande stabilité des excavations (Taylor et Butcher, 1983; Miller, 1983; Pufahl et Yoshida, 1982; Pufahl et al., 1983).

Bien que cette idée est récente en Amérique du Nord il existe un cas d'utilisation de remblais de rejets de sel dans la mine d'Asse en Allemagne datant de 1920 (Kappei et Gessler, 1984). Cependant, l'intérêt pour cette application aux mines, dans la littérature, ne remonte pas plus loin que 1980 (Miller, 1980).

D'après Taylor et Butcher (1983) et Miller (1983) ce concept de remblais de rejets de sel en général, et de potasse en particulier, comporte les avantages suivants:

- réduction importante des accumulations en surface,
- minimisation des transports de rejets et des coûts associés,

- protection de l'environnement,
- augmentation du taux de recouvrement,
- concentration des opérations et expansion moins rapide des structures.

Les inconvénients rattachés à ce mode d'exploitation sont:

- coûts additionnels pour la préparation et la mise en place des remblais,
- plus de contrôle requis de la part de l'ingénieur,
- investissement de capital pour le nouveau système,
- maintenance et coûts d'entretien du nouveau système.

Quoiqu'il en soit, pour déterminer la faisabilité de ce concept il est nécessaire de connaître certains aspects du comportement mécanique à court et à long terme des rejets de sel gemme ou de potasse.

Par ailleurs, les projets d'enfouissement des déchets nucléaires dans les massifs de sel gemme ont aussi créé un grand intérêt en regard des propriétés mécaniques du sel broyé. En effet, il est prévu que les chambres d'enfouissement seront remblayées avec du sel meuble pour sceller les déchets derrière une barrière étanche (Kelsall et al., 1985). Les travaux de recherches sur le sel broyé ont été en quelque sorte exécutés en parallèle à ceux effectués sur les rejets de mines et ces travaux sont donc aussi une source importante de

données expérimentales.

Les autres sources d'information sont la technologie des poudres, la pharmacologie (fabrication des comprimés de sel) et les travaux sur les caractéristiques du sel broyé en vrac.

I.2 - L'objectif du rapport

Le présent rapport est une revue bibliographique portant sur les propriétés physico-mécaniques du sel meuble. Cette revue a été faite dans le but de préciser les caractéristiques rhéologiques connues de ce dernier et de définir les plages de comportement où des travaux de recherche sont nécessaires.

I.3 - Définition du terme sel meuble

Les matériaux étudiés dans le cadre de l'enfouissement des déchets nucléaires et des rejets de potasse en Saskatchewan sont constitués de halite pour une proportion de 88% à 95%. Les travaux en technologie des poudres, pharmacologie et sel broyé en vrac portent sur des matériaux composés de halite à plus de 99%. Ces matériaux sont donc essentiellement du sel sous forme granulaire. Dans le cas de certains rejets de mine la halite forme environ 70% du

matériau. Dans ce rapport, l'expression "sel meuble" sera utilisée comme terme général pour désigner un matériau granulaire composé en majeure partie de halite (plus de 70%).

Ce rapport présente une revue bibliographique sur les propriétés mécaniques du sel meuble en tant que matériau de remblai. Cette information servira à définir un programme expérimental. L'objectif visé est d'établir une base de données rhéologiques sur le sel meuble. Ce qui permettra, éventuellement, l'élaboration d'un modèle constitutif pour le sel meuble.

CHAPITRE II

PROPRIETES MECANQUES DU SEL MEUBLE

L'objectif visé est de présenter une vue d'ensemble sur les propriétés mécaniques du sel meuble. Ce chapitre se divise en trois parties. La première passera en revue les propriétés physiques et les mécanismes de déformation au niveau micromorphique du sel meuble. Le comportement mécanique à court terme du sel meuble sera ensuite examiné et finalement, on procédera à l'analyse du comportement à long terme.

Plusieurs facteurs peuvent influencer le comportement mécanique du sel meuble. Pfeifle et al. (1987) considèrent que les facteurs suivants peuvent intervenir:

- impuretés,
- granulométrie,
- densité initiale,
- teneur en eau,
- état de contrainte,
- historique de contrainte,
- température,
- temps.

Dans ce chapitre, les données disponibles dans la littérature seront revues et l'importance des effets de ces divers facteurs sur le comportement mécanique du sel meuble

sera examinée.

II.1 - Caractéristiques physiques du sel meuble

Bien que les propriétés mécaniques du sel gemme soient relativement bien connues, il est impossible d'extrapoler directement ces connaissances pour le sel meuble. Car, dans un matériau pulvérulent, ce ne sont pas seulement les propriétés des particules individuelles qui comptent mais la structure de l'ensemble. Dans les matériaux granulaires, la distribution spatiale des points de contacts dans la masse joue le rôle de lien structural entre les contraintes et les déformations (Chapuis et Soulié, 1981; Marsal, 1973). Les conditions à ces points de contacts sont donc importantes. La surface spécifique pour un matériau pulvérulent est aussi beaucoup plus importante que dans le cas du solide correspondant d'où une plus grande activité du matériau vis-à-vis l'environnement (humidité, fluide de saturation).

Contrairement aux sols usuels rencontrés en géotechnique, le sel meuble a des propriétés très particulières. Pour connaître et comprendre ces particularités et leur importance en relation avec les propriétés mécaniques, il est nécessaire d'examiner les propriétés physiques et chimiques qui rendent ce matériau particulier.

II.1.1 - Composition du sel meuble

Le sel meuble a été défini précédemment comme un matériau pulvérulent composé en majeure partie de halite. Cette définition générale est assez large et comprend tous les matériaux tel que le sel meuble pur jusqu'aux rejets de sel ou de potasse. La composition des différents rejets de potasse peut se résumer comme suit:

Halite (NaCl)	95.5%
Sylvite (KCl)	2.6%
Bischofite (MgCl_2)	1.6%
Insolubles	0.3%

Cette composition correspond au matériau étudié par Goodal et al. (1983), Miller (1983), Taylor et Butcher (1983), Pufahl (1983), Pufahl et al. (1983). Pufahl et Yoshida (1982) ont aussi étudié ce matériau mais ont fait des essais en y ajoutant 5% et 10% d'insolubles pour déterminer leur influence sur le comportement du rejet de potasse.

Une partie importante de la littérature porte sur le comportement du sel broyé dans le cadre de la recherche sur l'enfouissement des déchets nucléaires. Ce sel meuble a la composition suivante (Holcomb et Hannum, 1982; Stinebaugh, 1979; Kelsall et al., 1985; Korthaus, 1984; Kappei et Gessler, 1984; It Corporation, 1984; Case et al., 1987; Pfeifle et al., 1987; Withiam et al., 1984; Wagner, 1980; Wagner et Ratigan,

1979; Shor et al., 1981; Ratigan et Wagner, 1978; Hansen, 1976; Gnirk, 1978; Butcher, 1979; Kaufman, 1971; Bleimeister, 1971):

HALITE (NaCl)	88%
SYLVITE (KCl)	3%
POLYHALITE ($2\text{CaSO}_4 \cdot \text{MgSO}_4 \cdot \text{K}_2\text{SO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)	5%
KAINITE ($\text{MgSO}_4 \cdot \text{KCl} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$)	4%

Les données provenant du domaine de la technologie des poudres et de la pharmacologie portent sur un matériau composé à 100% de halite (Hardman et Lilley, 1970; Carstensen et Toure, 1980; Down et McMullen, 1985; Carstensen et al., 1980; Shotton et Ganderton, 1961; Down, 1983; Shotton et Rees, 1966; Lordi et Shiromani, 1984; Alderborn et al., 1985; Lawrence, 1970; Alderborn et Nystrom, 1985; Carstensen et Hou, 1985; Innes, 1937; Lowry et Hemmings, 1920; Whetstone, 1949; Cole et al, 1975; Bhatia et Lordi, 1979).

Tous les matériaux étudiés sont constitués en majeure partie par la halite. Dans le cas des rejets de la mine Seleine il est prévu qu'il y a de 20 à 30% d'insolubles. Alors la définition générale adoptée pour le sel meuble comprend toute la gamme des matériaux étudiés et peut aussi englober les rejets de la mine Seleine.

II.1.2 - Propriétés chimiques et physiques

Le sel meuble tel que défini précédemment, étant composé en majeure partie de halite, il est nécessaire d'examiner les propriétés de la halite. Le mot halite provient du grecque "hals" qui signifie mer (Ramsdell, 1971). La halite a comme composition chimique: NaCl . Elle cristallise dans le système cubique à faces centrées. Son poids spécifique varie entre 2,12 et 2,20 (Hurlbut et Klein, 1977).

Le sel, à faible contrainte moyenne, a un comportement fragile et une faible résistance. Au delà d'un seuil de plasticité apparent, la propagation de microfissures devient progressivement le mécanisme dominant de déformation permanente. A plus grande contrainte moyenne le sel est plus ductile et se déforme plastiquement. La propagation des dislocations est le mécanisme dominant de déformation permanente dans ce cas. Plusieurs facteurs influencent la plasticité du sel. Un réchauffement à température modérée ou l'immersion du cristal dans une solution saturée de sel vont augmenter la ductilité de la halite (Ramsdell, 1971).

La halite est soluble dans l'eau. Cette solubilité est augmentée par un accroissement de la température (voir le tableau 1). Dans une solution saturée de sel les petits cristaux sont plus solubles que les plus gros cristaux. Ceci a pour effet de favoriser la croissance des gros cristaux au

dépend des petits causant ainsi une diminution de la surface spécifique. Cette diminution de la surface spécifique du sel meuble diminue la réactivité du matériau (Lowry et Hemmings, 1920; Whetstone, 1949). Les formes cristallines métastables ou endommagées ont tendance à se recristalliser en présence d'une solution saturée pour retourner à une forme plus stable. Sous l'effet d'une pression appliquée sur un cristal, la solution ne transmettant pas cette pression, ce cristal montrera une plus grande solubilité que les cristaux ou les parties du cristal non contraints. Il y aura une redistribution de la matière à masse constante (Lowry et Hemmings, 1920; Correns, 1949).

La halite est une substance hygroscopique, c'est-à-dire, une substance qui a tendance à absorber l'humidité de l'air (Hedley, 1967; Lama et al., 1978; Kaufman, 1971; Whetstone, 1949; Innes, 1937). Elle est aussi capable de déliquescence. La déliquescence se rapporte à une substance capable d'absorber l'humidité de l'air au point de devenir liquide ou de se dissoudre complètement (Whetstone, 1949; Innes, 1937; Kaufman, 1971).

A une température donnée, la pression de vapeur d'une solution aqueuse d'une substance soluble non volatile est moindre que celle de l'eau pure. Lorsqu'un tel solide est exposé à de l'air ayant une pression partielle de vapeur d'eau supérieure à celle de sa solution saturée, de l'humidité se

condense sur sa surface pour former une solution saturée. Cette condensation se poursuit aussi longtemps que la pression de vapeur d'eau de l'air excède la pression de la solution ainsi formée ou jusqu'à ce que le solide soit complètement dissout. Après quoi la solution se dilue jusqu'à ce que les pressions partielles s'équilibrent. Cette tendance d'une substance à absorber l'humidité de l'air est proportionnelle à la tension de vapeur de sa solution saturée. L'hygroscopicité d'une substance peut donc être déterminée par la mesure de la pression de vapeur de sa solution saturée (Adams et Merz, 1929). Ce processus s'applique à la halite et dans le cas du sel meuble, il est un phénomène d'autant plus important que la surface spécifique des matériaux pulvérulents est grande par rapport au sel gemme (Kaufman, 1971). Le tableau suivant donne les valeurs de pression de vapeur d'une solution saturée de halite, la pression de vapeur de l'eau pure, le rapport de ces deux pressions et la solubilité de la halite pour différentes températures.

Bien que la pression de vapeur augmente avec la température, le rapport entre les deux valeurs demeure relativement constant à environ 75% de la pression de vapeur de l'eau pure. Cette valeur permet de définir une humidité relative critique qui correspond au point de déliquescence de la halite. Une humidité relative ambiante de 75% est le point critique à partir duquel la halite absorbera de l'humidité.

TABLEAU 1: Hygroscopicité de la halite (Kaufman, 1971).

température °C	pression de vapeur (mm Hg)		humidité critique (%)	solubilité %poids sel en solution
	sol. NaCl	eau pure		
0	3,5	4,6	76,4	26,2
10	6,9	9,2	74,9	26,3
20	13,2	17,5	75,3	26,4
30	23,9	31,8	75,1	26,5
40	41,6	55,3	75,2	26,6
50	69,5	92,5	75,1	26,8
60	112,0	149,4	75,0	27,0
70	175,0	233,7	74,9	27,3
80	265,2	355,1	74,7	27,6
90	391,6	525,8	74,5	27,8
100	564,0	760,0	74,2	28,1
108	760,0	1027,5	74,0	28,4
110	795,0	1074,6	74,0	28,4

Hum. crit. moyenne: 0 à 108°C: 74,9 / 10 à 40°C: 75,1

La sylvite étant le second minéral en importance dans le sel meuble, le tableau suivant donne la pression de vapeur et l'humidité relative critique à différentes températures pour ce minéral.

TABLEAU 2: Hygroscopicité de la sylvite (Adams et Merz, 1929).

Température (°C)	Pression de vapeur (mm Hg)	Humidité critique relative (%)
10	8,07	88,3
15	11,05	86,2
20	15,04	85,7
25	19,89	83,4
30	26,75	84,0
40	44,49	81,2
50	73,97	80,0

Le point de déliquescence ou humidité relative critique en fait représente la valeur de l'humidité relative à laquelle la pression de vapeur de la solution saturée est en équilibre avec la pression de vapeur de l'air. Donc, si le sel est exposé à l'air ayant une humidité relative supérieure à 75%, il y aura absorption d'eau. Si l'humidité relative de l'air est inférieure à 75%, il y aura évaporation d'eau de la surface des cristaux de sel. Dans le cas du sel meuble contenant une part de sylvite (3 à 5%), le point de déliquescence sera entre 75% et 80%. Cette valeur est celle déduite par Lordi et Shiromani (1984) de leurs résultats expérimentaux sur le sel meuble. Pour une granulométrie plus fine la surface spécifique du matériau est plus grande, l'absorption d'eau sera donc plus importante. Cependant il n'y a pas de données quantitatives permettant de caractériser ce phénomène (Kaufman, 1971; Whetstone, 1949).

Shotton et Rees (1966) ont observé que la poudre de sel, à conditions ambiantes normales (R.H. < 75%), perdait son humidité à un taux rapide.

Innes (1937) a étudié l'hygroscopicité de la halite. Les figures II.1 a, b et c permettent de caractériser l'hygroscopicité du sel meuble pour différentes conditions de température et d'humidité relative.

II.1.3 - L'eau dans le sel meuble

L'eau présente dans le sel meuble forme toujours une solution saline saturée. Cette eau se présente sous trois formes:

- en inclusion cristalline: bulles d'eau saturée emprisonnées dans le cristal lors de la formation de celui-ci;
- eau adsorbée: les molécules d'eau forment un film d'eau autour du cristal, ce film d'eau ne transmet pas de pressions hydrostatiques;
- eau libre: eau emplissant les vides entre les particules du sel meuble; dans un matériau saturé elle peut transmettre les pressions et s'écouler du matériau.

Des inclusions liquides sont fréquentes dans les cristaux de sel. Habituellement, ce liquide provient de la saumure à partir de laquelle s'est cristallisé le cristal de sel (Ramsdell, 1971). Par déformation mécanique ou rupture du cristal l'eau en inclusion peut être libérée et devenir de l'eau adsorbée (Lowry et Hemmings, 1920).

A la surface des particules de sel il se forme un film d'eau adsorbée. Même si le sel meuble semble très sec il y aura toujours un film d'eau adsorbée à la surface des

particules dans les conditions ambiantes normales (Lowry et Hemmings, 1920; Kaufman, 1971). Pour enlever cette eau adsorbée, il faut placer le sel dans un dessiccateur à température élevée pour des temps relativement longs. Pour obtenir un sel meuble parfaitement sec, il est nécessaire de le soumettre à un broyage mécanique durant le séchage afin de libérer l'eau en inclusion pour l'évaporation (Lowry et Hemmings, 1920). Ce film d'eau aura tendance à s'accumuler aux points de contacts interparticules par tension capillaire. Cette pellicule d'eau adsorbée forme une solution supersaturée à la surface des cristaux de sel. Cette solution a donc la pression de vapeur la plus basse possible (Kaufman, 1971).

Si le sel meuble est exposé à de l'air humide (plus de 75%), de l'eau s'ajoute à ce film d'eau adsorbée, à tel point que les particules peuvent devenir humide au toucher. Si suffisamment d'eau est ajoutée, soit par condensation ou soit directement, une partie du sel meuble passera en solution et les vides seront remplis par une solution saturée. Cette solution peut saturer le sel meuble. Elle peut alors transmettre les pressions hydrostatiques et s'écouler dans le matériau selon la perméabilité de celui-ci.

Les teneurs en eau typiques mesurées dans des rejets de potasse exposés au jour varient de 2 à 4% (Miller, 1983; Pufahl, 1983). Pufahl et Yoshida (1982) ont observé qu'il était impossible de former des échantillons de sel meuble avec

une teneur en eau supérieure à 9%. Pour des teneurs en eau supérieures, le matériau se draine dès qu'il est laissé au repos. Lors des essais de compactage qu'ils ont effectués il était nécessaire de corriger la teneur en eau initiale car une certaine quantité d'eau était expulsée durant le compactage.

Les figures II.2 et II.3 montrent la teneur en eau finale par rapport à la teneur en eau initiale pour une densité de 1,50 et 1,60 immédiatement après compactage et 30 minutes après la fin du compactage. La figure II.4 montre des courbes de séchage au four pour les rejets de potasse testés par Pufahl et Yoshida (1982).

La teneur en eau à partir de laquelle le sel meuble contiendra de l'eau libre est donc relativement faible (2% selon Miller, 1983). Cependant cette valeur dépendra de la granulométrie et du degré de compactage du matériau. Pufahl et Yoshida (1982) ont observé que l'ajout de 10% d'insolubles augmentait la quantité d'eau que les rejets de potasse pouvaient retenir.

II.1.4 - Granulométrie du sel meuble

Les études sur le sel meuble couvrent une grande variété de granulométries. Dans le domaine de la technologie des poudres, la pharmacologie et le génie chimique le sel meuble a une granulométrie très fine et uniforme. Le tableau

suisant donne une liste des granulométries étudiées par les divers auteurs cités dans ce texte.

TABLEAU 3: Granulométrie du sel meuble.

Auteurs	Granulométrie (diamètre en μm)
Hardman et Lilley, 1972	63 à 90
Shotton et Rees, 1966	250 à 630
Hersey et al., 1972	160 à 250
	250 à 400
	800 à 1000
Cole et al., 1975	250 à 420
Down, 1983	250 à 630
Down et McMullen, 1985	250 à 630
Alderborn et al., 1985	212 à 250
Lawrence, 1970	53 à 125
	150 à 250
Alderborn et Nystrom, 1985	5 à 10
	10 à 20
	20 à 40
	63 à 90
	125 à 180
Lordi et Shiromani, 1984	400 à 630
Bhatia et Lordi, 1979	250 à 400

Les autres données expérimentales présentées dans ce texte proviennent des travaux sur l'enfouissement des déchets nucléaires et ceux sur les rejets de potasse. Les figures II.5 à II.7 montrent les courbes granulométriques des différents sels meubles étudiés par les divers groupes de recherche.

L'examen de ces courbes montre que les granulométries étudiées sont variées. Les coefficients d'uniformité varient entre 1 et 17. Le diamètre des particules varie entre 5 μm et 20 mm. Les données expérimentales disponibles couvrent donc une grande plage granulométrique.

II.1.5 - Mécanismes de déformation

L'intérêt porté aux processus de déformation du sel meuble au niveau micromorphique découle de la fabrication des comprimés de sel en pharmacologie. Ces données se rapportent à la technologie des poudres. Le processus de déformation est étudié par le biais d'un essai de compression confiné pour former des comprimés de sel. Une quantité de poudre de halite est déposée dans un moule et la charge uniaxiale de compression est appliquée hydrauliquement par un piston sur la partie supérieure de l'échantillon.

Pour caractériser les mécanismes de déformation et de liaison entre les particules, diverses approches sont utilisées. Down (1983), Down et McMullen (1985) ont utilisé le microscope pour photographier la poudre de halite à divers stades de densification. Des reproductions de quelques-unes de ces photos sont présentées à la figure II.8. Le processus de déformation à différentes étapes de la densification est représenté jusqu'à une pression de compression de 140 MPa. La déformation plastique des grains est mise en évidence. Du point de vue qualitatif ces photos permettent de visualiser les mécanismes de déformation du sel meuble lors de la densification. Initialement, il y a rupture de quelques grains localement lors du réarrangement des particules due à des concentrations de contraintes en ces points (Down, 1983).

Cependant, le mécanisme dominant est la déformation plastique des grains. Aux derniers stades de la compression il y a enchevêtrement des particules et refermeture des fissures par recristallisation pour les grains ayant subi une rupture. Ces résultats s'appliquent pour des grandes pressions de confinement (35 à 140 MPa). Les comprimés ainsi formés sont cohérents et très résistants.

Cole et al. (1975) ont observé qu'il n'y avait pas de changement de granulométrie après compaction du sel meuble. Ceci implique que le processus dominant est la déformation plastique des grains de sel et qu'il y a très peu de rupture de particules lors de la densification en compression confinée.

Alderborn et Nystrom (1985), Alderborn et al. (1985) ont utilisé la mesure de la surface spécifique pour caractériser le processus de densification du sel meuble. Une augmentation de la surface spécifique de l'échantillon de sel après densification indiquerait une fragmentation des particules. La figure II.9 montre l'évolution de la surface spécifique en fonction de la charge appliquée par le piston sur l'échantillon. Ces courbes correspondent à diverses substances. Pour la halite et la sylbite il n'y a que très peu de variation. Ces résultats confirment les conclusions de Cole et al. (1975), Down et McMullen (1983).

L'approche la plus populaire pour étudier les

mécanismes de déformation du sel meuble en compression confinée semble être la relation de Heckel (Krycer et Pope, 1982). Cette relation, développée en métallurgie des poudres, permet une étude qualitative et quantitative de la densification des poudres.

Heckel (1961) a assimilé le compactage d'une poudre à un phénomène cinétique de premier ordre. Cette relation a été développée expérimentalement pour la densification des poudres métalliques. Pour une substance dont les grains se déforment plastiquement la relation suivante est linéaire:

$$\ln [1/(1-D)] = KP + A \quad [\text{II.1}]$$

"D" représente la densité relative du matériau (par rapport à la densité du solide constituant les grains). Le logarithme du rapport $1/(1-D)$ est utilisé afin d'avoir une déformation positive de compression. "P" représente la pression de compression appliquée. La constante de proportionnalité K représente la pente de la partie linéaire de la courbe et est reliée à la limite plastique des particules. La figure II.10 donne une représentation de cette relation.

La constante A s'exprime:

$$A = \ln [1/(1-D_0)] + B \quad [\text{II.2}]$$

La composante B est attribuée à la part de densification due au réarrangement des particules. Le premier terme de l'équation [II.2] représente la densification de la

poudre qui s'est produit lors du remplissage du moule. Sur la figure II.10, la valeur de la pression marquant le passage à un comportement linéaire, P_L , correspond à la pression minimum nécessaire pour former un solide cohérent. Cette pression marque aussi le début de la densification par déformation plastique des grains si la courbe devient linéaire. Car dans le cas de la densification par fragmentation des grains, la courbe est non linéaire.

Il a été établi expérimentalement en métallurgie des poudres que la pente K est reliée à la limite plastique du matériau constituant les grains par le rapport:

$$K \approx 1 / 3P_y \quad [II.3]$$

Cette approche a été utilisée abondamment pour étudier les mécanismes de densification du sel meuble (Carstensen et Hou, 1985; Ramberger et Burger, 1985; Bhatia et Lordi, 1979; Deboer et al., 1978; Krycer et Pope, 1982; Hersey et al., 1972; Lawrence, 1970). La figure II.11 montre les courbes obtenues pour la compression confinée de poudres de halite à différentes granulométries. Les courbes se superposent et sont linéaires. La figure II.12 montre des courbes obtenues pour différentes substances. Celles se déformant par fragmentation montrent bien des courbes non linéaires. Dans le cas du sel, la relation est linéaire. Ces déductions sont confirmées par les observations microscopiques (Down, 1983).

Lawrence (1970) a utilisé la relation de Heckel pour

obtenir la limite plastique de la halite et a fourni diverses propriétés mécaniques des cristaux de halite. Ces propriétés ont été déterminées pour une poudre de granulométrie variant entre 150 et 250 μm .

TABLERAU 4: Propriétés de la halite (Lawrence, 1970).

Dureté Vickers	20
Limite plastique	66 MPa
Module volumétrique K	24,4 GPa
Module de cisaillement G	28,5 GPa
Module élastique E	57,6 GPa

Lawrence indique que le sel est aisément déformable et peu enclin à la rupture. Conséquemment, l'application d'une pression réduit la porosité par la distorsion des particules de sel. Hersey et al. (1972) ont obtenu des valeurs de limites plastiques par la relation de Heckel pour la halite et la sylvite sur différentes granulométries:

TABLERAU 5: Limites plastiques pour la halite (Hersey et al., 1972).

Granulométrie (μm)	Limite plastique en MPa	
	NaCl	KCl
20 à 30	55,6	22,5
40 à 60	67,7	27,8
60 à 80	53,4	33,6
80 et plus	67,3	32,4

Ces résultats se comparent à la valeur mesurée pour la halite par Lawrence (1970). Hersey et al., observent que les valeurs obtenues varient d'un essai à l'autre. Ils attribuent ceci au fait que contrairement aux métaux il y a des défauts cristallins dans les particules de halite et ces substances sont plus sensibles aux conditions ambiantes. Cole et al., 1975, assimilent le processus de densification du sel meuble à une diffusion des particules dans les vides par déformation élastique et plastique et finalement par compression du matériau solide (sans vide).

Le mécanisme de densification de la halite et de la sylvite en compression confinée est, selon les résultats précédents:

- un réarrangement des particules par glissement et rotation;
- des ruptures locales de particules dues aux concentrations de contraintes en certains points;
- une déformation plastique des grains.

Le processus de réarrangement des grains au premier stade de la compaction sera fortement influencé par la friction entre les particules. Selon Hausner (1972) les facteurs suivants influencent la friction inter-particules: coefficient de friction du matériau, granulométrie, forme des particules, conditions de surface des particules, surface spécifique de la masse, fluide entourant les particules (gaz

ou eau), température, charges appliquées et forces inter-particules (cohésion, attraction, gravité).

Comme il a été dit précédemment (section II.1.3), l'eau est un agent important vis-à-vis les propriétés du sel meuble. La présence d'eau a pour effet de lubrifier les grains et d'abaisser la limite plastique des grains (Ramsdell, 1971). Shotton et Rees (1966) ont observé microscopiquement que l'eau arrondissait les particules par dissolution en plus de lubrifier. Malgré la faible viscosité du film liquide formé sur les grains par l'eau les forces de friction entre les particules étaient éliminées. La présence d'eau dans le sel meuble aura pour effet d'augmenter significativement la compressibilité du sel meuble. Cet effet a été observé par Shor et al. (1981), Kelsall et al. (1984).

Hardman et Lilley (1972) ont effectué des essais de compression confinée sur le sel meuble en introduisant des déformations de cisaillement par une rotation du piston durant l'application de la charge. Le cisaillement a eu pour effet d'augmenter la réduction de volume de 10% durant la compression pour une même pression par rapport aux essais sans cisaillement. De plus l'examen microscopique a montré que les échantillons cisailés avaient subi plus de fragmentation de particules que les échantillons comprimés sans cisaillement.

II.1.6 - Mécanismes de cohésion

Le sel meuble a une propriété particulière: dans le temps, exposé aux conditions ambiantes, la masse se cimente et forme un solide (Kaufman, 1971). Ce phénomène a aussi été observé sur le terrain pour les rejets de potasse exposés à l'air libre au jour et pour des rejets de sel stocké au fond. Les empilements se cimentent et forment une masse solide à tel point qu'il faut parfois recourir aux techniques de sautage pour remobiliser le matériau (Kaufman, 1971; Pufahl, 1983; Miller, 1983; Goodal et al., 1983). Goodal et al. (1983) indiquent que les rejets sont si cimentés qu'il faut recourir au forage à diamant pour échantillonner en profondeur ou à des scies mécaniques en surface. L'essai de pénétration standard (SPT) est inutilisable dans ces rejets.

Ces observations démontrent que le sel meuble, sous certaines conditions, va se cimenter et développer une forte cohésion. Les mécanismes impliqués dans le processus de cimentation sont bien connus. La cause principale de l'agglomération du sel meuble est son affinité pour l'eau (Whetstone, 1949).

Plusieurs facteurs interviennent dans le processus de cimentation du sel meuble (Kaufman, 1971):

- distribution granulométrique,
- teneur en eau,

- présence d'impuretés,
- température,
- défauts cristallins,
- historique d'exposition à l'humidité,
- historique de contraintes,
- temps.

Bien que les propriétés du sel qui affectent la cimentation s'appliquent à toutes les granulométries, plusieurs de ces propriétés sont grandement intensifiées lorsque la taille des particules diminue. Ceci est dû au fait que la surface spécifique augmente et le nombre de points de contact augmente rapidement avec la taille des particules (Whetstone, 1949; Kaufman, 1971).

Donnan (1918) présente quatre mécanismes intervenant dans l'agglomération des masses granulaires. Ces mécanismes sont repris par plusieurs auteurs afin d'expliquer les processus de cimentation du sel meuble (Whetstone, 1949; Kaufman, 1971; Down, 1983; Down et McMullen, 1985; Huttenrauch, 1976 et 1978):

1) Distribution inégale des contraintes: si le solide est soumis à une contrainte (points de contact) mais pas le liquide, la solubilité du solide va augmenter. Ce solide sera recristallisé sur les portions moins contraintes. Ce processus causera éventuellement la cimentation de la masse.

2) Variation de taille des particules: Relativement aux particules plus grosses, les petites sont plus solubles. Les vides entre les grosses particules sont remplis par les petites. Alors, le film d'eau sur les petites particules n'est pas en équilibre avec celui des grosses particules voisines. Un processus de résolution-précipitation se produit car le film d'eau sur les petites particules est supersaturé par rapport à celui sur la grosse particule. Ce phénomène peut amener la cimentation des particules.

3) Existence d'une forme cristalline instable: si un cristal stable est en contact avec une forme métastable il y aura dissolution sur la forme métastable et reprécipitation sur la forme stable.

4) Surfaces cristallines partagées ou "effet Beilby": Huttenrauch (1976) présente l'effet Beilby comme un mécanisme basé sur l'énergie d'activation. Une partie de l'énergie de déformation, lors de la compression, est absorbée par les cristaux de sel sous forme d'un accroissement de la densité des dislocations du réseau cristallin. Suite à cette activation mécanique, les surfaces des particules deviennent amorphes et acquièrent une forte réactivité. L'excès d'énergie est relâché par recristallisation afin d'éliminer le désordre cristallin créant ainsi des liens solides de cimentation entre les particules. Les observations microscopiques et les données expérimentales montrent que les traces d'humidité servent de

médium pour le réarrangement structural à ces sites. Il se forme des recristallisations lamellaires sur les faces des particules soudant littéralement celles-ci les unes aux autres (Down et McMullen, 1985). La figure II.13 montre des photos prises au microscope montrant l'effet Beilby.

La photo II.13 a montre un moulage époxy fait sur un sel meuble compacté et exposé à une humidité ambiante de 66% pendant 100 heures. L'empreinte laissé dans l'époxy par le sel permet de voir les points de cimentation qui s'étaient développés entre deux cristaux adjacents. Sur les photos II.13 b à d, on voit les particules de sel pour des expositions de 100 heures à différentes humidités relatives. Les faces des cristaux montrent des recristallisations lamellaires sur leurs faces. L'échantillon exposé à une humidité relative de 33% ne montre pas de cristallisation lamellaires. Ceci illustre l'importance de l'eau dans ce processus.

Un autre mécanisme de cimentation du sel meuble est la perte d'humidité lorsqu'il est exposé à une humidité ambiante inférieure au point critique. Le film d'eau saturée est attiré aux points de contact, suite à l'évaporation il y a précipitation de sel cimentant ainsi les particules en contact (Lowry et Hemmings, 1920; Kaufman, 1971; Whetstone, 1949; Shor et al., 1981).

Si le sel meuble est exposé à une humidité ambiante supérieure au point critique il y aura absorption d'eau

causant plutôt une dissolution des liens de cimentation. L'ajout d'eau au sel meuble aura le même effet. Cependant, si par la suite l'humidité ambiante descend sous le point critique, le processus de cimentation reprendra. L'exposition du sel meuble à des cycles de mouillage-séchage, comme pour les rejets de potasse en surface par exemple, causera la cimentation de la masse (Whetstone, 1949; Kaufman, 1971). Si l'humidité ambiante est proche du point critique, les variations de température peuvent causer des cycles de mouillage-séchage en faisant varier le point de déliquescence de la masse (Kaufman, 1971).

Dans tous les mécanismes discutés précédemment, la présence d'eau est postulée. Cette eau pouvant provenir de l'air ambiant, y avoir été ajoutée ou provenir d'inclusions liquides dans les particules. En effet, la présence d'eau est essentielle au développement de la cohésion dans le sel meuble. Des essais de compression confinée exécutés sur un sel meuble parfaitement sec ont montré qu'il était impossible de former un comprimé cohérent quelle que soit la pression exercée (Lowry et Hemmings, 1920). L'eau est donc l'agent indispensable au développement de la cimentation.

Shotton et Rees (1966) ont testé des échantillons de sel meuble en compression avec ajout d'eau préalable et sans ajout d'eau. La présence d'eau a pour effet de lubrifier les grains. Les comprimés formés avec ajout d'eau étaient moins

résistants que ceux formés sans ajouter d'eau. Ces résultats montrent que l'effet Beilby est un mécanisme important pour le développement de la cimentation.

Les figures II.14 et II.15 tirées des résultats expérimentaux de Lordi et Shiromani (1984) montrent le gain de résistance qui se développe dans les comprimés de halite et de sylvite exposés à différentes humidités ambiantes dans le temps. De ces courbes les observations suivantes peuvent être faites:

- si l'humidité ambiante est au dessus du point critique, il y a perte de résistance dans le temps. Ceci peut être attribué à la dissolution des liens de cimentation par l'apport d'eau;

- pour les comprimés exposés à une humidité ambiante inférieure au point critique, il y a un gain de résistance dans le temps;

- le gain maximum de résistance est observé pour les comprimés exposés à une humidité ambiante proche du point critique. Pour ces comprimés, la perte d'humidité est moins rapide. Les traces d'humidité sont donc disponibles plus longtemps pour permettre à la recristallisation (effet Beilby) de produire la cimentation.

Le même effet a été observé par Down et McMullen (1985), Lowry et Hemmings (1920), Lordi et Shiromani (1984), Shotton et Rees (1966).

Lowry et Hemmings (1920) ont observé que des échantillons compactés séchés à chaud (32 °C) avaient développé un gain de résistance plus important que ceux séchés à température ambiante. Ils concluent qu'à température plus élevée les cristaux avaient subi un changement d'état. La température serait donc un facteur influençant la cimentation.

Shotton et Ganderton (1961) ont observé les surfaces de rupture de comprimés de sel testés en tension. Les cassures passaient au travers des grains indiquant des liens de cimentation très résistants entre les particules.

II.1.7 - Conclusion

Les données expérimentales présentées indiquent que le sel meuble est un matériau qui peut développer de la cohésion et de la friction interne. Les particules de sel sont déformables plastiquement. Les conditions ambiantes (humidité, température) affectent le comportement mécanique du sel meuble. La présence d'eau influencera fortement le comportement mécanique du sel meuble. L'étude des propriétés mécaniques du sel meuble doit donc tenir compte de ces facteurs.

II.2 - Propriétés mécaniques à court terme

Cette section porte sur le comportement à court terme du sel meuble. Par court terme, il est entendu le comportement mécanique sans tenir compte de la réponse différée du matériau. La réponse différée et les paramètres de fluage du sel meuble seront discutés dans la section II.3.

II.2.1 - Densité et caractéristiques de compactage

La porosité initiale est un facteur important vis-à-vis le comportement mécanique du sel meuble (Pfeifle et al., 1987). Il est donc important d'examiner les propriétés de compactage du sel meuble. Le tableau 6 donne des valeurs de différents paramètres relatifs à la densité des rejets de potasse ou du sel meuble par divers auteurs (Withiam et al., 1984; IT Corporation, 1984; Miller, 1983; Pufahl et Yoshida, 1982; Pufahl et al., 1983).

TABLEAU 6: Paramètres de densité du sel meuble

- densité des grains	2,16 à 2,18
- teneur en eau initiale	2,0 à 8,0 %
- densité en vrac	1,51 à 1,64
- densité sèche minimum	0,94 à 1,30
- densité sèche maximum	1,35 à 1,65
- densité humide maximum	1,76
- quantité d'insolubles	1,0 à 10,0 %

Les caractéristiques de compactage du sel meuble ont été déterminées par les essais de compactage conventionnels. Withiam et al. (1984), IT Corporation (1984) ont utilisé l'essai Proctor standard et 1/5 Proctor (5 coups par couche au lieu de 25). Pufahl et Yoshida (1982) ont utilisé l'essai Proctor standard et Proctor modifié.

La figure II.16 montre la densité de compactage à sec obtenue en fonction de l'énergie utilisée. Même avec une énergie de compactage minimum (1/5 Proctor), la densité obtenue est près de la densité maximum à sec. Une augmentation de l'énergie n'augmente la densité que dans une proportion relativement faible (Withiam et al., 1984). La densité ainsi obtenue à sec est proche de celle obtenue par Pufahl et Yoshida (1982) pour un compactage avec eau. Le gain de densité obtenu par l'ajout d'eau ne semble pas être suffisant pour contrebalancer l'inconvénient d'introduire de l'eau dans la mine de sel ou de potasse.

Sur la figure II.17, une courbe de compactage typique pour un sel meuble contenant 1.2% d'insolubles est présentée. L'eau a pour effet de lubrifier les grains et de faciliter la densification permettant ainsi d'obtenir une plus forte densité (Pufahl et Yoshida, 1982). Il n'y a pas de teneur en eau optimum. La divergence observée entre les deux courbes est due à la correction nécessaire après compactage suite à la perte d'eau qui se produit dans l'échantillon lors de la

densification.

La présence d'insolubles en quantité significative affecte considérablement la courbe de compactage du sel meuble. La perte d'eau en cours de compactage est réduite et il apparaît une teneur en eau optimum. La figure II.18 montre une courbe de compactage du sel meuble avec ajout de 10% d'insolubles d'après Pufahl et Yoshida (1982). Cette figure montre que la courbe de compactage a une forme complètement différente. La teneur en insolubles est un paramètre très important vis-à-vis des caractéristiques de compactage du sel meuble. Ce facteur est d'autant important pour notre étude que certains rejets de sel ou de potasse peuvent contenir jusqu'à 30% d'insolubles.

Il reste à voir cependant si pour le compactage à sec les insolubles ont un effet aussi important. En effet, il est indésirable d'introduire de l'eau dans une mine de sel. Les résultats de Withiam et al. (1984) montrent qu'il est possible d'obtenir une densité satisfaisante sans eau. Le compactage à sec est donc envisagé préférentiellement pour le remblai de mine.

La figure II.19 montre la relation de l'indice des vides en fonction du poids volumique pour le sel meuble étudié par Liedtke et Bleich (1985). A la mine d'Asse en Allemagne, un projet de recherche à grande échelle est en cours sur le remblayage des excavations avec du sel meuble. Une chambre est remblayée et le remblai instrumenté. Le sel meuble est mis en

place par gravité sans être compacté. La figure II.20 montre les résultats d'un essai de pénétration standard dans le remblai une fois la chambre remblayée sur une hauteur de 6,0 m. Ces résultats montrent que si le remblai n'est pas compacté lors de la mise en place la densité obtenue est relativement faible. Pour obtenir une bonne densité il est nécessaire de recourir à des techniques de compactage lors de la mise en place.

II.2.2 - Compressibilité du sel meuble

Par la compressibilité du sel meuble, il est entendue la variation de volume à forme constante produite par un changement quelconque de la contrainte moyenne. La dilatance se définit comme la variation de volume positive ou négative produite par la variation du déviateur de contrainte sans que la composante sphérique du tenseur de contrainte ne soit modifiée (Ladanyi, 1961). Dans le cadre des recherches pour l'enfouissement des déchets nucléaires, des essais de compression confinée et de compression hydrostatique ont été faits pour différentes conditions. Ces données expérimentales permettent de caractériser la compressibilité du sel meuble.

II.2.2.1 - Compression hydrostatique

Des essais de compression hydrostatique avec chargement quasi statique ont été faits par Stinebaugh (1979), Holcomb et Hannum (1982). L'échantillon de sel meuble est placé dans une membrane de plastique à une densité initiale donnée. La charge est appliquée en plaçant l'échantillon dans une cellule remplie d'huile. La pression d'huile est augmentée et applique une contrainte hydrostatique sur l'échantillon. C'est donc un essai de compression isotrope qui permet de mesurer les variations de volume à forme constante. Un essai typique dure 6 minutes pour une charge maximum de 22 MPa (Holcomb et Hannum, 1982). La granulométrie du sel meuble est présentée à la section II.1.4. Les essais portent sur une plage de température variant de 21 à 100 °C et une porosité initiale variant entre 36 et 44%. La porosité finale maximum est de l'ordre de 12%.

Sur la figure II.21 sont représentées des courbes contrainte-déformation pour des essais de compression hydrostatique à différentes températures. L'effet de la température est faible, cependant il semble y avoir une transition à la température de 60°C. Du point de vue pratique l'effet de la température, pour les conditions ambiantes, est marginal sur la compressibilité du sel meuble à court terme. Holcomb et Hannum (1982) considèrent que l'augmentation de la

température rend les grains de sel plus plastiques ce qui amène un accroissement plus rapide des surfaces de contact entre les grains. Les forces de contact diminuent et contrebalancent ainsi l'effet de la température.

Un essai avec cycles de chargement et déchargement est présenté à la figure II.22. Cette courbe montre qu'il n'y a qu'une faible composante élastique à la déformation volumétrique du sel meuble. Lors du déchargement, on observe un processus essentiellement élastique avec très peu de déformation récupérée. La figure II.23 montre un agrandissement à plus petite échelle d'un cycle. Le rechargement retourne au seuil précédent avec une faible boucle d'hystérésis. La déformation du sel meuble est essentiellement un processus plastique avec écrouissage (Holcomb et Hannum, 1982).

La figure II.24 montre la variation du module de compressibilité K en fonction de la charge appliquée calculée sur la courbe de rechargement. Il y a un accroissement linéaire du module en fonction de la contrainte moyenne (Holcomb et Hannum, 1982).

La figure II.25 montre la variation du module de compressibilité en fonction de la porosité. Cette figure résume les résultats de plusieurs auteurs. Le module K augmente avec la densité du matériau et l'effet de la température n'est pas très marqué. Ces valeurs couvrent une

plage de chargement variant de 1,7 à 22 MPa. Les valeurs représentées par les points noirs sont calculées sur la courbe de rechargement des essais de Holcomb et Hannum (1982) alors que les autres valeurs sont calculées sur la courbe de chargement vierge. Les valeurs associées aux rechargements sont supérieures à celles déduites du chargement vierge. Cette différence suggère que le matériau montre de l'écrouissage et que les mécanismes de déformation sont irréversibles (IT Corporation, 1984).

Le sel meuble a un comportement mécanique qui est dépendant de l'historique de contrainte. Le cheminement de contrainte est important dans l'analyse de ce matériau (IT Corporation, 1984). Pour le sel gemme l'effet de la température est important. Dans le cas du sel meuble cet effet est plus modeste en ce qui a trait à l'essai de compression hydrostatique à court terme (Hansen, 1976).

La figure II.26 tirée de Pfeifle et al. (1987) résume l'effet de la température, de la présence d'eau et du coefficient d'uniformité sur la compressibilité du sel meuble. L'eau et l'accroissement de la température augmentent la compressibilité. Comme dans les sols, une granulométrie plus uniforme montre une plus grande compressibilité qu'une granulométrie plus étalée. Les données expérimentales de Pfeifle et al sont trop limitées cependant pour pouvoir caractériser ces effets avec plus de précision.

II.2.2.2 - Compression confinée

Cet essai consiste à placer l'échantillon dans un cylindre rigide à une densité initiale donnée. La charge est appliquée par le plateau supérieur, la déformation latérale étant restreinte par le cylindre de confinement. C'est donc un essai de compression à déformation uniaxiale. Dans cette section, seulement les cas de chargement rapide seront examinés.

Cet essai est difficilement interprétable car la friction sur les parois est importante et le champ de contrainte dans l'échantillon n'est pas homogène. De plus, l'évolution des contraintes latérales sur l'échantillon n'est pas connue. L'effet de la friction sur les parois du cylindre est d'autant plus important que les cylindres utilisés sont longs par rapport au diamètre, l'élancement variant de 1 à 2 (Miller, 1983; Miller, 1980; Shor et al., 1981; Hansen et al., 1976). Shor et al. (1981) ont observé que la porosité, en cours de chargement, ne variait pas de façon uniforme le long de la hauteur de l'échantillon indiquant ainsi un champ de contrainte non uniforme dans l'échantillon.

La figure II.27 montre des courbes de contrainte-déformation pour trois essais de compression confinée à densité initiale croissante. Plus la densité initiale est grande plus le matériau est raide. Cependant, quelle que soit

la densité initiale, la densité finale obtenue est la même pour une même charge. Il est donc avantageux d'avoir la densité initiale maximum car la capacité portante du remblai de sel meuble va se développer plus rapidement (Miller, 1980; Pufahl et Yoshida, 1982) et montrera une déformation totale moindre, d'où des tassements moins importants (Kappei et Gessler, 1984).

La figure II.28 montre un essai avec cycles de chargement et déchargement. Ces résultats confirment les observations faites pour l'essai de compression hydrostatique. L'historique de contrainte est important et le sel meuble développe un seuil suite au chargement (Liedtke et Bleich, 1985).

Hansen (1976) a examiné l'effet de la température sur la courbe contrainte-déformation dans l'essai de compression confinée (Figure II.29). Ces courbes montrent que l'effet de la température est faible. Miller (1983) a étudié l'effet de l'eau sur le sel meuble. L'eau augmente la compressibilité du sel meuble et réduit la raideur du matériau en lubrifiant les grains. Les figures II.30 et II.31 montrent la variation du module de compressibilité sécant en fonction de la charge pour un essai de compression confinée à taux de déformation contrôlé. Sur la figure II.30, l'échantillon est sec et sur la figure II.31, l'échantillon a une teneur en eau de 8% (Liedtke et Bleich, 1985). Le module K augmente linéairement avec la

charge. L'eau a pour effet d'abaisser la valeur du module de compressibilité.

La figure II.32 montre la variation du module K pour un essai semblable à celui de la figure II.30 mais à taux de déformation plus lent. La vitesse de déformation a un effet très marqué sur la raideur du sel meuble. Ceci indique que le sel meuble a un comportement visqueux. Il faut donc tenir compte des vitesses de chargement ou de déformation dans l'élaboration d'une loi de comportement du sel meuble. Le module de compressibilité du sel meuble est dépendant de l'état de contrainte et de la vitesse de déformation, la présence d'eau abaisse sa valeur (Liedtke et Bleich, 1985).

Kelsall et al. (1985) proposent une loi empirique pour représenter la courbe de contrainte-déformation en compression hydrostatique ou confinée. Sur la figure II.33 sont illustrés les résultats de Hansen (1976) et de Ratigan et Wagner (1978) par deux courbes-enveloppes. La courbe plus foncée est la relation proposée par Kelsall et al. (1985):

$$\sigma_m = A [\exp(B \epsilon_v) - 1], \quad [\text{II.4}]$$

où σ_m représente la contrainte moyenne, ϵ_v la déformation volumétrique, A et B des constantes expérimentales. Pour la courbe tracée les valeurs suivantes sont utilisées:

$$A = 0.5116 \text{ MPa},$$

$$B = 18.734 \text{ mm}^3/\text{mm}^3.$$

En dérivant cette relation pour la déformation finale

et considérant qu'une déformation constante est atteinte après consolidation complète (à densité équivalente du sel gemme), la relation suivante est obtenue entre le module de compressibilité tangent et la déformation volumétrique totale:

$$K_T = A B \exp(B \epsilon_v) \quad \text{pour } \epsilon_v < \epsilon_c, \quad [\text{II.5a}]$$

$$K_T = K_I \quad \text{pour } \epsilon_v = \epsilon_c. \quad [\text{II.5b}]$$

où K_I est le module de compressibilité du sel gemme, ϵ_c est la déformation totale nécessaire pour atteindre la densité du sel intact et K_T est le module tangent de compressibilité du sel meuble consolidé.

II.2.2.3 - Perméabilité du sel meuble

Shor et al. (1981) ont étudié la perméabilité du sel meuble en fonction de l'indice des vides pour l'eau saturée en sel. La perméabilité était mesurée à différents stades lors d'essais de compression confinée. La figure II.34 montre la perméabilité en fonction de l'indice des vides. Sur ce graphique, la ligne en trait plein représente la relation empirique proposée par Shor et al et la ligne en pointillé, la relation de Kozeny-Carman (Freeze et Cherry, 1979). Les points représentent les résultats expérimentaux. La relation de Shor et al., est la suivante:

$$\ln P_m(t) / Z^2 = 21 + 6 \ln \bar{\epsilon}(t), \quad [\text{II.6}]$$

où $P_m(t)$ est la perméabilité en Darcy au temps t

(g.cm⁻¹min.⁻¹.Bar⁻¹), Z^2 , le diamètre initial moyen des particules de sel et $\phi(t)$, l'indice des vides au temps t .

La relation de Kozeny-Carman permet de prédire la perméabilité du sable. En prenant une densité de solution saturée de sel, à température de la pièce, de 1,205 avec une viscosité de 1,27 cP la perméabilité prédite par Kozeny-Carman est:

$$P_m(t) = 2,72 \times 10^7 Z^2 \phi(t)^3 / (1 - \phi(t)). \quad [\text{II.7}]$$

Cette équation est représentée par la ligne pointillée sur la figure II.34. Cette relation surestime la perméabilité du sel meuble. La perméabilité du sel meuble décroît plus rapidement avec l'indice des vides que le prédit la relation de Kozeny-Carman. Selon Shor et al. (1981) la cimentation des grains serait la cause de cette différence par rapport aux sables. Pour justifier cette déduction, il faut admettre que la relation de Kozeny-Carman est exacte, ce qui est loin de la réalité. Cette relation empirique est très approximatives et plusieurs facteurs indéterminés peuvent jouer, dans le cas du sel meuble, autres que la cimentation. D'après leur relation avec un indice des vides de 0.02 et un diamètre moyen des particules de 100 μ m la perméabilité sera de 0,2 μ Darcy. Cette perméabilité est comparable à la perméabilité du sel gemme intact. Dans certaines conditions de consolidation cette perméabilité peut être atteinte en une semaine (Shor et al., 1981).

II.2.3 - Résistance au cisaillement

Cette section couvre le comportement du sel meuble à court terme sous contraintes déviatoriques. Les résultats présentés proviennent d'essais de compression uniaxiale et triaxiale et d'essais de cisaillement direct.

II.2.3.1 - Essais de compression

Les échantillons testés sont de forme cylindrique avec un élanement de deux. Le sel meuble est d'abord comprimé par un essai de compression confinée (section II.2.2.2) à une densité prédéterminée. Ensuite l'échantillon est extrudé du cylindre de confinement et rectifié pour le préparer pour les essais de compression. Dans cette partie seront discutés les essais à chargement jusqu'à rupture sans que le facteur temps n'intervienne.

Pufahl et Yoshida (1982) ont préparé les échantillons avec une teneur en eau variant de 6 à 7%. Une fois les échantillons moulés à une densité donnée ils sont laissés en curage. Ils sont ensuite testés à une teneur en eau donnée. La perte d'humidité a pour effet de provoquer la cimentation des échantillons à divers degrés selon les conditions et les temps de curage. La figure II.35 montre la variation de la

résistance à la rupture en compression uniaxiale à taux de déformation contrôlé en fonction de la teneur en eau après curage. Ces résultats montrent que la résistance augmente avec la cimentation des grains. De plus, les échantillons moulés à plus grande densité développent une plus grande résistance à la rupture avec la cimentation.

La figure II.36 montre la relation entre la résistance à la rupture avec la teneur en eau initiale de moulage et la teneur en eau finale au moment de l'essai. Il n'y a pas de relation avec la teneur en eau initiale mais il y a une relation évidente avec la teneur en eau finale au moment de l'essai. Ces résultats permettent de mettre en évidence l'importance de la cimentation par rapport à la résistance à la rupture du sel meuble.

La forme de la courbe contrainte-déformation est fortement influencée par le degré de cimentation du sel meuble. La figure II.37 montre les courbes contrainte-déformation pour trois degrés de cimentation différents. Le sel meuble passe d'un comportement ductile à un comportement fragile. L'augmentation de la cimentation augmente la raideur et la résistance à la rupture du sel meuble. L'allure de ces courbes est typique d'un sable dense pour le sel meuble faiblement cimenté et d'un solide fragile pour le sel meuble fortement cimenté.

Wagner (1980) a étudié la résistance à la rupture en

compression uniaxiale pour le sel meuble moulé à sec. La figure II.38 montre ses résultats. A faible porosité, le sel meuble atteint des résistances comparables au sel gemme. Les résultats expérimentaux suivent de près une relation empirique développée pour les céramiques (Kingery et al., 1976). En se densifiant et en se cimentant, le sel meuble montre un comportement semblable à un solide poreux plutôt qu'à un matériau pulvérulent (IT Corporation, 1984).

Sur la figure II.39 sont présentées les courbes contrainte-déformation en compression uniaxiale pour le sel meuble à différentes densités initiales (Liedtke et Bleich, 1985). Cette figure montre que la résistance au pic augmente avec la densité initiale. A plus grande densité le degré de cimentation peut être plus important contribuant ainsi à l'augmentation de résistance.

Les seuls résultats expérimentaux disponibles, pour les essais de compression triaxiale, proviennent des travaux de Pufahl et Yoshida (1982) et principalement de Liedtke et Bleich (1985).

Liedtke et Bleich ont formé leurs échantillons en ajoutant 3% d'eau au sel meuble et en le comprimant jusqu'à densité donnée par un essai de compression confinée. Les essais sont faits à température ambiante de la pièce. La teneur en eau avant et après essai n'a pas été contrôlée. La déformation axiale était mesurée mais aucune mesure n'a été

faite pour les variations de volume. Les échantillons sont de forme cylindrique avec un diamètre de 52 cm pour une longueur de 102 cm. Les essais triaxiaux sont des essais en contraintes effectives (échantillon non saturé) avec consolidation isotrope pour atteindre la contrainte de confinement désirée. L'essai est fait en gardant la pression de confinement constante et en augmentant la contrainte axiale. Tous les essais sont faits à taux de déformation contrôlé.

Les figures II.39 à II.41 inclusivement montrent les courbes contrainte-déformation pour le sel meuble en compression uniaxiale et triaxiale obtenues par Liedtke et Bleich (1985). Ces figures permettent de voir l'effet de la densité initiale de l'échantillon et de la contrainte de confinement sur le comportement mécanique du sel meuble. La déformation correspondant à la résistance au pic ($\sigma_1 - \sigma_3$) augmente avec la contrainte de confinement:

$$\sigma_3 = 0 \text{ MPa} \quad \epsilon_1 = 0,01 \text{ à } 0,015 ,$$

$$\sigma_3 = 5 \text{ MPa} \quad \epsilon_1 = 0,08 \text{ à } 0,12 ,$$

$$\sigma_3 = 10 \text{ MPa}, \quad \epsilon_1 \geq 0,20 .$$

La résistance au pic et la raideur du sel meuble augmentent avec la densité initiale. La résistance au pic augmente avec la contrainte de confinement, ce qui est typique d'un matériau développant de la friction interne. Le sel meuble montre un comportement avec ramollissement, mais avec la contrainte de confinement de 10 MPa, il montre un

écrouissage. Ceci implique un changement dans les mécanismes de déformation du sel meuble à contraintes moyennes plus élevées. Il n'y a aucun renseignement disponible sur le comportement de dilatance du matériau. Mais il est probable qu'à contraintes moyennes élevées (10 MPa) il y ait cisaillement des grains plutôt que glissement inter-particules. Le matériau passerait d'un comportement dilatant à un matériau contractant.

L'effet de la vitesse de déformation est illustré sur les figures II.42 et II.43. La relation entre l'indice des vides et la résistance au pic est montrée pour différentes pressions de confinement. Sur la figure II.42, le taux de déformation est de 10^{-4} et sur la figure II.43, le taux de déformation est 10^{-6} . La résistance au pic augmente avec la densité initiale et la pression de confinement. Mais, à vitesse de déformation plus lente, la résistance au pic diminue. Sur la figure II.42 sont aussi représentées les plages de résistance du sel gemme pour les mêmes conditions de chargement.

Pufahl et Yoshida (1982) ont effectué des essais triaxiaux sur le sel meuble. Les échantillons étaient préparés avec une teneur en eau de 6% et ensuite curés à 100 °C. Les essais sont à taux de déformation contrôlé mais la vitesse de déformation n'est pas spécifiée. Le tableau suivant résume les résultats de ces essais:

TABLEAU 7: Essais triaxiaux de Pufahl et Yoshida, 1982.

No.	ρ_d	ω_0	ω_f	σ_3	σ_1
1	1,63	6,3	--	586 KPa	7036 KPa
2	1,62	6,0	3,5	345 KPa	4453 KPa
3	1,63	6,0	2,5	827 KPa	8428 KPa

Le diagramme de Mohr déduit de ces résultats est représenté à la figure II.44. L'enveloppe de rupture pour un critère de Mohr-Coulomb a les paramètres suivants:

$$c' = 270 \text{ KPa},$$

$$\phi' = 53,4^\circ.$$

Kelsall et al. (1985) considèrent que le sel meuble atteint les propriétés du sel gemme intact pour des porosités inférieures à 6%. Liedtke et Bleich ont testé le sel meuble pour des porosités initiales de 3 à 20%. Donc les résultats de Liedtke et Bleich correspondent à un sel meuble très dense. Les résultats de Liedtke et Bleich (1985) montrent qu'à une contrainte de confinement de 10 MPa il y a changement de comportement. Sur la figure II.44b sont représentées les courbes-enveloppes, dans le diagramme de Mohr, pour le sel meuble testé par Liedtke et Bleich (1985). Ces courbes représentent la ligne tangente aux cercles de Mohr à la rupture pour les essais décrits par les figures II.42 et II.43. Ces résultats étant basés sur un nombre limité

d'essais, leur valeur est donc plutôt qualitative que quantitative. Nous pouvons observer que les courbes-enveloppes sont non-linéaires et qu'il y a relèvement des courbes avec la diminution de l'indice des vides initiale. Si les courbes pour les essais à taux de déformation plus lent (courbes en pointillé) sont comparées avec les courbes pour les essais à taux de déformation plus rapide nous remarquons qu'à faible niveau de contrainte ($< 5\text{MPa}$) le taux de déformation n'a pas d'effets. A plus grande contrainte, le taux de déformation a un effet marqué sur les courbes-enveloppes. Les courbes contrainte-déformation, présentées sur les figures II.40 et II.41, montrent qu'il y a un changement de comportement entre les pressions de confinement de 5 MPa et 10 MPa. Ce qui laisse supposer un point de transition sur la courbe-enveloppe à la rupture. Mais les données disponibles ne permettent pas de localiser ce point. Donc, les courbes-enveloppes représentées sur la figure II.44b ne sont pas conformes aux courbes réelles car elles sont tangentes aux trois cercles.

II.2.3.2 - Essais de cisaillement direct

Pufahl et Yoshida (1982) ont effectué des essais de cisaillement direct sur le sel meuble. Les échantillons étaient préparés avec une teneur en eau initiale de 6%. Les essais étaient exécutés selon les normes ASTM. La charge

normale était appliquée en un seul palier et l'échantillon était laissé en consolidation pour une durée de six jours. Les échantillons étaient ensuite cisailés. L'essai comportait six passes aller-retour du bloc de cisaillement. Ce mode opératoire permet l'obtention des valeurs résiduelles de friction interne du sel meuble.

La figure II.45 montre la courbe-enveloppe pour les résistances maximum et résiduelle. Les paramètres suivants sont tirés de ces résultats:

valeur au pic: $c' = 0$ et $\phi' = 57,5$,

valeur résiduelle: $c' = 0$ et $\phi' = 45,5$.

Ces auteurs interprètent ces résultats comme indiquant une cohésion nulle, d'où aucune cimentation. D'après les caractéristiques du sel meuble et le mode de préparation des échantillons que ces auteurs ont utilisé il est évident que de la cimentation s'est développée. L'angle de frottement déduit pour la résistance maximum représente en fait la rupture des liens de cimentation et non pas du frottement interne. Le critère de Mohr-Coulomb n'est pas idéal pour le sel meuble. Les deux paramètres c' et ϕ' ne sont pas suffisants pour décrire l'enveloppe de rupture du sel meuble. Les valeurs des angles de friction interne obtenues en cisaillement direct sont comparables à celles obtenues par Pufahl et Yoshida avec des essais triaxiaux. Les déformations verticales n'étaient pas mesurées par Pufahl et Yoshida, il est donc impossible de

caractériser la dilatance du sel meuble.

II.2.4 - Conclusions

Le sel meuble non cimenté, à court terme, présente un comportement semblable à un sable. Selon Scott (1963), Chen et Saleeb (1982) pour être classé comme un sol pulvérulent, un matériau ne doit pas développer une cohésion assez forte pour devenir un solide cohérent. Le sel meuble sans cimentation se comporte comme un sol pulvérulent. Mais avec la cimentation, il a un comportement fragile qui tient d'un solide. Butcher (1979) observe que le sel meuble dense ou cimenté se comporte comme un solide poreux.

Le sel meuble a un comportement contrainte-déformation non linéaire qui dépend de son passé mécanique et des vitesses de chargement ou de déformation. La température, la présence d'eau et la teneur en insolubles sont des paramètres qui affectent ses propriétés à court terme.

II.3 - Propriétés mécaniques à long terme

Dans cette section, les propriétés de fluage du sel meuble sont étudiées. Le fluage volumétrique est d'abord présenté et il est question ensuite du fluage sous contraintes déviatoriques.

II.3.1 - Compressibilité du sel meuble

Les résultats expérimentaux sur la compressibilité du sel meuble à long terme proviennent des études reliées aux recherches sur l'enfouissement des déchets nucléaires dans les massifs de sel. Le sel meuble a été testé en compression hydrostatique et en compression confinée pour diverses conditions de température et d'humidité.

II.3.1.1 - Fluage en compression hydrostatique

La préparation des échantillons est faite selon la même méthodologie que celle décrite à la section II.2.2.1. La charge est appliquée par paliers ou en une seule étape. Les déformations différées sont enregistrées pour des durées d'essais variables (Case et al., 1987).

Pfeifle et al. (1987) ont étudié le sel meuble en compression hydrostatique. Ils ont étudié l'effet de la granulométrie, de la teneur en eau et de la température sur la compressibilité du sel meuble à long terme. Le programme expérimental consistait en quatre essais pour des durées maximum de 1×10^6 secondes. La figure II.46 montre les rhéogrammes obtenus. La présence d'eau et l'augmentation de la température augmentent la déformation instantanée et le taux

de fluage (Pfeifle et al., 1987; Case et al., 1987). Deux granulométries ont été étudiées, $C_u = 1$ et $C_u = 8$. Mais les résultats disponibles ne permettent pas d'isoler l'effet de la granulométrie (courbes granulométriques présentées à la section II.1.4). Il semble qu'une granulométrie plus uniforme entraîne un taux de fluage plus grand.

Les courbes de fluage présentées à la figure II.46 montrent que le fluage volumétrique du sel meuble est plutôt un phénomène à fluage primaire dominant. Pour les temps testés (2 mois), le taux de fluage est toujours décroissant. Il n'y a pas de fluage secondaire.

Case et al. (1987) ont testé un sel meuble avec des coefficients d'uniformité compris entre 5,6 et 15,2. Leur programme comprenait quatre essais dont un avec une teneur en eau de 2,3%. La présence d'eau augmente la déformation instantanée et le taux de fluage volumétrique du sel meuble. Mais le taux de fluage volumétrique est toujours décroissant pour la durée de temps testée.

Pour une porosité inférieure à 25%, le module de compressibilité des échantillons testés augmente rapidement. Les échantillons avec une granulométrie plus étalée montrent, lors des essais, un module de compressibilité plus grand (Case et al., 1987).

Les figures II.47 et II.48 illustrent la variation du taux de fluage volumétrique en fonction du logarithme du

temps. La figure II.47 présente les résultats pour tous les essais de Case et al. et la figure II.48 rapporte le taux pour les différents paliers de chargement d'un essai. L'application de la charge cause une déformation instantanée suivie d'un fluage à taux rapidement décroissant. Il n'y a pas de relation directe entre la pression de confinement et le taux de fluage (figure II.48). Un accroissement de pression qui a tendance à accélérer le fluage est contrebalancé par la réduction de porosité du sel meuble qui tend à réduire le taux de fluage (Case et al., 1987). L'examen des figures II.47 et II.48 montre qu'il y a une relation linéaire entre le taux de fluage avec le logarithme du temps.

La figure II.49, tirée de IT Corporation (1984) donne la variation du taux de fluage volumétrique du sel meuble par rapport au temps (diagramme log-log) pour différentes conditions de température. Ces courbes sont basées sur les résultats expérimentaux de Holcomb et Hannum (1982) et Ratigan et Wagner (1978). Ces données portent sur des essais de compression hydrostatique sur des échantillons secs. Un accroissement de température augmente le taux de fluage. Les résultats de Ratigan et Wagner (1978) présentés sur la figure II.49, montrent qu'une contrainte moyenne plus élevée augmente le taux de fluage (trait pointillé). La figure II.49 couvre une période de temps beaucoup plus longue que celle de la durée des essais (2 mois maximum); elle suppose que la

tendance observée peut être extrapolée pour des temps beaucoup plus long.

La relation linéaire existant entre le taux de fluage et le logarithme du temps permet de développer une relation reliant le taux de déformation au temps. IT Corporation (1984) ont utilisé la relation de Ratigan et Wagner (1978) et l'ont modifiée pour tenir compte de l'effet de la contrainte moyenne et de la température. Les droites tracées sur la figure II.49 représentent cette fonction:

$$\dot{\epsilon}_v = B t^b (I_1 / \sigma_0)^c (T / T_0)^d, \quad [\text{II.8}]$$

où, $\dot{\epsilon}_v$ est le taux de fluage volumétrique, t , le temps en secondes, T , la température en degrés, I_1 , le premier invariant de contrainte, b ($b < 1$), d , c , T_0 et σ_0 , des constantes.

Par la nature du processus de déformation, tant que le fluage continue, la structure du sel meuble varie au niveau microscopique. L'état de contrainte n'atteint jamais l'équilibre car les aires de contact entre les grains augmentent de façon continue, causant ainsi une décroissance des forces de contact inter-particules (Holcomb et Hannum, 1982). Ainsi, le taux de déformation volumétrique ira toujours en décroissant et tendra vers zéro (Pufahl et Yoshida, 1982).

II.3.1.2 - Fluage en compression confinée

Les essais de compression confinée sont effectués selon la même méthodologie que celle décrite à la section II.2.2.2. Ces essais sont difficilement interprétables car le rapport diamètre sur longueur des cylindres utilisés par les divers auteurs est trop petit (0,25 à 0,50): l'effet de la friction sur les parois du cylindre de confinement est important (IT Corporation, 1984). Ceci est confirmé par les observations (Shor et al., 1981) que le taux de déformation sous contrainte constante était plus faible lorsque la longueur du cylindre de confinement augmente à section constante. La friction sur les parois a pour effet de diminuer le niveau de contrainte subi réellement par l'échantillon (Hansen, 1976). Ces essais permettent tout de même une appréciation qualitative des propriétés de compressibilité du sel meuble à long terme. Les essais de Shor et al. (1981) et Liedtke et Bleich (1985) seront examinés.

Pufahl et Yoshida (1982) ont utilisé un anneau de confinement avec un diamètre huit fois supérieur à la hauteur. L'effet de friction sur les parois est donc minimisé. Cependant, afin de conserver une humidité constante, ils ont enveloppé la cellule oedométrique contenant les échantillons de coton imbibé d'eau. Cette pratique causait une dissolution d'une partie de l'échantillon. Les résultats

expérimentaux de ces auteurs ne sont donc pas interprétables.

Shor et al. (1981) ont étudié la consolidation du sel meuble sous diverses conditions. Les figures II.50 a et b montrent l'effet du niveau de contrainte et de la granulométrie sur le taux de consolidation du sel meuble saturé. Le taux de fluage du sel meuble en compression confinée à contrainte constante approche la linéarité avec le logarithme du temps.

Shor et al., considèrent que la pression appliquée et la granulométrie sont les facteurs dominant qui affectent le taux de fluage du sel meuble en compression confinée. Le taux de fluage volumétrique augmente avec l'accroissement de la contrainte appliquée et la diminution du diamètre des particules.

La figure II.51 montre l'effet de la température sur le taux de déformation du sel meuble saturé en eau, les autres facteurs demeurant constant. L'augmentation de la température fait croître le taux de déformation volumétrique mais son effet est relativement faible (Shor et al., 1981; Hansen, 1976). Les figures II.50 b et II.52 montrent que la granulométrie a un effet important sur le taux de déformation volumétrique différée du sel meuble.

Shor et al. (1981) ont examiné l'effet du fluide de saturation sur le comportement du sel meuble en compression confinée. La figure II.53 montre les courbes de consolidation

pour divers fluides. Le sel meuble sec montre le taux de consolidation le plus lent. Celui qui est saturé en eau montre le taux le plus rapide, le sel étant moins soluble dans les autres fluides. Selon Shor et al. (1981) l'eau n'a pas seulement un effet de lubrification des grains. La solubilité du sel meuble dans le fluide de saturation est un facteur important quant à son comportement mécanique. La solubilité aux points de contacts est accrue suite au niveau de contrainte plus élevé en ces points et la libération d'énergie par réduction de la surface spécifique due à la dissolution de certaines particules sont des facteurs importants dans le mécanisme de consolidation du sel meuble. Ces résultats expérimentaux suggèrent des phénomènes de croissance cristalline et d'agglomération des particules semblables à ceux rencontrés en céramique et en métallurgie des poudres. Ces phénomènes font intervenir des mécanismes de transfert d'ions entre les frontières cristallines des grains. Le principe dominant dans la consolidation du sel meuble, selon Shor et al., est la réduction de la surface spécifique totale du sel meuble. Le faible taux de déformation observé pour le sel meuble sec indiquerait que la déformation mécanique des particules n'est pas le facteur dominant entrant en jeu dans la consolidation pour le niveau de contrainte en jeu.

Liedtke et Bleich (1985) ont fait des essais de consolidation sur du sel meuble provenant de la mine d'Asse.

La granulométrie du sel utilisé est décrite à la section II.1.4. La figure II.54 montre la variation du taux de fluage volumétrique par rapport au temps pour différentes conditions d'essais. Ces résultats sont comparables à ceux de Shor et al. (1981). Le taux de fluage volumétrique varie linéairement avec le logarithme du temps. La même relation a été observée pour les essais de compression hydrostatique discutés à la section II.3.1.1. Pour les durées de tests (2 mois), le taux de fluage volumétrique est toujours décroissant avec le logarithme du temps.

II.3.2 - Lois de fluage volumétrique

Shor et al. (1981) proposent la formulation définie par l'équation II.9 (qui respecte la notation de Shor et al.) pour décrire la consolidation du sel meuble en compression confinée. Dans cette formulation, ils prennent en compte la température, la granulométrie, le niveau de contrainte et le fluide de saturation. L'équation proposée a été utilisée pour lisser les courbes des figures II.50 à II.53:

$$\xi(t) = \xi(0) - (A / B) \ln(1 + Bt / Z_0^3) , \quad [\text{II.9}]$$

où $\xi(t)$ est l'indice des vides au temps t , $\xi(0)$ est l'indice des vides initial, t , le temps en minutes, A et B , des constantes expérimentales tenant compte de la température et du fluide de saturation exprimées avec les unités appropriées,

Z_0 , le diamètre moyen des particules en centimètres.

Les constantes A et B sont déterminées par les relations suivantes:

$$A = [A_0(293) + A_1(293)\sigma] \exp[D(1/T - 1/293)], \quad [\text{II.10}]$$

$$B = B_0(293) \exp[D(1/T - 1/293)]. \quad [\text{II.11}]$$

La même dépendance avec la température est supposée pour les deux constantes. D est une constante expérimentale reliée à l'effet de la température, σ est la contrainte axiale appliquée et T la température en degrés Kelvin.

Ratigan et Wagner (1978) proposent la relation suivante pour représenter la variation du taux de déformation volumétrique du sel meuble en compression hydrostatique ou confinée:

$$\dot{\epsilon}_v = A \epsilon_v^{-m} [\sigma_m / \sigma_0]^n [T / T_0]^p, \quad [\text{II.12}]$$

où $\dot{\epsilon}_v$ est le taux de déformation volumétrique, ϵ_v est la déformation volumétrique finale maximum, σ_m , la contrainte moyenne, T, la température, σ_0 , une constante de normalisation de la contrainte moyenne, T_0 , une constante de normalisation de la température, A, une constante expérimentale (s^{-1}), m, n et p, des constantes expérimentales.

En intégrant par rapport au temps l'expression précédente, ils obtiennent une relation pour prédire la déformation du sel meuble dans le temps (cette relation est représentée à la figure II.49):

$$\epsilon_v = A' t^{m'} [\sigma_m / \sigma_0]^{n'} [T / T_0]^{p'}, \quad [\text{II.13}]$$

où les constantes expérimentales sont:

$$A' = [(m + 1) A]^{m'},$$

$$m' = 1 / (m + 1),$$

$$n' = n / (m + 1),$$

$$p' = p / (m + 1).$$

Le tableau suivant donne les valeurs de ces paramètres pour un sel de Avery Island broyé et testé hydrostatiquement ainsi que pour un sel industriel testé en compression confinée:

TABLEAU 8: Valeurs des paramètres expérimentaux.

<u>Paramètres</u>	<u>Avery</u>	<u>Industriel</u>
A'	0,00292	0,00452
m'	0,221	0,265
n'	0,793	0,439
p'	1,074	1,070

La différence entre les valeurs des constantes A' et n' est prévisible car elle reflète les variations entre la granulométrie, l'indice des vides initiale du sel meuble testé et la méthode expérimentale différente entre les deux groupes d'essais. En considération de ces facteurs il est difficile de comparer ces deux groupes d'essais. Les autres constantes

sont plus représentatives des mécanismes de consolidation et donc ne varient pas tellement entre les deux types de sel testés (Ratigan et Wagner, 1978). La constante n' est reliée à la pression, m' au temps et p' à la température. Ces résultats s'appliquent pour une plage de chargement de 14 MPa maximum.

Holcomb et Hannum (1982) présentent une formulation empirique pour modéliser la consolidation du sel meuble sec en compression hydrostatique. La courbe de la figure II.55 représente le résultat d'un essai (trait plein) et la relation lissée est montrée en trait pointillé. La relation proposée a la forme suivante:

$$\delta V / V_0 = a[\log(t) - b] + c, \quad [\text{II.14a}]$$

$$\text{avec: } c = (1 - \rho_0) / \rho_c, \quad [\text{II.14b}]$$

où a est une constante tenant compte de la température, t , le temps en secondes, b , le logarithme du temps nécessaire pour appliquer la pression P , ρ_0 , la densité initiale du sel meuble, ρ_c , la densification quasi instantanée due à l'application de la charge et $\delta V / V_0$, la variation de volume du sel meuble.

Dans la relation de Holcomb et Hannum (1982) l'effet de la charge appliquée est prise en compte indirectement par les paramètres c et b . La figure II.56 montre la relation de la constante a avec la température. Cette relation est linéaire, la constante a croissant avec la température indépendamment de la charge appliquée. Cette constante est donc une propriété

intrinsèque du sel meuble (Holcomb et Hannum, 1982).

En dérivant cette relation par rapport au temps, on obtient une relation décrivant la variation du taux de déformation volumétrique dans le temps:

$$\dot{\epsilon}_v = 0,434 \, a / t, \quad [\text{II.15}]$$

où $\dot{\epsilon}_v$ est le taux de déformation, t le temps en secondes, 0,434 un facteur de conversion du logarithme de la base 10 à la base naturelle.

La relation de Holcomb et Hannum (1982) s'applique pour les échantillons à sec et ne tient pas compte explicitement du niveau de contrainte et de la température dans sa forme actuelle. Cependant, l'effet de la température pourrait être introduit dans l'équation II.14a en utilisant la figure II.56:

$$a = a_0 + b'T, \quad [\text{II.16}]$$

où a_0 est l'ordonnée à l'origine et b' , la pente de la droite.

Liedtke et Bleich (1985) proposent l'équation II.17a pour modéliser leur essai de compression confinée à long terme. La durée maximum de leurs essais est de 77 jours. Le terme de compression se subdivise en une composante dépendante de la contrainte et une composante dépendante du temps:

$$\epsilon_v(t) = \sigma_1 / K_s + \int_{0.01}^t \dot{\epsilon}_k dt, \quad [\text{II.17a}]$$

$$\text{où} \quad K_s = K_0 + a_0 s \sigma_1, \quad [\text{II.17b}]$$

$$\text{et} \quad \dot{\epsilon}_k = a_1 t^{-a_2}, \quad [\text{II.17c}]$$

où σ_1 est la contrainte axiale (MPa), K_0 , le module de déformation volumétrique sécant initial, t , le temps en jours, $\dot{\epsilon}_k$, le taux de déformation dépendant du temps, K_s , le module volumétrique sécant à la contrainte σ_1 , a_{0s} , a_1 , a_2 , des paramètres structuraux déterminés expérimentalement.

Dans cette formulation l'écroutissement de l'échantillon est pris en compte par la valeur de K_s . Les valeurs des paramètres expérimentaux obtenus par Liedtke et Bleich (1985) sont:

TABLEAU 9: Paramètres de l'équation [II.17].

K_0	= 19 à 126 MPa,
a_{0s}	= 2,0 à 5,0 ,
a_1	= 0,007 à 0,014 ,
a_2	= 0,92 à 1,01 .

Cette formulation tient compte de la réponse instantanée et retardée du sel meuble en compression confinée. Les effets de la granulométrie, de la température et de la présence d'eau sont pris en compte implicitement par les constantes expérimentales. Mais cette approche ne permet pas de tenir compte de changements dans ces conditions en cours d'essai.

Korthaus (1984) propose une loi de consolidation pour le sel meuble en compression confinée dont la formulation

mathématique permet de représenter la déformation volumétrique du sel meuble à long terme. Elle se subdivise en trois composantes:

- déformation instantanée ϵ_p ,
- taux de fluage transitoire $\dot{\epsilon}_{tr}$,
- taux de fluage à long terme $\dot{\epsilon}_{svm}$.

Pour Korthaus, le fluage transitoire est en fait la réponse différée du sel meuble à faible densité alors que le terme appelé fluage à long terme ne devient significatif qu'à plus grande densité lorsque le comportement du sel meuble s'approche plus d'un solide poreux.

La première composante ϵ_p représente la déformation subie dans les premières 100 secondes suivant le chargement:

$$\epsilon_p = c_1 \log(P / c_2 + 1), \quad [\text{II.18}]$$

où P est la pression appliquée, c_1 et c_2 sont des constantes expérimentales. La seconde composante $\dot{\epsilon}_{tr}$ représente la composante de fluage pour des temps inférieurs à 100 jours:

$$\dot{\epsilon}_{tr} = c_3 P c_4 (n_0 - \epsilon_v) c_5 / (\epsilon_v - \epsilon_p(P) + c_6) c_7, \quad [\text{II.19}]$$

où n_0 est la porosité initiale, ϵ_v , la déformation volumétrique totale et c_3 à c_7 , des constantes expérimentales.

La troisième composante $\dot{\epsilon}_{svm}$ est le modèle développé par Butcher (1980) pour le modèle d'un solide poreux à cavités sphériques. Selon Butcher la déformation de fluage est due seulement au fluage secondaire de la matrice de sel. Ce modèle entre en jeu seulement une fois que la densité est suffisante

pour que les vides approchent la forme sphérique et que le sel meuble ait une certaine continuité structurale. Butcher considère ce modèle avantageux car il est relié aux propriétés du sel même et non pas à l'ensemble structural du sel meuble:

$$\dot{\epsilon}_{svm} = \frac{3}{2} A n \left[\frac{n_0 - 1}{n - 1} \right] e^{-Q/RT} \left[\frac{1,5}{m} \cdot \frac{P}{1 - n^{1/m}} \right]^m, \text{ [II.20]}$$

où n_0 est la porosité initiale et n , la porosité au temps t . A , Q , R , T et m sont les paramètres de la fonction d'Arrhénius décrivant le fluage secondaire du sel gemme. Korthaus utilise les valeurs suivantes:

TABLERAU 10: Paramètres de l'équation d'Arrhénius.

$A = 0,18 \text{ MPa}^5 / \text{jour},$

$Q = 54,29 \text{ KJ} / \text{mole},$

$R = 0,08314 \text{ KJ} / \text{mole} / \text{K}^\circ,$

$m = 5 ,$

$T = \text{température}.$

Le taux de déformation totale du sel meuble est obtenu en sommant les deux termes $\dot{\epsilon}_{tr}$ et $\dot{\epsilon}_{svm}$. La déformation est donnée par l'expression suivante:

$$\epsilon_{VT}(t) = \epsilon_P + \int_{100s}^t \dot{\epsilon}_{tr} + \dot{\epsilon}_{svm} dt. \quad \text{ [II.21]}$$

Korthaus (1984) considère ce modèle avantageux car il évite d'extrapoler des résultats expérimentaux du sel meuble

sur des temps courts pour prédire le fluage sur de très longues périodes. Le modèle de Butcher est basé sur les propriétés du sel gemme qu'il considère mieux connues.

II.3.3 - Fluage sous contraintes déviatoriques

Les données expérimentales sur le fluage du sel meuble sous contraintes déviatoriques sont très limitées. Les seules données disponibles proviennent de Pufahl et Yoshida (1982). Ces auteurs ont effectué deux essais de fluage en compression triaxiale et 16 essais de fluage en compression uniaxiale. Les résultats de ces essais font l'objet de la discussion de cette section.

II.3.3.1 - Fluage en compression uniaxiale

Les éprouvettes utilisées pour ces essais avaient une forme cylindrique avec un élanement de 2. Le sel meuble a été comprimé par un essai de compression confinée à une densité de 1,40 à 1,65 avec une teneur en eau de 4 à 6%. Un premier groupe d'éprouvettes a été mis au curage à 100°C pendant 24 heures. L'autre groupe a été laissé en curage à l'air libre à 27°C pendant 4 ou 7 jours. Ces curages ont eu pour effet de permettre la cimentation du sel meuble.

Une fois l'échantillon curé, une charge axiale

constante prédéterminée a été appliquée rapidement et les déformations axiales seulement ont été enregistrées dans le temps. La figure II.57 montre une courbe de fluage obtenue pour un de ces essais. On peut y voir une déformation instantanée suivie d'un fluage à taux décroissant. Puis apparaît un fluage à taux accéléré jusqu'à rupture.

Le tableau 12 résume les résultats expérimentaux des essais de fluage à un seul palier:

TABLEAU 11: Essais de fluage en compression uniaxiale (chargement à un seul palier).

Teneur en eau (%) initiale	Teneur en eau (%) finale	Densité sèche	σ_1 KPa	ϵ_f %	t_f min.	Curage °C
5,87	2,08	1,62	505	1,53	390	27
6,00	3,67	1,62	505	2,23	158	27
4,89	1,47	1,64	505	1,92	1824	27
5,91	2,68	1,62	505	1,32	385	27
6,74	3,33	1,64	505	2,51	240	27
6,77	3,19	1,63	505	2,86	480	27
6,00	-	1,58	505	2,10	50000	100
6,00	-	1,58	750	2,20	20000	100
6,00	-	1,57	750	2,40	10500	100
6,00	-	1,58	750	2,30	9500	100
6,00	-	1,58	750	2,90	3000	100
6,00	-	1,58	505	1,20	7000	100

La teneur en eau finale pour les échantillons curés au four n'est pas fournie par Pufahl et Yoshida. L'examen des valeurs dans ce tableau montre que la cimentation augmente la résistance à la rupture différée du sel meuble (creep strength). Pour les échantillons séchés au four, l'intervalle

de temps pour arriver à la rupture est beaucoup plus long. La cimentation décroît le taux de fluage du sel meuble et augmente sa résistance à long terme. Le degré de cimentation est donc un paramètre important pour le fluage du sel meuble sous contrainte déviatorique.

Les figures II.58 à II.61 montrent les courbes de fluage obtenues pour les 4 essais de compression uniaxiale avec chargement par paliers, effectués par Pufahl et Yoshida, 1982. Les échantillons ont été compactés à une densité de 1,50 avec une teneur en eau de 6%. Le curage a été fait à l'air libre pour une période de 24 heures. Chaque palier a été appliqué jusqu'à ce que le taux de déformation soit nulle ou pour une durée maximum de 10000 minutes.

L'examen de ces figures montre que la majeure partie de la déformation se produit pour le premier incrément de charge. Les paliers subséquents ne produisent qu'une faible déformation. Pour le dernier palier, il y a une augmentation de la vitesse de déformation menant à la rupture. Selon Pufahl et Yoshida la déformation au cours du premier palier de charge se poursuit jusqu'à ce qu'un gain de résistance suffisant se développe dans l'échantillon par cimentation, cette cimentation serait due à la perte d'humidité dans l'air par l'échantillon. Les chargements subséquents ne déforment que peu l'échantillon jusqu'à ce que la résistance à la rupture de la structure du sel meuble soit atteinte. Dans un essai à long

terme, l'évolution de la cimentation dans l'échantillon ne peut être ignorée.

Les échantillons testés avec un seul palier de chargement avaient une limite de résistance de 505 à 750 kPa alors que ceux testés par paliers montrent des résistances de l'ordre de 1500 kPa et plus. La présence de 5% et 10% d'insolubles respectivement dans deux échantillons n'a pas affecté significativement le comportement du sel meuble.

II.3.3.2 - Fluage en compression triaxiale

Seulement deux essais de fluage en compression triaxiale ont été effectués par Pufahl et Yoshida (1982). La préparation des éprouvettes a été faite selon la même méthode que celle décrite dans la section précédente. Le sel meuble a été comprimé à une densité de 1,46 et 1,50 avec une teneur en eau de 6%. Le curage a été fait à l'air libre pour une période de 24 heures. L'éprouvette a été ensuite enveloppée dans 4 membranes de caoutchouc lubrifiées avec de la graisse de silicone. Les échantillons ont été ensuite consolidés isotropiquement à une pression de confinement de 680 et 688 kPa respectivement. Les déformations n'ont pas été enregistrées pour cette consolidation. Une fois la pression de confinement atteinte, la contrainte axiale a été augmentée pour obtenir un déviateur de 479 kPa maintenu constant tout au

long de l'essai.

Dans ces deux essais, seule la déformation axiale a été enregistrée. Il n'y a donc aucune donnée sur les variations de volume, les déformations latérales étant inconnues. Les figures II.62 et II.63 montrent les rhéogrammes pour ces deux essais où la rupture n'a pas été atteinte. Il y a une déformation instantanée suivie d'un fluage primaire et d'un fluage secondaire.

II.3.4 - Conclusions

Le sel meuble est très compressible. Le fluage volumétrique se fait à un taux décroissant linéairement avec le logarithme du temps. La température, la granulométrie et le fluide interstitiel sont des facteurs importants.

Le fluage du sel meuble sous déviateur de contrainte montre une phase de fluage primaire suivie d'un fluage secondaire et éventuellement d'un fluage tertiaire menant à la rupture. Le taux de fluage, l'importance des diverses phases de fluage et la résistance à long terme du sel meuble sont fortement dépendantes du processus de cimentation des grains de sel.

Dans les essais de fluage en compression triaxiale, le fluage secondaire est dominant pour les essais effectués par Pufahl et Yoshida (1982). La présence d'insolubles, même dans

une proportion de 10%, n'a pas d'influence significative sur le comportement du sel meuble à long terme sous déviateur de contrainte (Pufahl et Yoshida, 1982).

II.4 - Conclusions

Le sel meuble est un matériau évolutif montrant un comportement fortement non linéaire. Ce matériau a un comportement visqueux. Il développe de la friction interne et de la cohésion. La cohésion due à la cimentation des grains peut être si importante que le sel meuble montre un comportement typique d'un solide poreux et ne peut plus être considéré comme un matériau pulvérulent.

Le comportement mécanique du sel meuble dépend de la température, l'humidité ambiante, le fluide de saturation, la granulométrie, la composition minéralogique, le niveau de contrainte et son passé mécanique.

Les données expérimentales disponibles dans la littérature sur le comportement mécanique de ce matériau sont insuffisantes et incomplètes. L'effet de la cimentation et la présence d'insolubles en quantité importante (30%) doit être étudié plus à fond. Aucune donnée n'est disponible pour caractériser la dilatance de ce matériau.

CHAPITRE III

ETAT DES CONNAISSANCES

III.1 - Préambule

De manière à obtenir une solution réaliste, aux problèmes d'ingénierie impliquant le sel meuble, il est nécessaire d'utiliser un modèle constitutif permettant de prendre en compte les caractéristiques pertinentes du comportement contrainte-déformation du matériau. L'élaboration d'un modèle approprié requiert une connaissance détaillée des différents facteurs mécaniques tel: la dépendance de la résistance au cisaillement avec la contrainte moyenne, les caractéristiques de dilatance, la déformation permanente lors des cycles de chargement-déchargement, l'effet de l'indice des vides et de la cimentations sur la résistance à la rupture et le comportement contrainte-déformation.

III.2 - Données expérimentales disponibles

A ce jour, les modélisations numériques d'excavations dans le sel gemme ou la potasse remblayées avec du sel meuble utilisent des modèles hypoélastiques à modules variables. Ces modèles sont basés sur des données expérimentales limitées.

Les mécanismes micromorphiques agissant dans le sel meuble sont bien connus, mais leur effet n'est pas caractérisé sous une forme exploitable pour l'ingénieur.

Il est impossible de quantifier, actuellement, comment la cimentation affecte le comportement contrainte-déformation et la résistance à la rupture du sel meuble.

Les phénomènes de variation de volume à forme constante sont relativement bien connus. Cependant, les variations de forme à volume constant ne peuvent pas être caractérisées avec les données actuelles. Aucun des essais rapportés dans la littérature ne permet de caractériser l'effet de l'indice des vides sur le comportement contrainte-déformation en sollicitation déviatorique. L'effet de la cimentation sur le comportement mécanique ne peut être apprécié que qualitativement et il n'existe aucune information sur la dilataance du sel meuble.

Finalement notons que la majeure partie des travaux, effectués sur le sel meuble, porte sur un matériau à forte densité et à haut degré de cimentation pour des niveaux de contraintes moyennes élevés.

III.3 - Conclusion

Compte tenu de ce qui précède, il est évident qu'il est impossible, dans l'état actuel des connaissances, d'élaborer

un modèle constitutif pour le sel meuble; plusieurs carences existent. D'où la nécessité de mettre en oeuvre un certain nombre de programmes expérimentaux afin de combler, du moins en partie, ces principales carences. Disposant de ces résultats supplémentaires, il sera éventuellement possible de proposer un modèle constitutif.

BIBLIOGRAPHIE

- ADAMS, J.R.; MERZ, A.R. (1929): Hygroscopicity of fertilizer materials and mixtures, Industrial and Engineering Chemistry, Vol. 21, No. 4, pp. 305-307.
- ALDERBORN, G.; DUBERG, M.; NYSTROM, C. (1985): Measurement of tablet surface area by permeametry. Powder Technology, Vol. 41, pp. 49-56.
- ANDERSLAND, O.B.; SAYLES, F.H.; LADANYI, B. (1978): Mechanical properties of frozen ground, in Geotechnical Engineering for Cold Regions, Elsevier Scientific Series, pp. 216-275.
- BAGUELIN, F.; JEZEQUEL, J.F.; SHIELDS, D.H. (1978): The Pressuremeter and Foundation Engineering, Series on Rock and Soil Mechanics, Trans Tech Publications, Switzerland, 617p.
- BATALOV, A.P. (1970): An analytical solution for the distribution of compressive forces in a granular medium. Soviet Mining Science, Vol. 6, No. 5, pp. 19-32.
- BLEIMEISTER, W.C. (1971): Rock salt milling, in Sodium Chloride: The Production and Properties of Salt and Brine, D.W. Kaufman editor, American Chemical Society monograph series, Hafner Publishing Company, New York, NY, pp. 127-141.
- BHATIA, R.P.; LORDI, N.G. (1979): Conductivity and hardness changes in aged compacts. Journal of Pharmaceutical Sciences, Vol. 78, No. 7, pp. 896-899.
- BOCKSTIEGEL, G. (1972): Probability aspects in powder compaction. Proceedings of the first international conference on the compaction and consolidation of particulate matter, pp. 51-61.
- BUTCHER, A.E.; JONES, T.M. (1972): The effect of normal stress on the critical porosity of sand. Proceedings of the first international conference on the compaction and consolidation of particulate matter, pp. 152-161.
- BUTCHER, B.M. (1979): Creep consolidation of nuclear depository backfill materials. Sandia Laboratories, New Mexico, SAND79-2212, 24p.

- CARSTENSEN, J.T.; TOURE, P. (1980): Compression cycles in tableting. *Powder Technology*, Vol. 26, pp. 199-204.
- CARSTENSEN, J.T.; XIN-PUHOU (1985): The Athey-Heckel equation applied to granular agglomerates of basic tricalcium phosphate. *Powder Technology*, Vol. 42, pp. 153-157.
- CARTENSEN, J.P.; MARTY, J.P.; PUISIEUX, F.; FESSI, H. (1981): Bonding mechanisms and hysteresis areas in compression cycle plots. *Journal of Pharmaceutical Sciences*, Vol. 70, No. 2, pp. 222-223.
- CASE, J.B.; KELSALL, P.C. (1987): Laboratory investigation of crushed salt consolidation, 28th US Symposium on rock mechanics, Tucson, pp. 189-196.
- CHAPUIS, R.P.; SOULIE, M. (1981): Internal structure and mechanical behavior of granular materials. *Proceedings of the International symposium on the mechanical behavior of structured media*, Ottawa, pp. 341-355.
- CHEN, W.-F.; SALEEB, A.F. (1982): *Constitutive Equations for Engineering Materials*, Vol. 1: Elasticity and Modelling, John Wiley & Sons, New York, 580p.
- COLE, E.T.; REES, J.E.; HERSEY, J.A. (1975): Relations between compaction data for some crystalline pharmaceutical materials. *Pharmazie Acta Helvetica*, Vol. 50, No. 1, pp. 28-32.
- CORRENS, C.W. (1949): Growth and dissolution of crystals under linear pressure, *Discussions of the Faraday Society*, No. 5, pp. 267-271.
- DANTU, P. (1957): Contribution à l'étude mécanique et géométrique des milieux pulvérulents. *Comptes rendus du quatrième congrès international de mécanique des sols et des travaux de fondations*, Londres, pp. 144-148.
- DANTU, P. (1968): Etude statistique des forces intergranulaires dans un milieu pulvérulent. *Géotechnique*, Vol. 18, pp. 50-55.
- DEBOER, A.H.; BOLHUIS, G.; LERK, C.F. (1978): Bonding characteristics by scanning electron microscopy of powders mixed with magnesium stearate. *Powder Technology*, Vol. 20, pp. 74-82.

- DEVAUX, P. (1984): Utilisation des stériles des mines de potasse d'Alsace. Bulletin of the International Association of Engineering Geology, Vol. 30, pp. 5-9.
- DONNAN, F.R.S. (1918): The agglomeration of granular masses, Transactions of the Faraday Society, vol. XIV, reprint published by Butterworths Scientific Publications Ltd., London, 1949, pp.12-13.
- DOWN, G.R.B. (1983): Localized particule fracture during compression of materials expected to undergo plastic deformation. Powder Technology, Vol. 35, pp. 167-169.
- DOWN, G.R.B.; McMULLEN, J.N. (1985): The effect of inter particulate friction and moisture in the crushing strength of sodium chloride compacts. Powder Technology, Vol. 42, pp. 169-174.
- DUBERG, M.; NYSTROM, C. (1986): Studies on direct compression of tablets: XVII. Porosity-pressure curves for the characterisation of volume reduction mechanisms in powder compression. Powder Technology, Vol. 46, pp. 65-75.
- DUNCAN, J.M.; CHANG, C.Y. (1970): Nonlinear analysis of stress and strain in soils. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division. ASCE, Vol. 96, No. SM5, pp. 1629-1653.
- DUNLOP, B.; SHOOK, C. (1983): Gravity drop pipe transport. Potash Technology, pp. 371-377.
- DURST, F.; MACAGNO, M. (1986): Experimental particle size distributions and their representation by log-hyperbolic functions. Powder Technology, Vol. 45, pp. 223-244.
- ECKARDT, H. (1981): Laboratory borehole creep and relaxation tests in thick-walled cylinder samples of frozen sand. Report No 665-222, Centre d'Ingénierie Nordique, Ecole Polytechnique de Montréal, 132p.
- FRASER, D.R. (1972): An investigation of some factors influencing tablet strength. Proceedings of the first international conference on compaction and consolidation of particulate matter, pp. 150-154.
- FREEZE, R.A.; CHERRY, J.A. (1979): Groundwater. Prentice-Hall, 604p.

- FRIENDMAN, M.; DULA, W.F.; GANGI, A.F.; GAZONAS, G.A. (1984): Structural petrology of experimentally deformed synthetic rock salt. Proceedings of the first conference on the mechanical behavior of salt. Transamerican Technical Publication, pp.19-36.
- GERRITSEN, A.H. (1985): The influence of the degree of stress anisotropy during consolidation on the strength of cohesive powdered materials. Powder Technology, Vol. 43, pp. 61-70.
- GIBSON, R.E.; ANDERSON, W.F.; (1961): In situ measurement of soils properties with the pressuremeter. Civil Engineering Public Works Review, London, Vol 56, No 658, pp. 615-618.
- GNIRK, P.F. (1978): Deformation and strength characteristics of granulated salt from laboratory consolidation tests, Technical letter from memorandum, RSI-0020, RE/SPEC Inc., september 25, 40p.
- GOODALL, D.C.; FREDLUND, D.G.; LAMB, K.N. (1983): Methods and implications of a state of the art geotechnical field investigation of potash tailings near Lanigan, Saskatchewan. Potash Technology, pp. 781-799.
- GRAY, W.A. (1972): A review of the compaction of powders by vibration. Proceedings of the first international conference on the compaction and consolidation of particulate matter, pp. 99-105.
- GRAY, W.A.; RHODES, G.T. (1972): Vibratory compaction of powders. Proceedings of the first international conference on the compaction and consolidation of particulate matter, pp. 107-114.
- GUTMANAS, E.Yu.; NADGORNYYI, E.M.; STEPANOV, A.V. (1963): Dislocation measurement in sodium chloride crystals. Soviet Physics-Solid State., Vol. 5, No. 4, pp.743-747.
- GUILLOPE, M.; POIRIER, J.P. (1979): Dynamic recrystallization during creep of single-crystalline halite: An experimental study. Journal of Geophysical Research, Vol. 84, No. B10, pp. 5557-5567.
- HANSEN, F.D. (1976): Experimental consolidation of granulated rock salt with application to sleeve buckling. Technical report RSI-OG44, RE/SPEC Inc., Rapid City, 45p.

- HABBERJAM, G.M. (1964): Compaction phenomenon in char briquetting. *British Journal of Applied Physics*, Vol. 15, pp. 1233-1242.
- HARDMAN, J.S.; LILLEY, B.A. (1970): Deformation of particule during briquetting. *Nature*, Vol. 228, pp. 253-355.
- HARDMAN, J.S.; LILLEY, B.A. (1972): The influence of shear strain on the compaction of powders. *Proceedings of the first international conference on the compaction and consolidation of particulate matter*, pp. 115-121.
- HAUSNER, H.H. (1972): The role of interparticulate friction in powder technology. *Proceedings of the first conference on the compaction and consolidation of particulate matter*, pp. 7-12.
- HECKEL, R.W. (1961a): Density pressure relationships in powder compaction. *Transactions of the Metallurgical Society of AIME*, Vol. 221, pp. 671-675.
- HECKEL, R.W. (1961b): An analysis of powder compaction data phenomena. *Transactions of the Metallurgical Society of AIME*, Vol. 221, pp. 1001-1008.
- HEDLEY, D.G.F. (1967): An appraisal of convergence measurements in salt mines. *Proceedings of the 4th Canadian Rock Mechanics Symposium*, Ottawa, pp. 117-135.
- HERSEY, J.A.; REES, J.E. (1971): Deformation of particles during briquetting. *Nature, Physical Science*, Vol. 230, pp. 96-97.
- HERSEY, J.A.; COLE, E.T.; REES, J.E. (1972): Powder consolidation during compaction. *Proceedings of the first international conference on the compaction and consolidation of particulate matter*, pp. 30-38.
- HOLCOMB, D.J.; HANNUM, D.W. (1982): Consolidation of crushed salt backfill under conditions appropriate to the WIPP facility. *Sandia Laboratories report, SAND82-0630*, New Mexico, 110p.
- HOLTZ, R.D.; KOVACS, W.D. (1981): An Introduction to Geotechnical Engineering. *Prentice-Hall Civil Engineering and Engineering Mechanics Series*, 733p.
- HUFFINE, C.L.; BONILLA, C.F. (1962): Particule size effects in the compression of powders. *American Institute of Chemical Engineering Journal*, Vol. 8, No. 3, pp. 490-493.

- HURLBUT, C.S.; KLEIN, C. (1977): Manual of Mineralogy (After James D. Dana) 19th Edition, John Wiley & Sons, New York, 532p.
- HUTTENRAUCH, R.; KEINER, I. (1976): Molekulargalenik mitteilung: Zum mechanismus der tablettenbildung. Pharmazie, Vol. 31, No. 9, pp. 651-655.
- HUTTENRAUCH, R. (1978): Molekulargalenik als grundloge moderner orzneifarmung. Acta Pharmaceutica Technologia, Supp. 6, pp. 55-127.
- INNES, R.F. (1937): The absorption of moisture by certain salts and by glucose when stored in atmospheres of varying relative humidity. Journal of the International Leather Trades Chemists, Vol. 21, pp. 55-64.
- IT CORPORATION (1984): Assesment of crushed salt consolidation and fracture healing processes in a nuclear waste repository in salt. Technical report for the office of nuclear waste isolation, BMI/ONWI 546, 104p.
- JETZER, W.; LEUENBERGER, H. (1985): Ueber das Komprimiewerhalten von NaCl, KCl und Hexamethylentetramin. Powder Technology, Vol. 42, pp. 137-144.
- KAPPEI, G.; GESSLER, K. (1984): In situ tests in the behavior of backfill materials and accompanying rock mechanical laboratory investigations. Second conference on the mechanical behavior of salt, pp. 1-23. To be published.
- KAUFMAN, D.W. (1971): Handling and storage of salt, in Sodium Chloride: The Production and Properties of Salt and Brine. D.W. Kaufman Editor, American Chemical Society monograph series, Hafner Publishing Company, New York, NY, pp. 509-547.
- KEJRIWAL, B.K.; GHOSE, A.K. (1986): Effect of fill on the strength of coal pillars an investigation. 27th U S Symposium on rock mechanics, Alabama, pp. 386-389.
- KELSALL, P.C.; CASE, J.B.; COONS, W.E.; FRANZONE, J.G.; MEYER, D. (1985): Schematic design for penetration seals for a repository in the permian basin. Report ONWI-564, 197p.
- KINGERY, W.D.; BOWEN, H.K.; UHLMAN, D.R. (1976): Introduction to Ceramics, 2nd Edition, A Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons Edition, 1032p.

- KORTHAUS, E. (1984): Effect of backfill material on cavity closure. Second conference on the mechanical behavior of salt, Hannover, to be published.
- KRYCER, I.; POPE, D.G. (1982): The interpretation of powder compaction data. A critical review. Drug Development and Industrial Pharmacy, Vol. 8, No. 3, pp. 307-342.
- LABBE, P.A. (1983): Selection of materials for tailings drop pipe service. Potash Technology, pp. 363-369.
- LAMA, R.D.; VUTUKURI, V.S. (1978): Handbook on Mechanical Properties Rocks. Vol. III, Trans Tech Publications, 405p.
- LANGER, M. (1986): Rheology of rock-salt and its application for radioactive waste disposal purposes. Proceedings of the international symposium on engineering in complex rock formations, pp. 1-19.
- LAWRENCE, P. (1970): The cold compaction of several mineral powders. Journal of Material Science, Vol. 5, pp. 663-668.
- LIEDTKE, L.; BLEICH, W. (1985): Convergence calculations for backfilled tunnels in rock salt. Computers and Structures, Vol. 21, No. 112, pp. 353-378.
- LORDI, N.; SHIROMANI, P. (1984): Mechanism of hardness of aged compacts, Drug Development and Industrial Pharmacy, Vol. 10, No. 5, pp. 729-752.
- LOWRY, T.M.; HEMMINGS, F.C. (1920): The properties of powders, Part 1.- The caking of salts. Journal of the Society of Chemical Industries, London, Vol. 39, No. 8, pp. 101T-110T.
- MARSAL, R.J. (1973): Mechanical Properties of Rock Fill. Embankment-Dam Engineering, Casagrande volume. R.C. Hirschfeld editor, John Wiley & Sons Publishers, New-York, pp. 110-200.
- MARSHALL, K. (1972): Some observations on the elucidation and control of die compaction processes. Proceedings of the first international conference on compaction and consolidation of particulate matter, pp. 173-181.
- MILLER, H.D.S. (1980): Stability of excavations and design of mining layouts in a deep level potash mine. Ph.D. Thesis, University of Newcastle upon Tyne, 356p.

- MILLER, H.D.S. (1982): Factors to be considered for increasing the extraction of underground potash deposits. Stability in Underground Mining. NRCC, IN 275-A2-I62-C3, 10p.
- MILLER, H.D.S. (1983): Use of rock salt as backfill. Potash Technology, pp. 341-345.
- NADGORNYYI, E.M.; STEPANOV, A.V. (1963a): Study of dislocations in sodium chloride crystals. Soviet Physics-Solid State, Vol. 5, No. 4, pp. 726-731.
- NADGORNYYI, E.M.; STEPANOV, A.V. (1963b): Artificial slip formation and dislocations array in sodium chloride crystals. Soviet Physics-Solid State, Vol. 5, No. 4, pp. 732-742.
- PEDERSEN, E. (1986): Model for powder compression which takes diwall friction into account. Powder Technology, Vol. 45, pp. 155-157.
- PFEIFLE, T.W.; SENSENY, P.E. (1982): Steady state creep of rock salt in geoengineering. Proceedings of the 23rd U S Symposium on rock mechanics, pp. 307-314.
- PFEIFLE, T.W.; SENSENY, P.E.; MELLEGGARD, K.D. (1987): Influence of variables on the consolidation and unconfined compressive strength of crushed salt. Technical report RE/SPEC Inc., ONWI-627, 62p.
- PUFHAL, D.E.; YOSHIDA, R.D. (1982): A study of potash tailing: Properties and behavior for total extraction mining. Report of the geotechnical group. University of Saskatchewan, 220p.
- PUFHAL, D.E.; DUNLOP, R.B.; TAYLOR, W.E.G. (1983): A new concept in potash mining. Proceedings of the 36th Canadian geotechnical conference, Saskatoon, pp. 4.5.5-4.5.8.
- RAMBERGER, R.; BURGER, A. (1985): On the application of the Heckel and Kawakita equations to powder compaction. Powder Technology, Vol. 43, pp. 1-9.
- RAMSDELL, L.S. (1971): Mineralogy of salt, in Sodium Chloride: The Production and Properties of Salt and Brine, D.W. Kaufman editor, American Chemical Society monograph series, Hafner Publishing Company, New York, NY, pp. 13-21.

- RATIGAN, J.L.; WAGNER, R.A. (1978): Thermomechanical analysis of crushed salt backfilled disposal rooms in a conceptual radioactive waste repository in dome salt, Technical memorandum report RSI-0068, RE/SPEC Inc., Rapid City, 51p.
- REDFERN, B.A.W.; EVANS, R.A.; WRONSKI, A.S. (1970): Generation of dislocations by hydrostatics pressure in NaCl monocrystals containing Na₂SO₄ particles. Journal of Material Science, No. 5, pp. 784-789.
- SCOTT, R.F. (1963): Principles of Soil Mechanics, Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, 550p.
- SHOR, A.J.; BAES, C.F.; CANONICO, C.M. (1981): Consolidation and permeability of salt in brine, ORNL-5774 prepared for the US Department of Energy by Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, T.N., 23p.
- SHOTTON, E.; GANDERTON, D. (1961): The strength of compressed tablet. III. The relation of particle size, bonding and copping in tablets of sodium chloride, aspirin and hebamin. Journal of Pharmaceutics and Pharmacology, Vol. 13, pp. 144-153.
- SHOTTON, E.; REES, J.E. (1966): The compaction properties of sodium chloride in the presence of moisture. Journal of Pharmaceutics and Pharmacology, Vol. 18, supplement, pp. 160-167.
- SPIERS, C.J.; URAI, J.L.; LISTER, G.S. (1984): The effect of brine (inherent or added) on rheology and deformation mechanisms in salt rock. Proceedings of the 2nd conference on the mechanical behavior of salt, Hannover, to be published.
- STINEBOUGH, R.E. (1979): Compressibility of granulated rock salt. Sandia Laboratories report SAND79-1119, 66p.
- SVALSTAD, D.K. (1983): Canister-scale analysis of a nuclear waste emplacement at two potential nuclear waste repository sites in bedded salt. 24th US Symposium on rock mechanics, pp. 837-848.
- TAYLOR, W.E.G.; BUTCHER, M. (1983): Total extraction mining. Potash Technology, pp. 83-91.

- VLAJIC, M.; STAMENKOVIC, I. (1972): Investigation of packing and cohesion of fragile particles in green compacts. Proceedings of the first international conference on compaction and consolidation of particulate matter, pp. 63-67.
- WAGNER, R.A.; RATIGAN, J.L. (1979): Thermo-viscoelastic analysis of a heated room with crushed salt backfill in the pre-WIPP dedicated area, Technical memo report, RSI-0081, RE/SPEC Inc., April, 26p.
- WAGNER, R.A. (1980): Preliminary investigation of the thermal and structural influence of crushed salt backfill on repository disposal rooms. RE/spec Inc. Technical report, ONWI-138, 22p.
- WEBER, J. (1966): Recherches concernant les contraintes intergranulaires dans les milieux pulvérulents. Application aux lois de similitude dans les études sur modèles réduits de problèmes de mécanique des sols pulvérulents. Bulletin de Liaison des Ponts et Chaussées, No. 20, pp. 3.1-3.20.
- WHETSTONE, J. (1949): Anti-caking treatment for ammonium nitrate, The Industrial Chemist, Vol. 25, pp. 401-406.
- WITHIAM, J.L.; SMITH, M.B.; CASE, J.B.; KELSALL, P.C. (1984): Laboratory investigation of crushed salt consolidation and fracture healing. IT Corporation topical report, Project No. NM799137, 150p.
- WROTH, C.-P.; WINDLE, D. (1975): Analysis of the pressuremeter test allowing for volume change. Géotechnique, London, Vol. 25, No. 3, Technical notes, pp. 598-604.

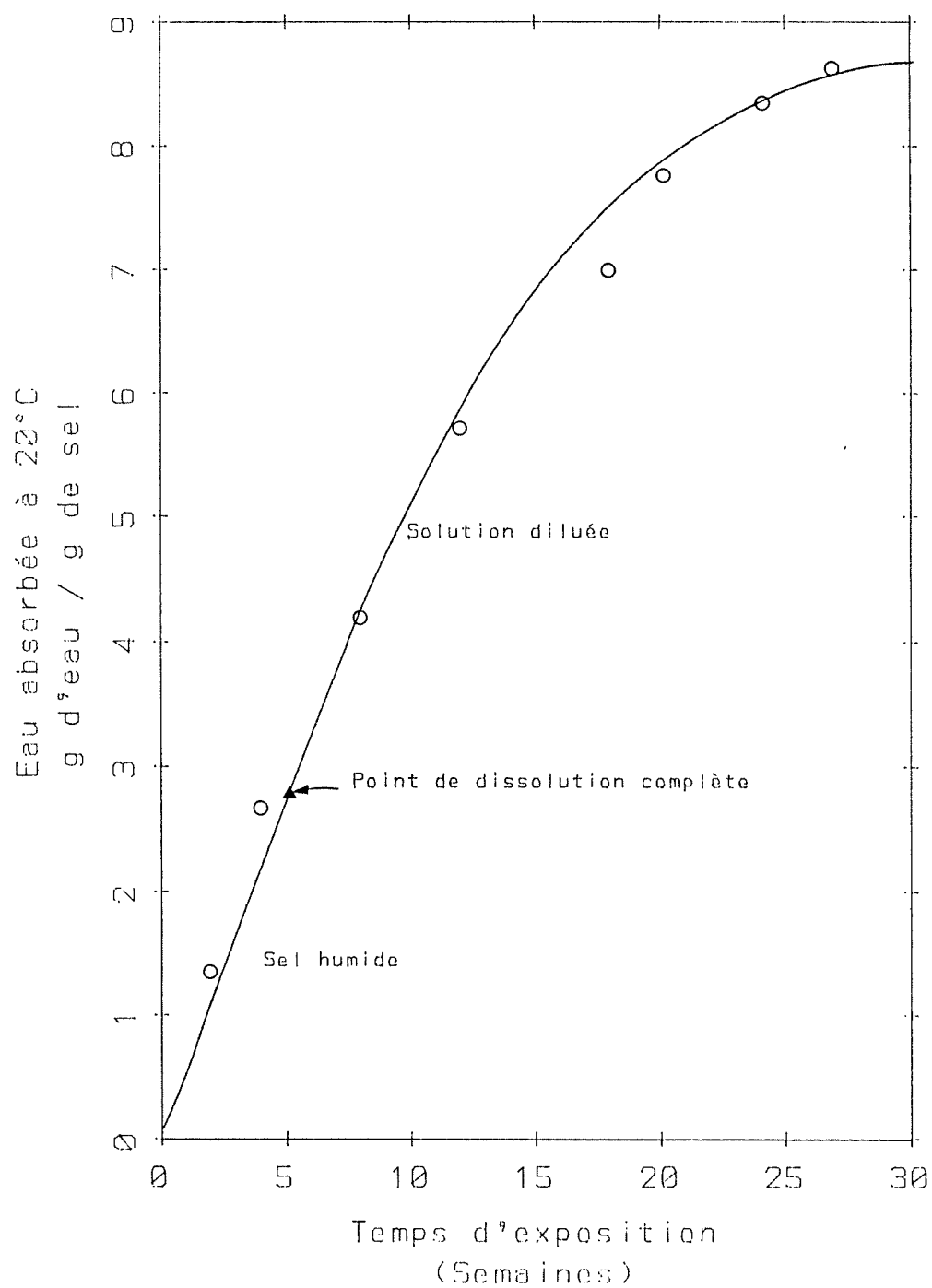


Figure II.1 a: Hygroscopicité de la halite d'après Innes, 1937; absorption d'eau à 20°C dans une atmosphère saturée.

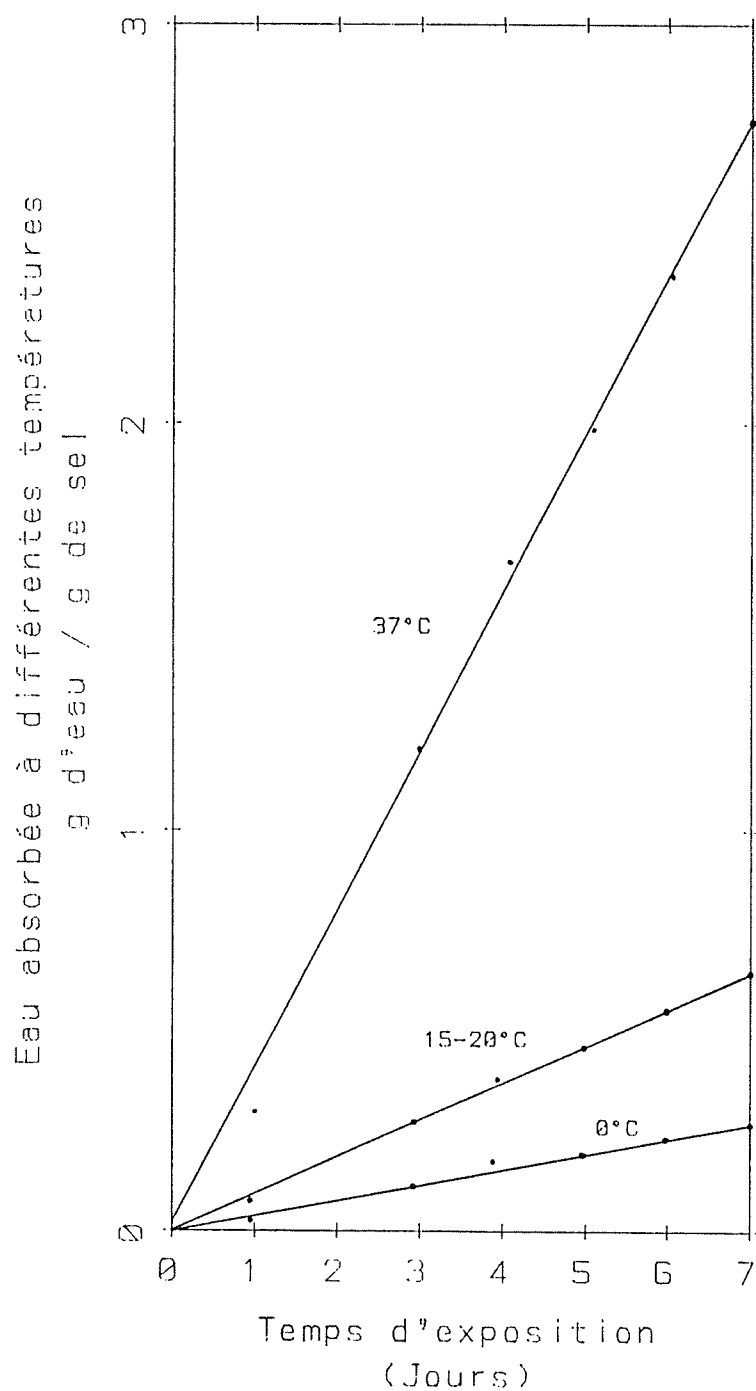


Figure II.1 b: Hygroscopicité de la halite d'après Innes, 1937; absorption d'eau à différentes températures dans une atmosphère saturée.

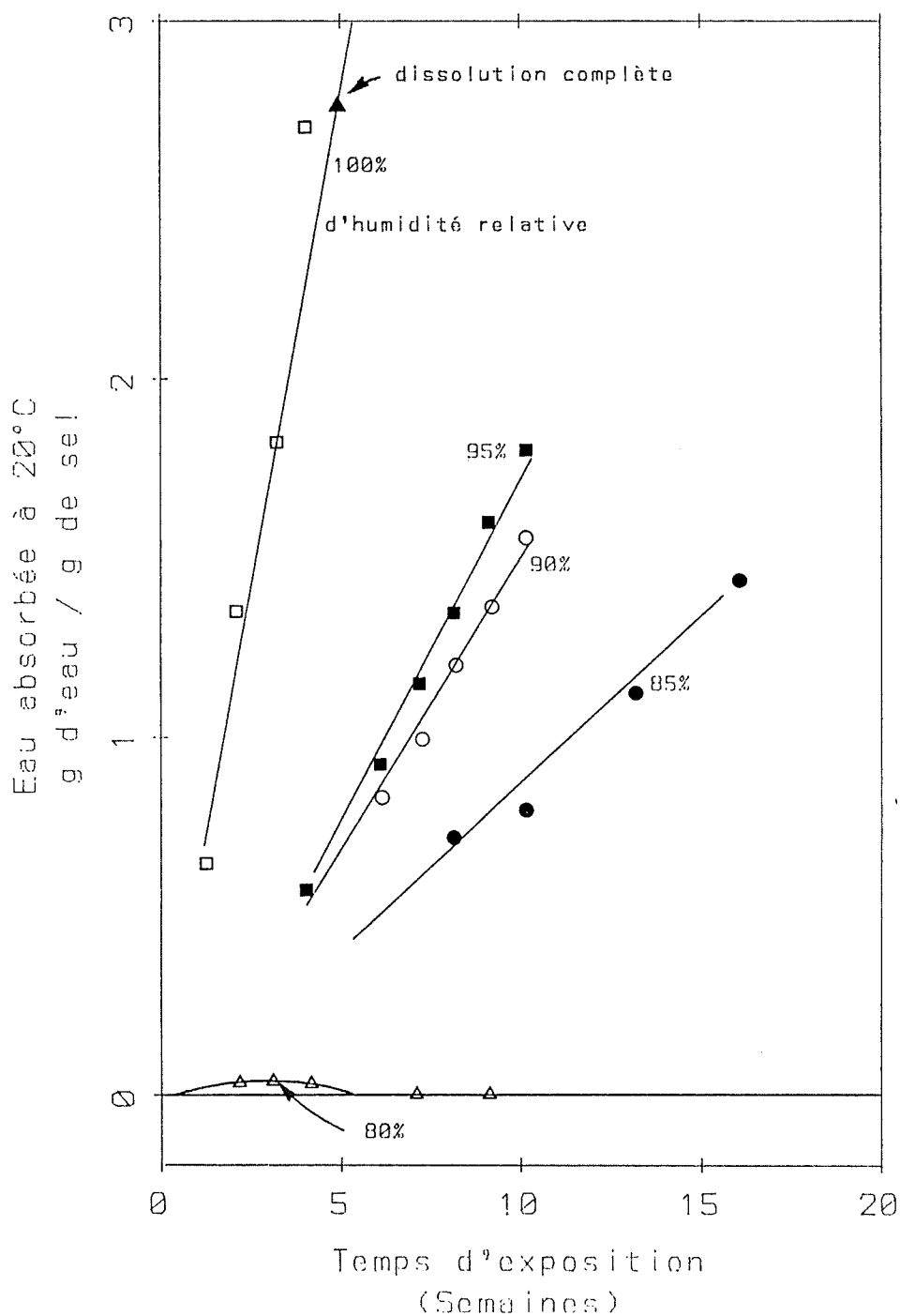


Figure II.1 c: Hygroscopicité de la halite d'après Innes, 1937; absorption d'eau à 20°C pour différentes humidités relatives.

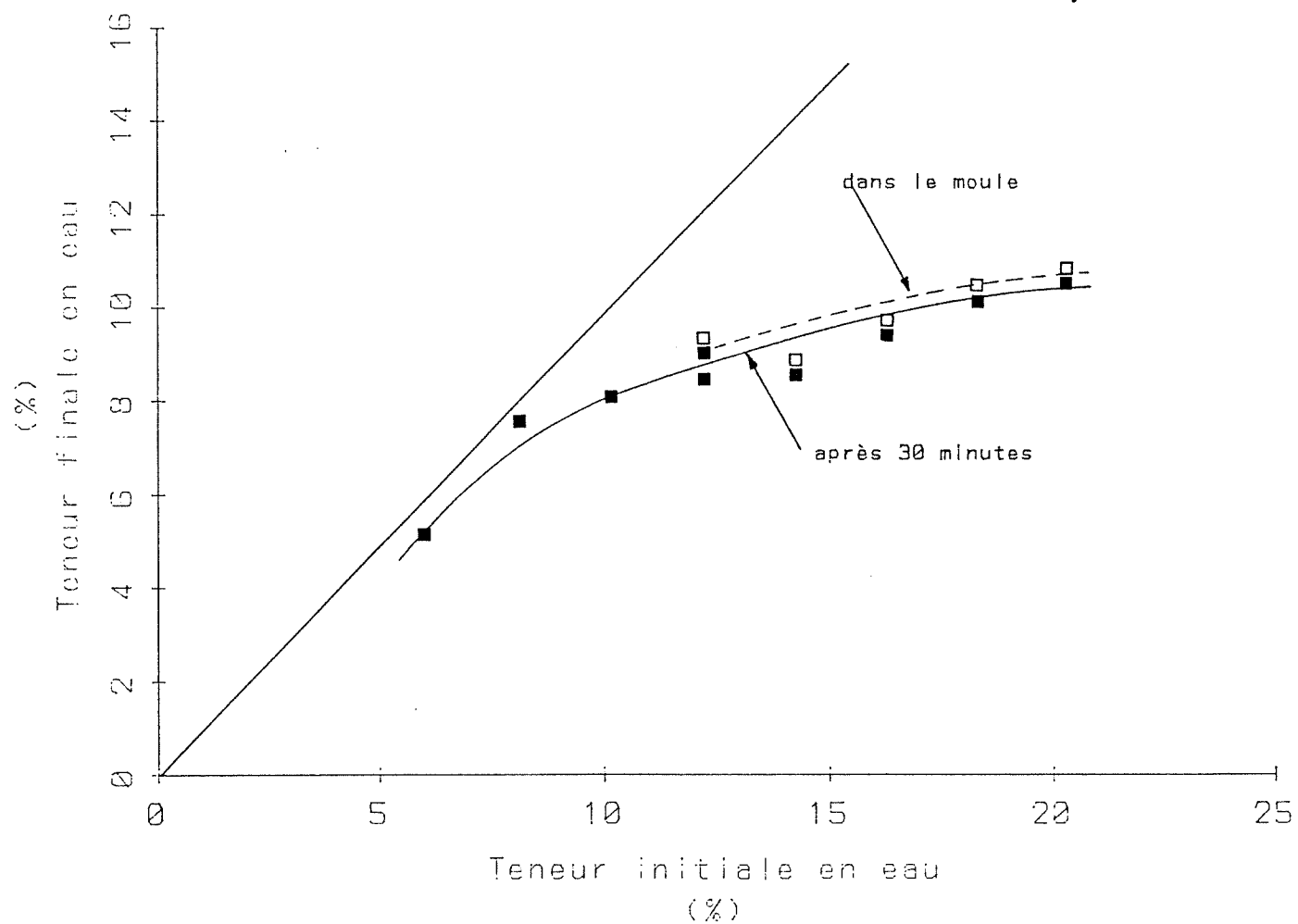


Figure II.2: Teneur en eau des rejets de potasse immédiatement après compactage et 30 minutes après la fin du compactage à $1,50 \text{ g/cm}^3$ (d'après Pufahl et Yoshida, 1982).

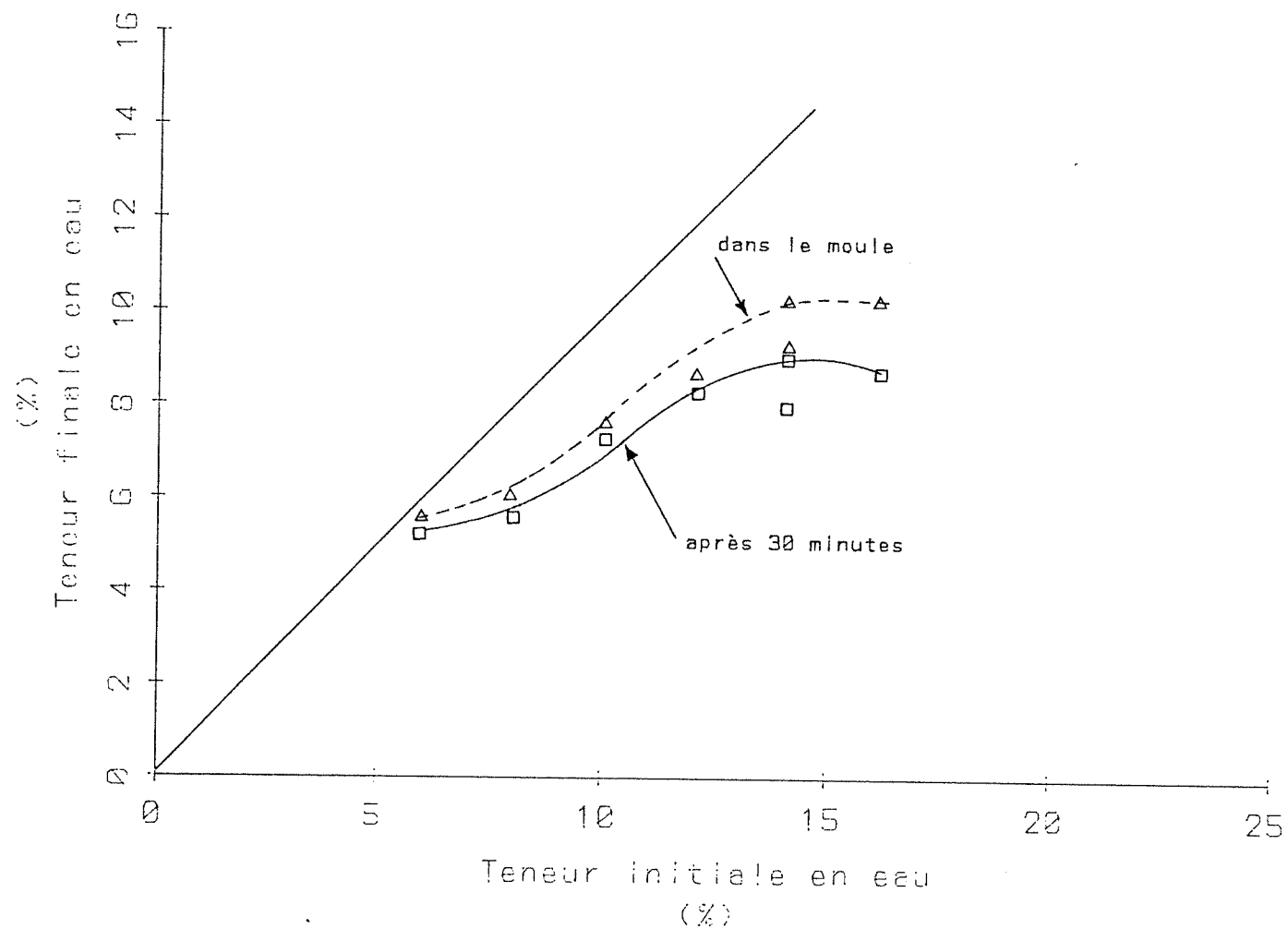


Figure II.3: Teneur en eau des rejets de potasse immédiatement après compactage et 30 minutes après la fin du compactage à $1,60 \text{ g/cm}^3$ (d'après Pufahl et Yoshida, 1982).

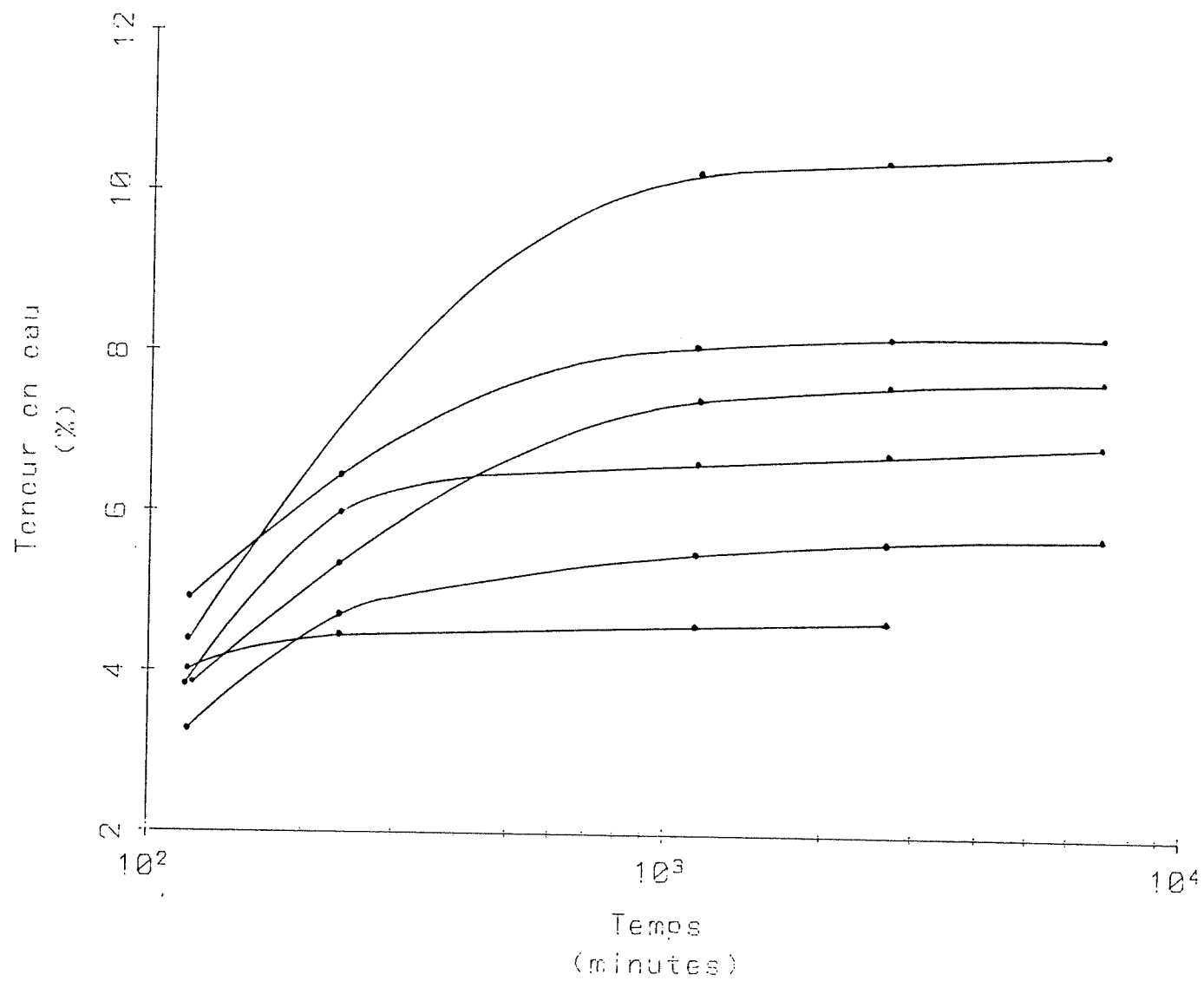


Figure II.4: Courbes de séchage des rejets de potasse à 100°C (d'après Pufahl et Yoshida, 1982).

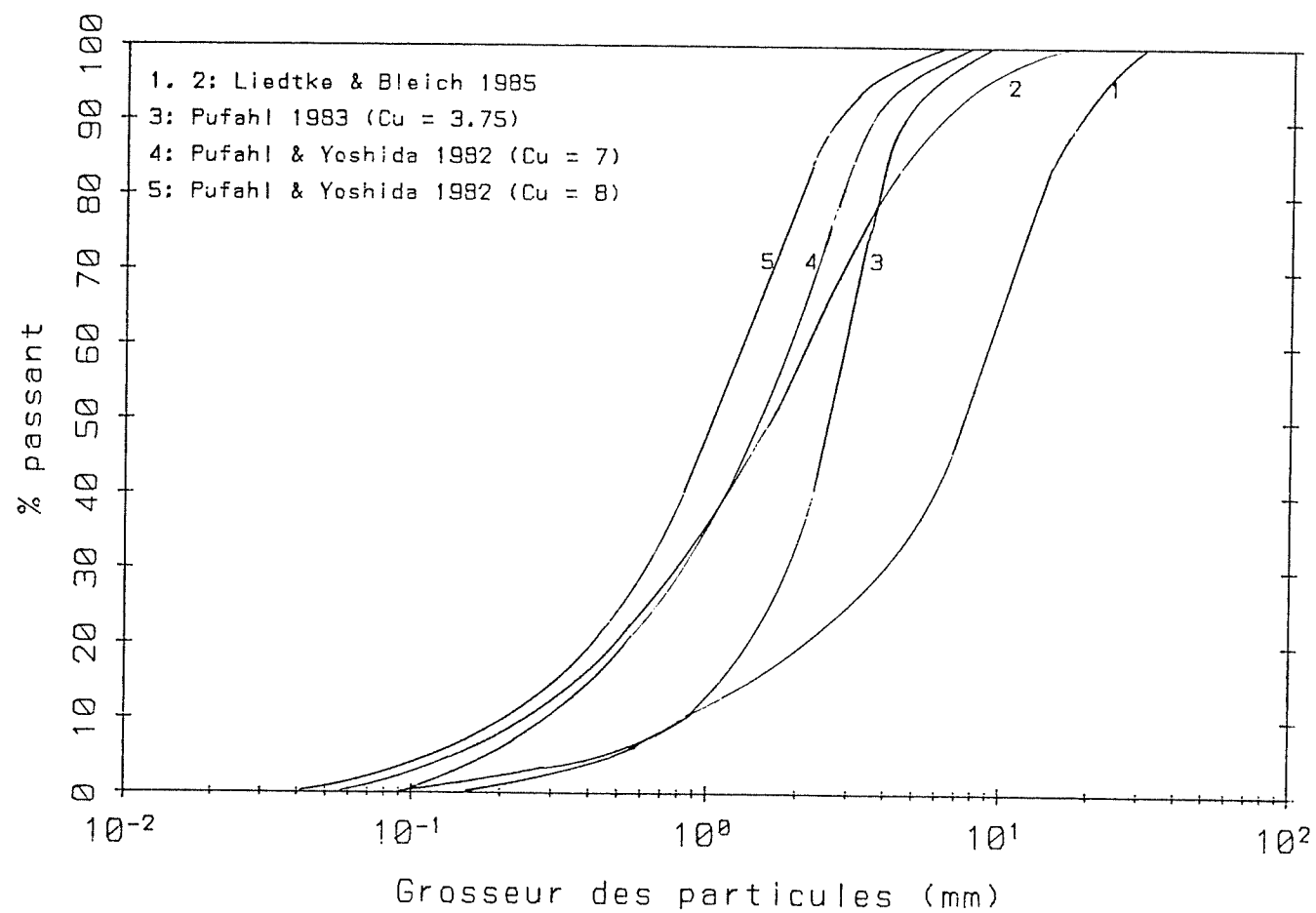


Figure II.5: Courbes granulométriques (1 à 5) de sels meubles testés par les divers auteurs cités dans ce texte.

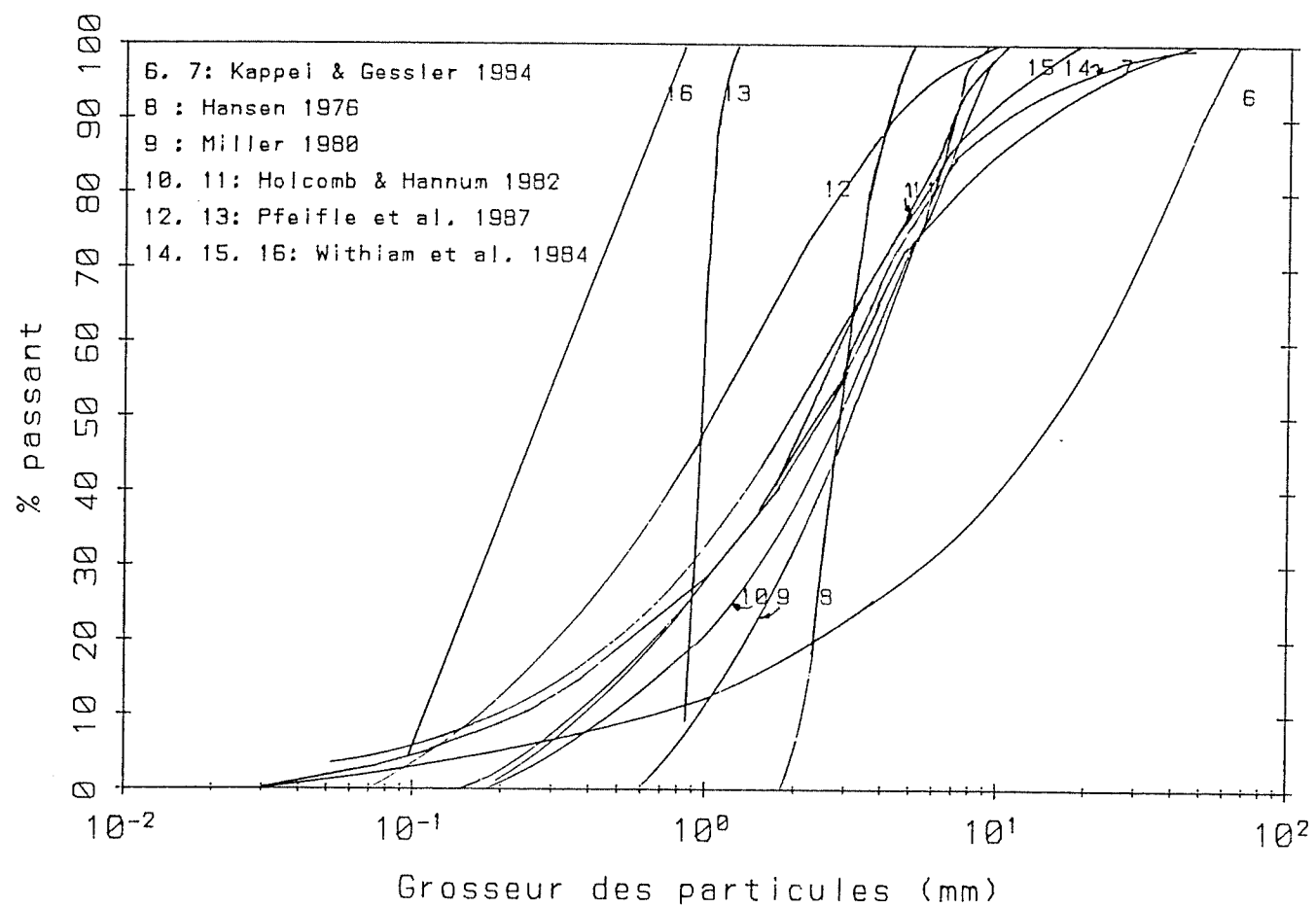


Figure II.6: Courbes granulométriques (6 à 16) de sels meubles testés par les divers auteurs cités dans ce texte.

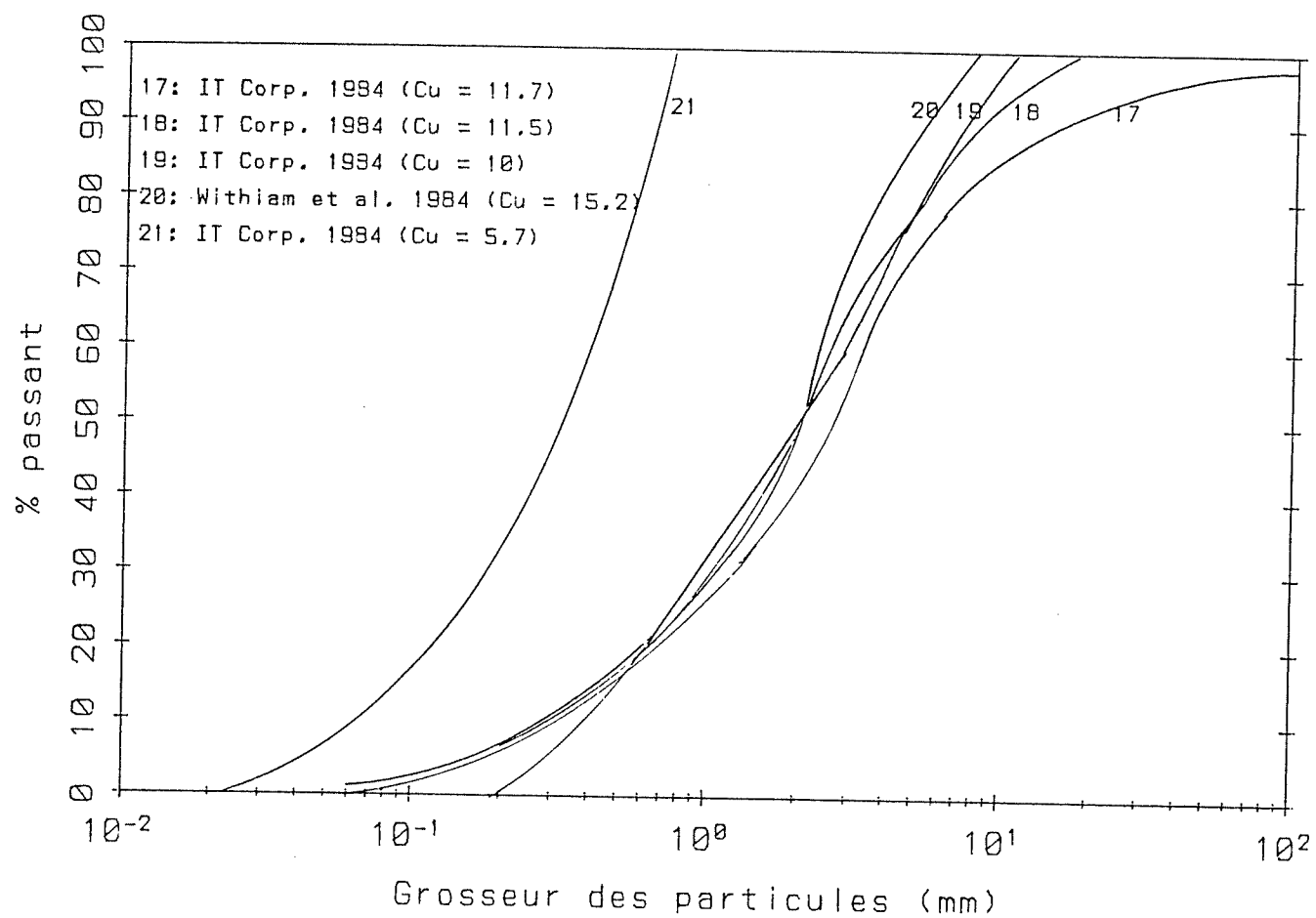
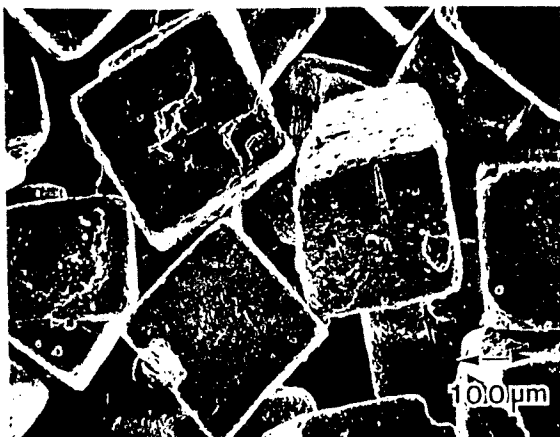
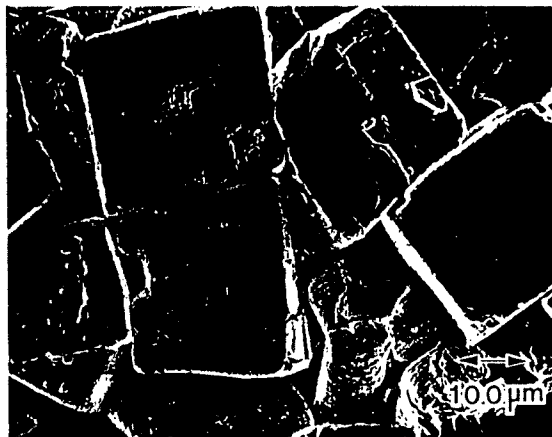


Figure II.7: Courbes granulométriques (17 à 21) de sels meubles testés par les divers auteurs cités dans ce texte.



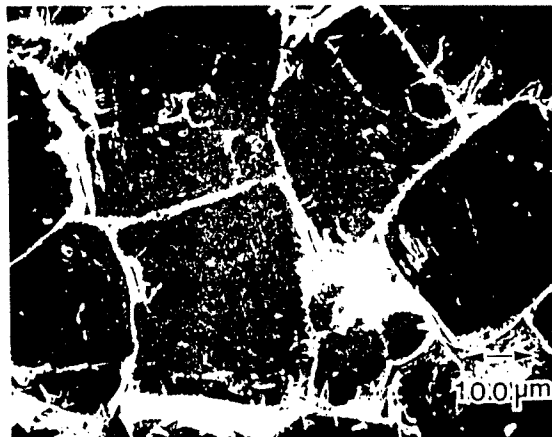
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure II.8: Photographies au microscope à balayage électronique d'une poudre de halite à divers stade de compactage: a) avant compactage, b) à 35 MPa, c) à 70 MPa, d) à 140 MPa (Down, 1983).

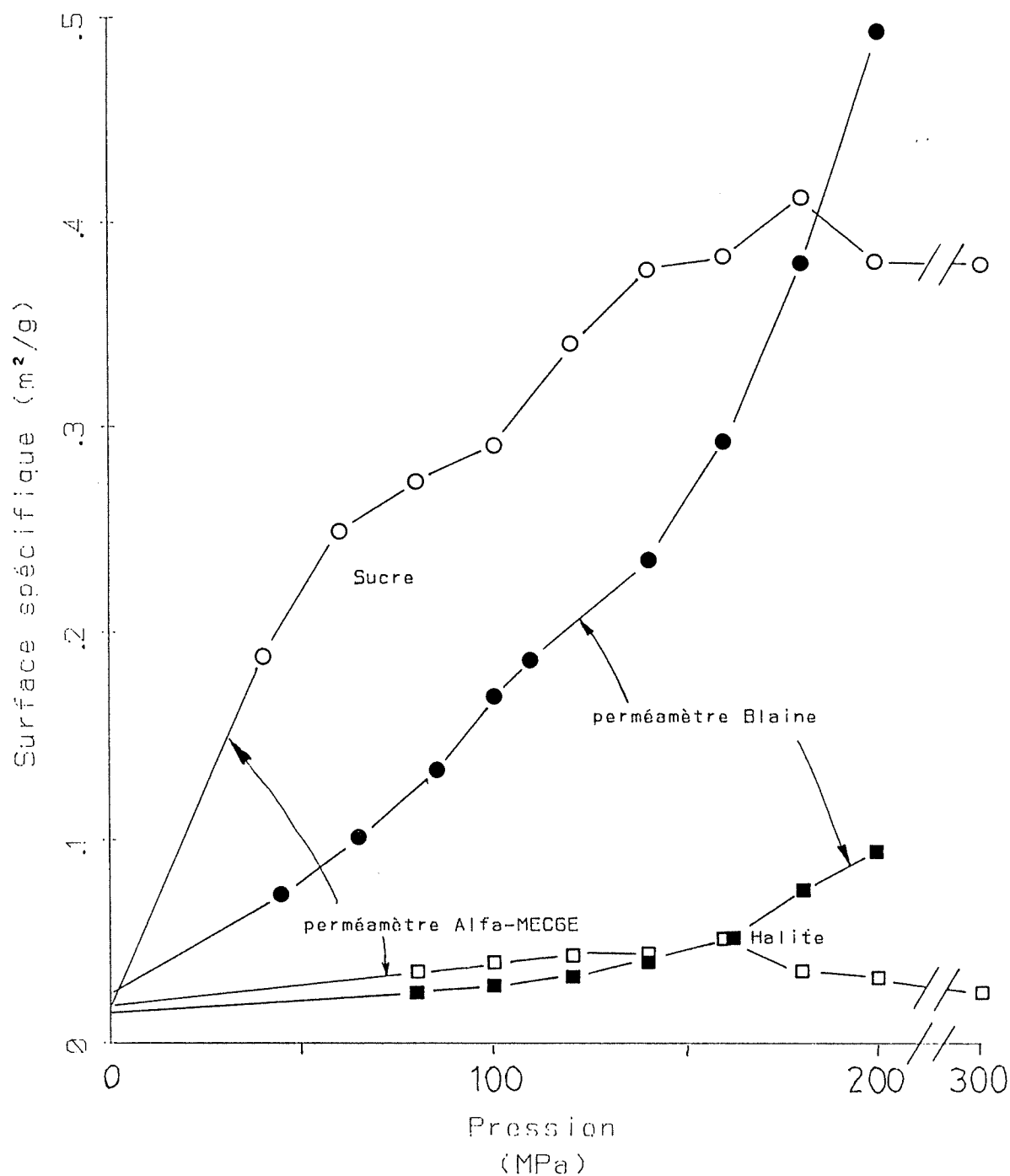


Figure II.9: Variation de la surface spécifique en fonction de la pression de chargement pour: $\circ$ sucre, $\square$ halite en poudre de 212 à 250 μm . Symboles blancs: perméamètre ALFA-MEC6E et symboles noirs: perméamètre Blaine (Alderborn et Nystrom, 1985).

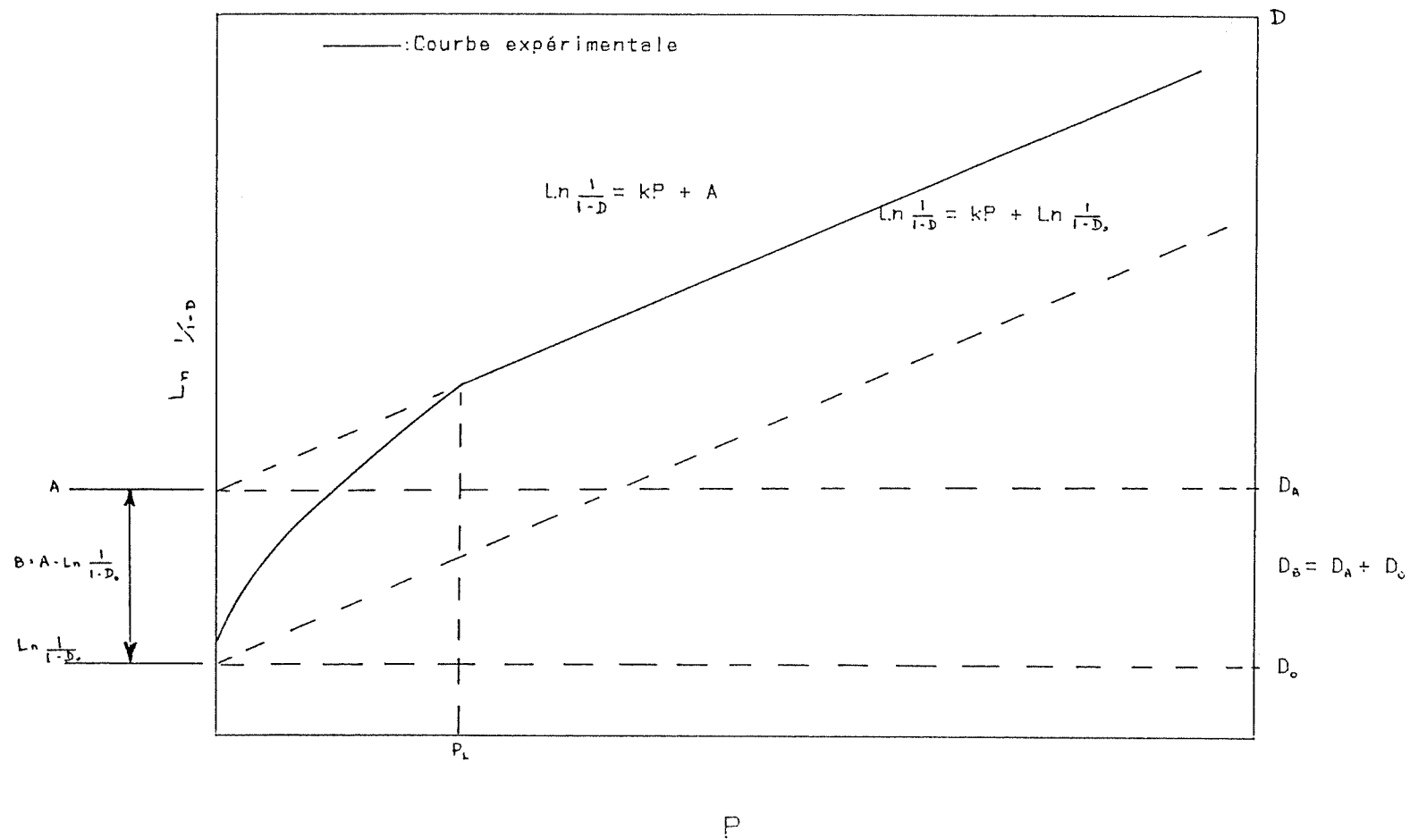


Figure II.10: Représentation graphique de la relation de Heckel (d'après Heckel, 1961).

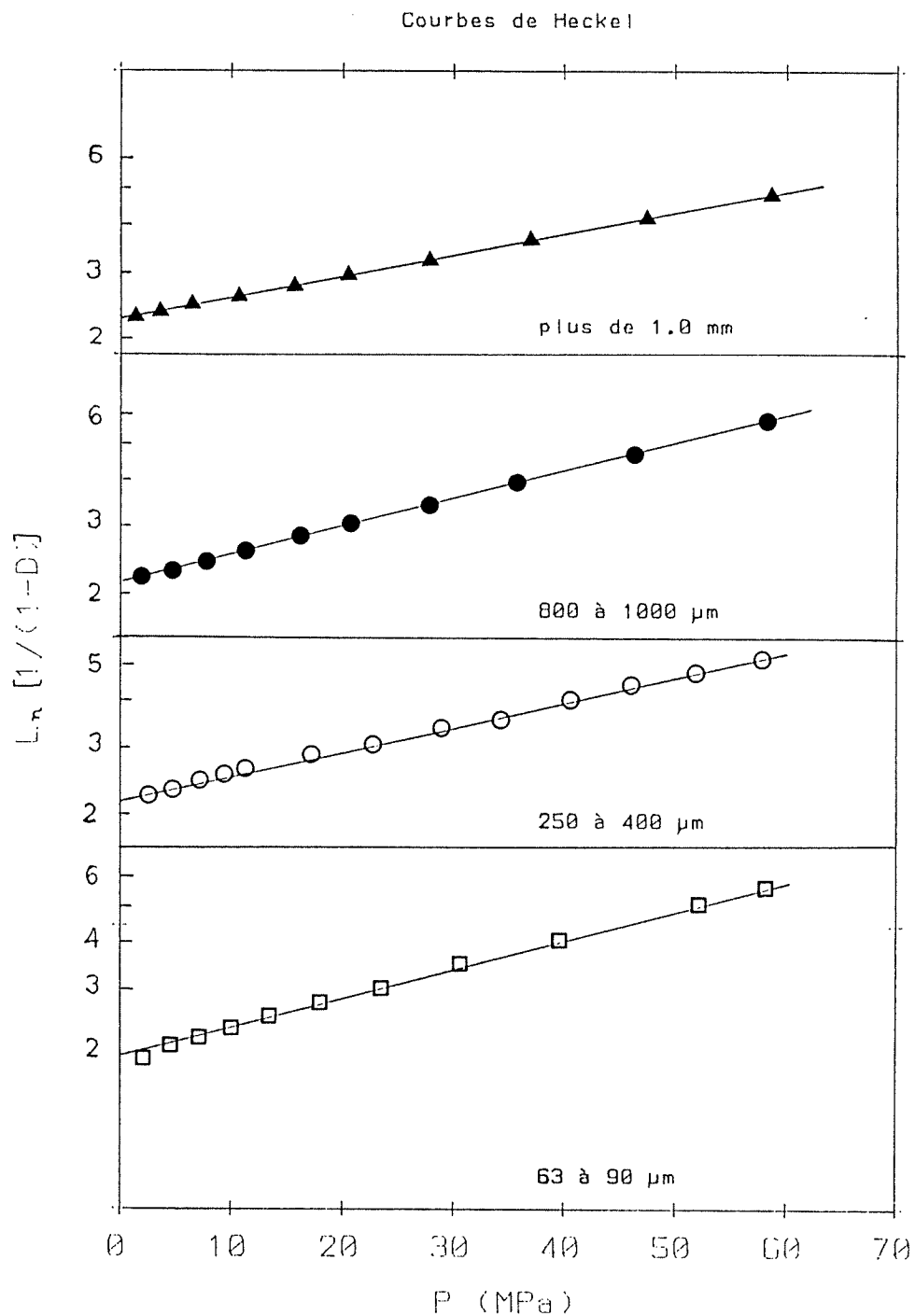


Figure II.11: Courbes de Heckel pour le compactage de poudres de halite de différents diamètres de particules: $\blacktriangle$ plus de 1,0 mm, $\bullet$ 800 à 1000 μm , $\circ$ 250 à 400 μm , $\square$ 63 à 90 μm (Hersey et al., 1972).

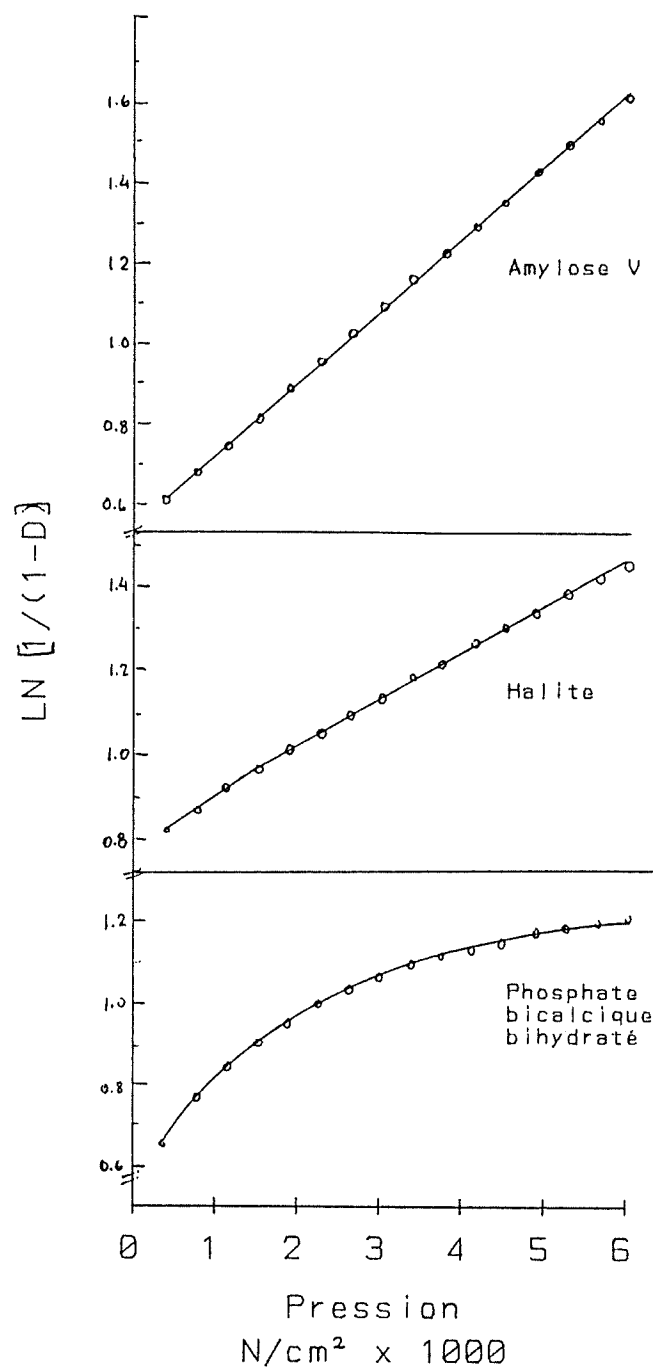
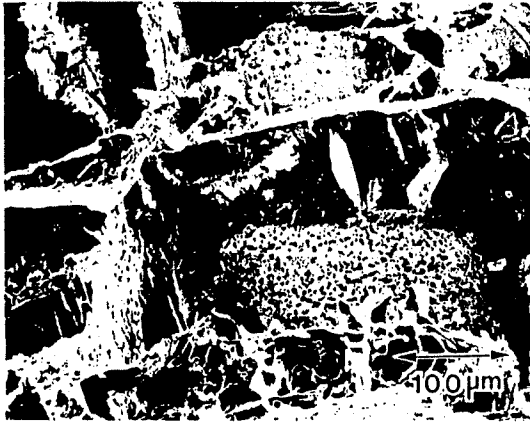
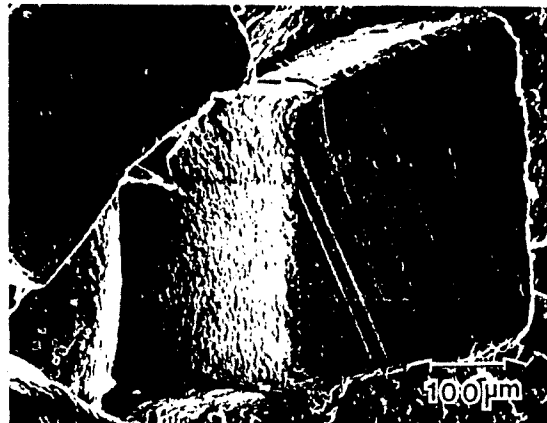


Figure II.12: Courbes de Heckel pour 1. -Amylose V, 2. - halite, 3. - Phosphate bicalcique bihydraté (d'après DeBoer et al., 1978).



(a)



(b)



(c)



(d)

Figure II.13: Photographies au microscope à balayage électronique d'une poudre de halite exposée à différentes humidités relatives pendant 100 heures: a) moulage epoxy montrant les point de soudure entre deux particules, b) particules exposées à R.H. = 33%, c) R.H. = 66%, d) R.H. = 84% (d'après Down et McMullen, 1985).

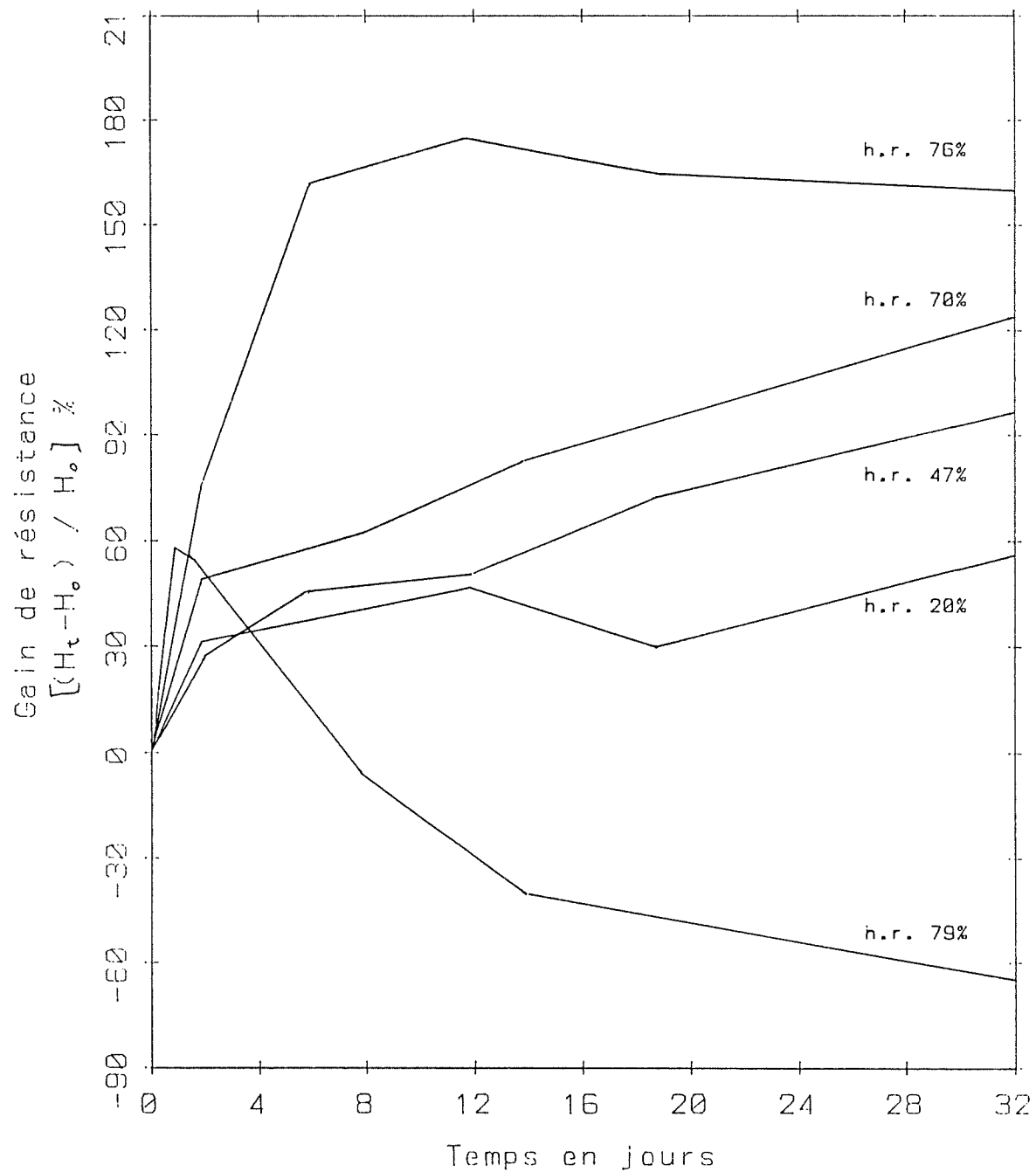


Figure II.14: Gain de résistance en tension de comprimés de halite exposés à différentes humidités ambiantes (d'après Lordi et Shiromani, 1984).

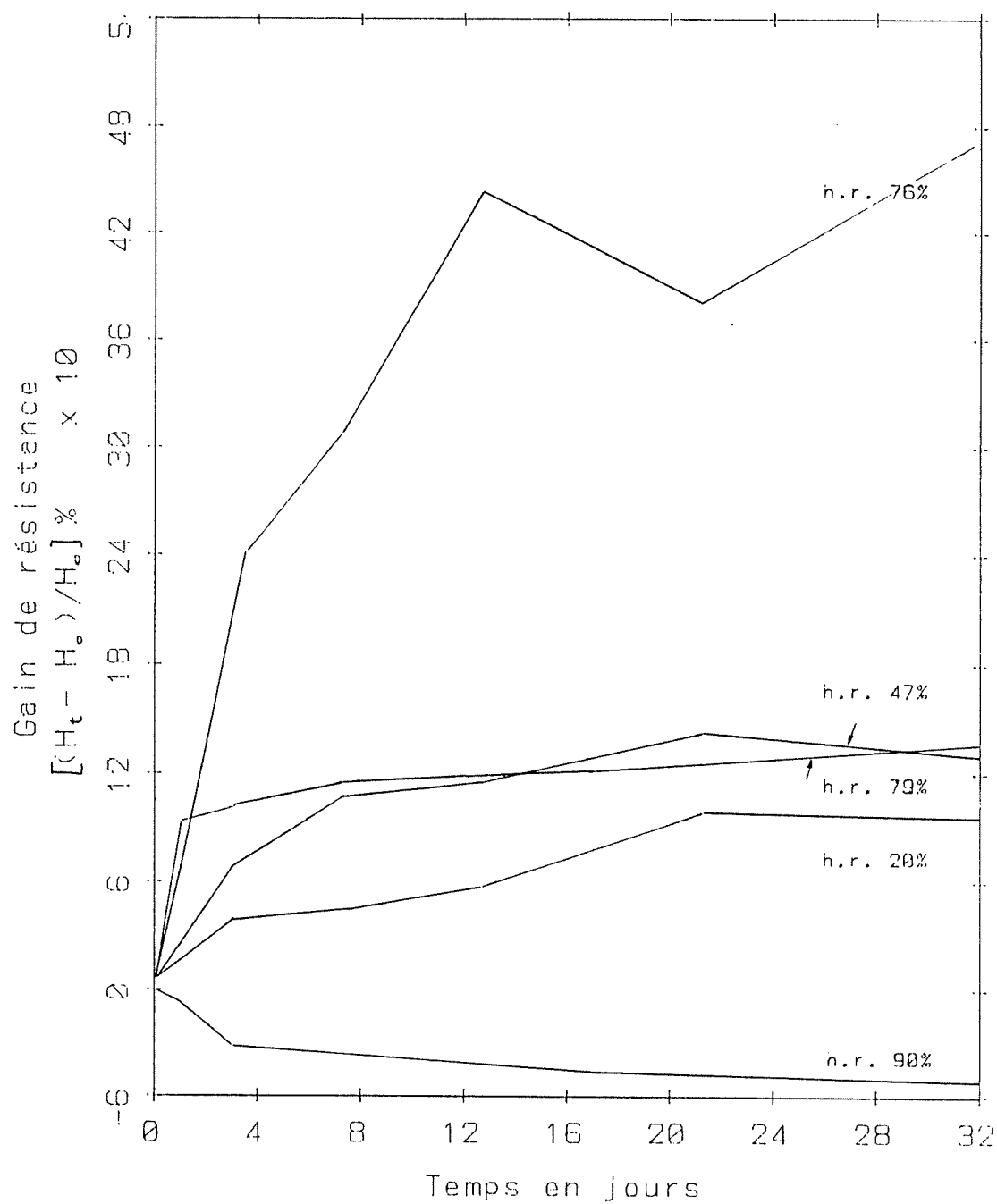


Figure II.15: Gain de résistance en tension de comprimés de sylvite exposés à différentes humidités ambiantes (d'après Lordi et Shiromani, 1984).

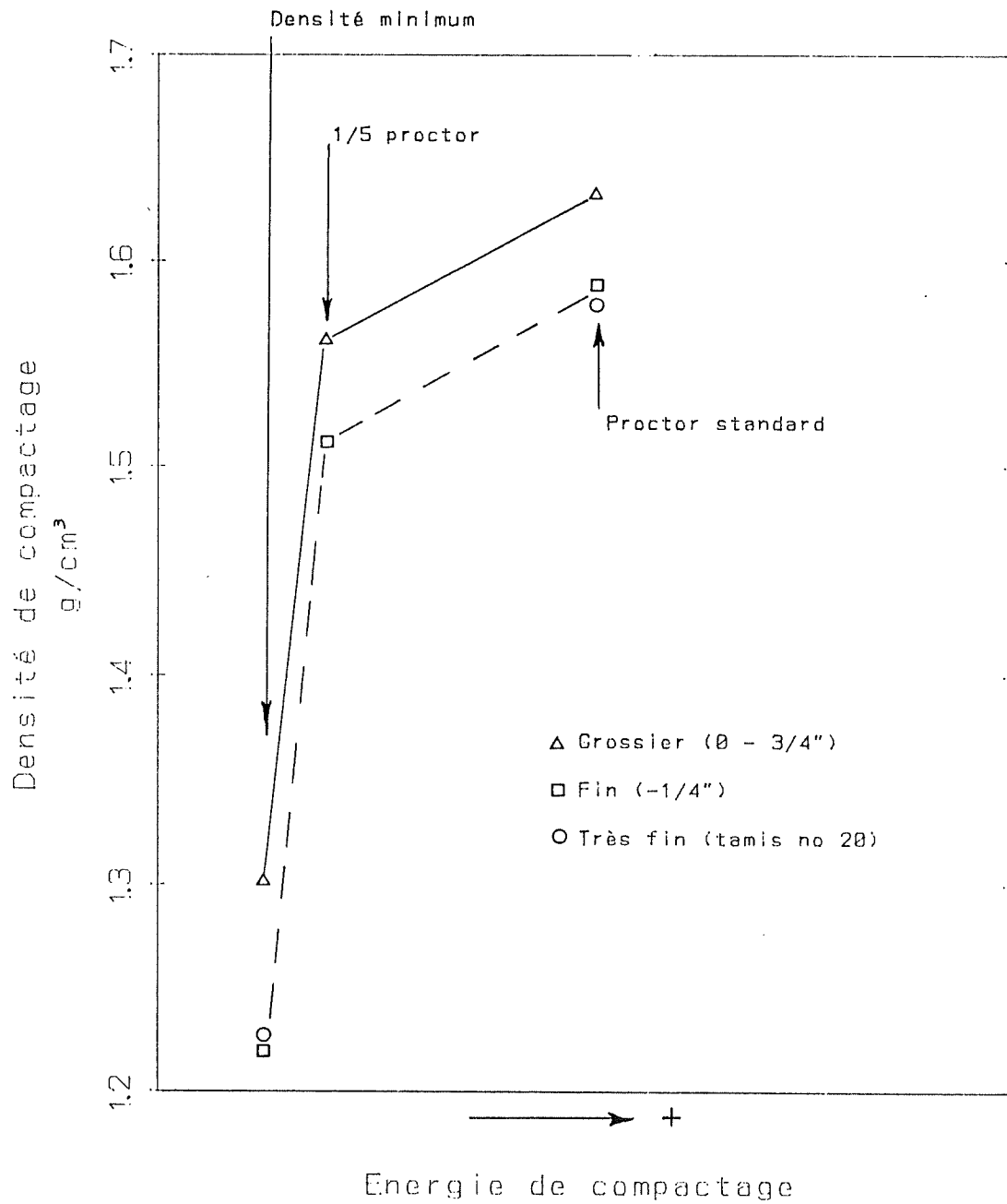


Figure II.16: Densité de compactage en fonction de l'énergie de compactage utilisée pour le sel meuble sec (d'après Withiam et al., 1984).

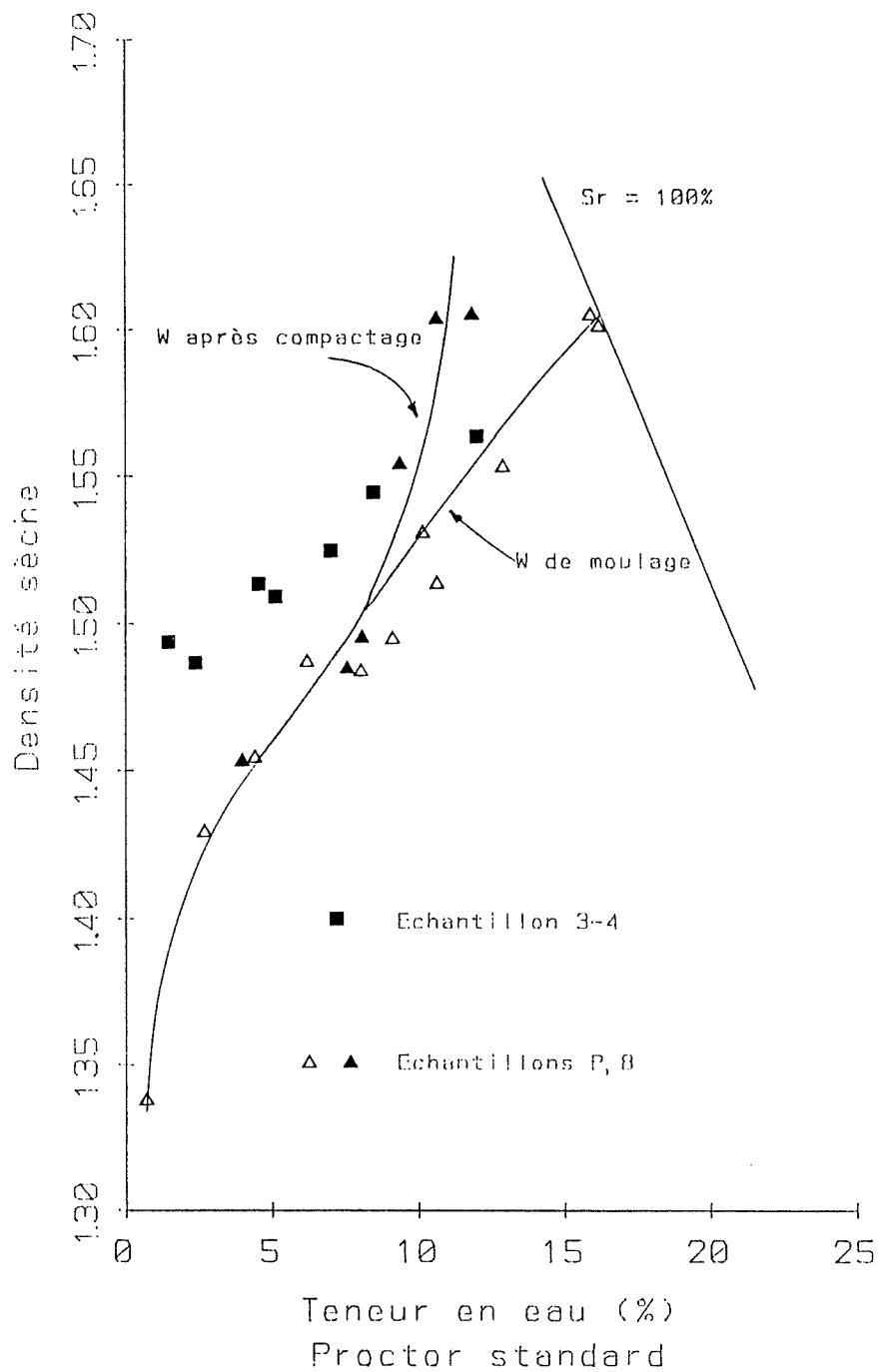


Figure II.17: Courbe de compactage pour des rejets de potasse, essai Proctor standard (d'après Pufahl et Yoshida, 1982).

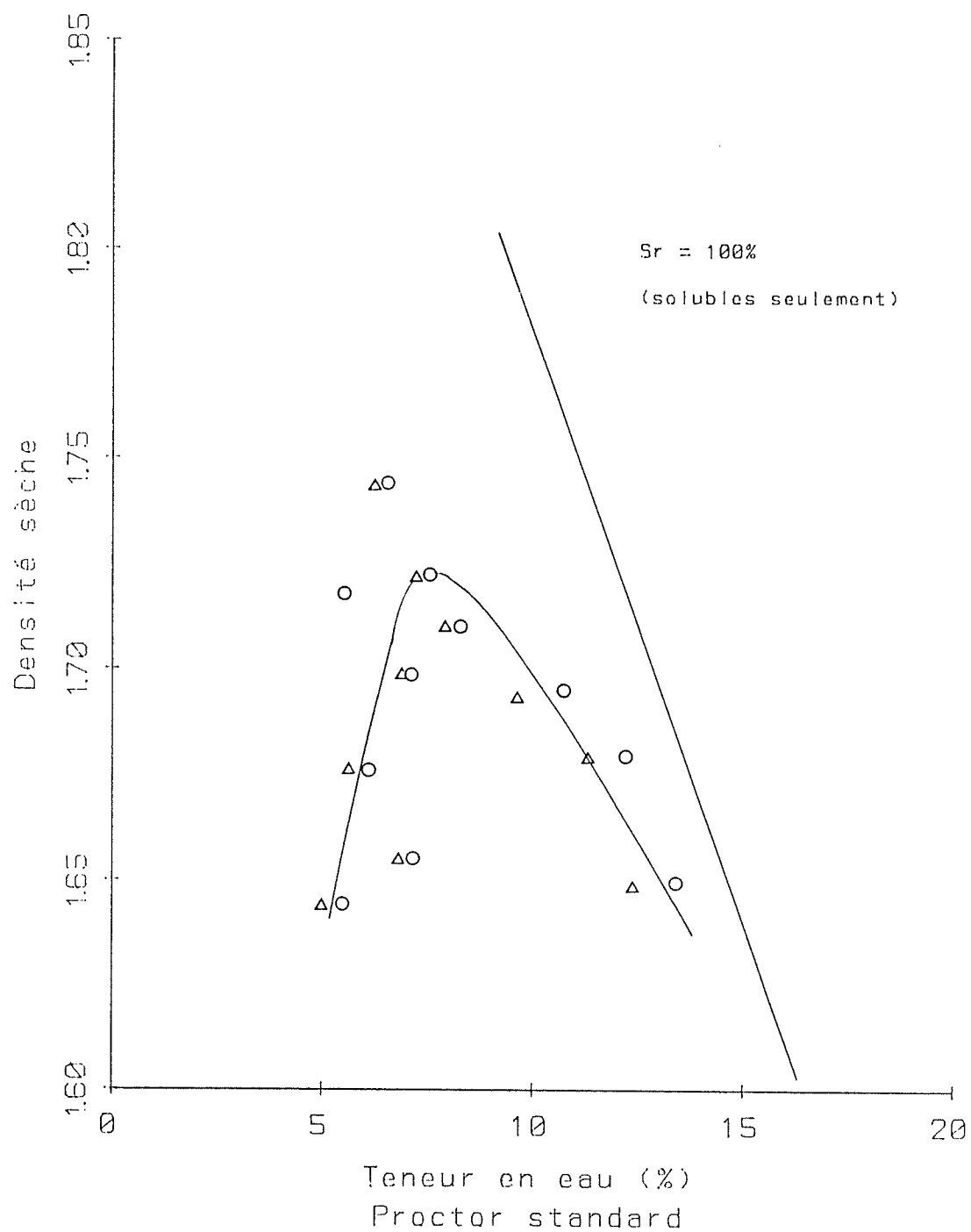


Figure II.18: Courbe de compactage pour des rejets de potasse contenant 10% d'insolubles, essai Proctor standard (d'après Pufahl et Yoshida, 1982).

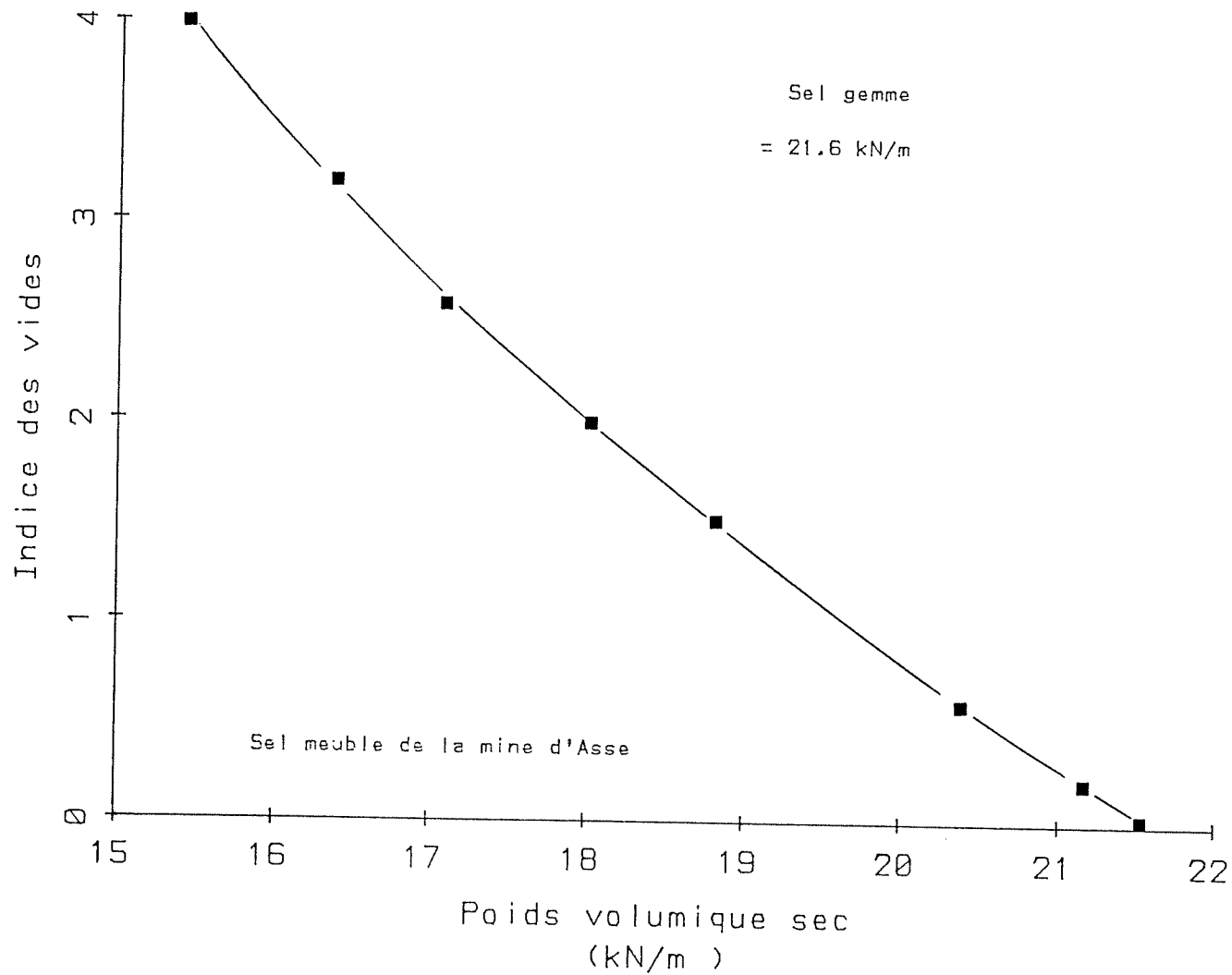


Figure II.19: Relation entre l'indice des vides et le poids volumique sec pour le sel meuble de la mine d'Asse (Liedtke et Bleich, 1985).

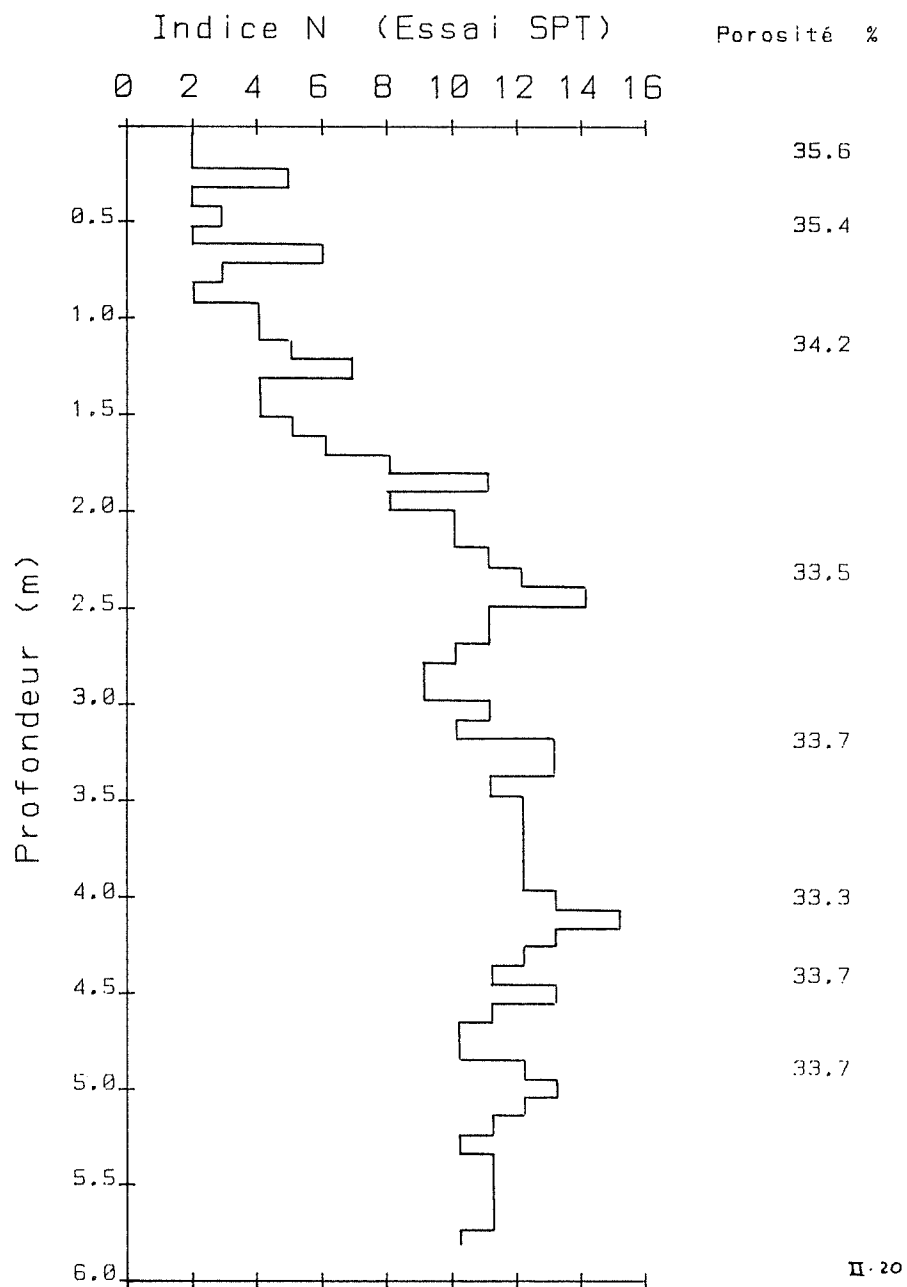


Figure II.20: Essai de pénétration standard (SPT) sur un remblai de sel meuble de la chambre 8a, niveau 532m de la mine d'Asse en Allemagne (Liedtke et Bleich, 1985).

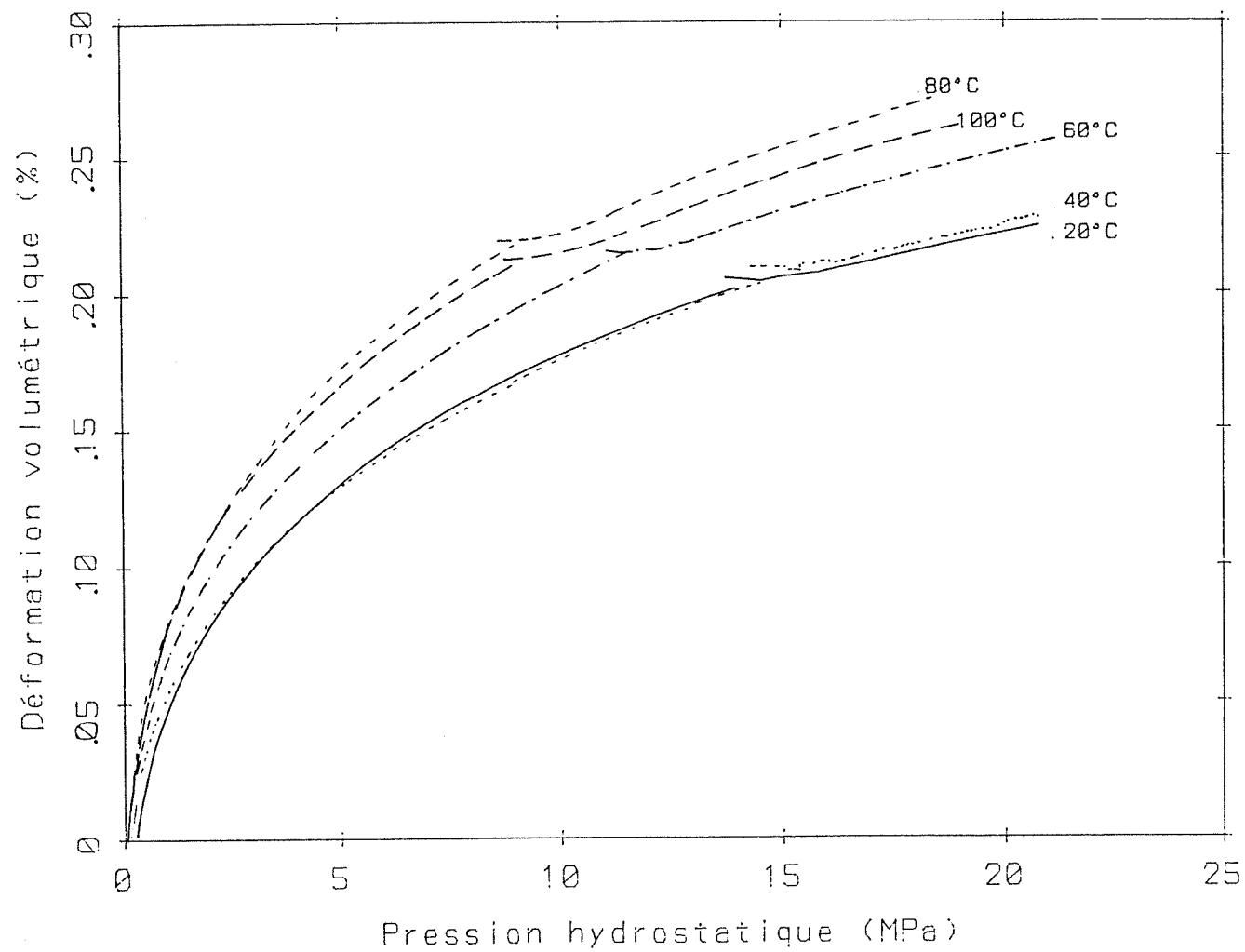


Figure II.21: Courbes contrainte-déformation pour des essais de compression hydrostatique sur le sel meuble sec à différentes températures (Holcomb et Hannum, 1982).

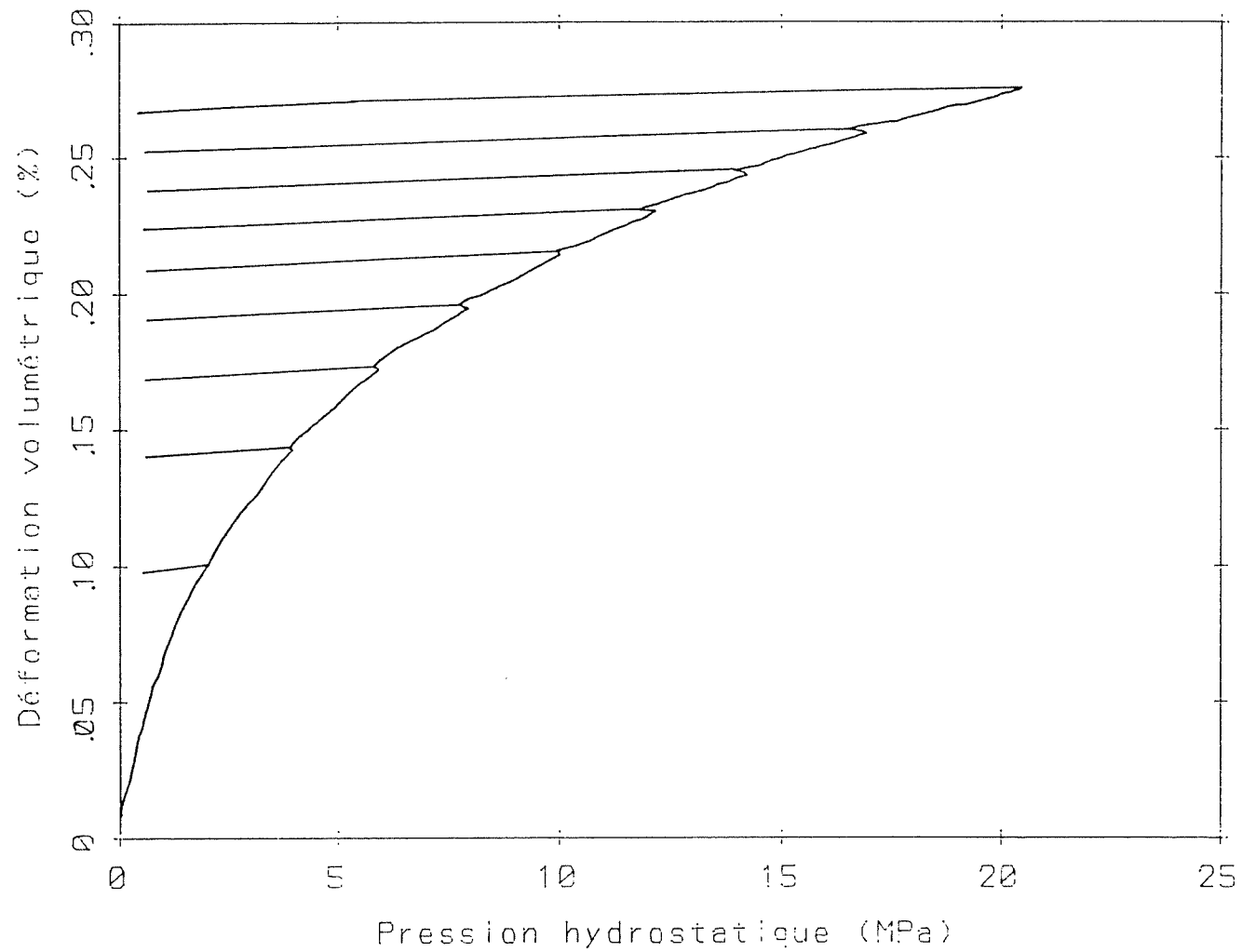


Figure II.22: Courbe contrainte-déformation avec cycles de déchargement et rechargement pour le sel meuble sec en compression hydrostatique (Holcomb et Hannum, 1982).

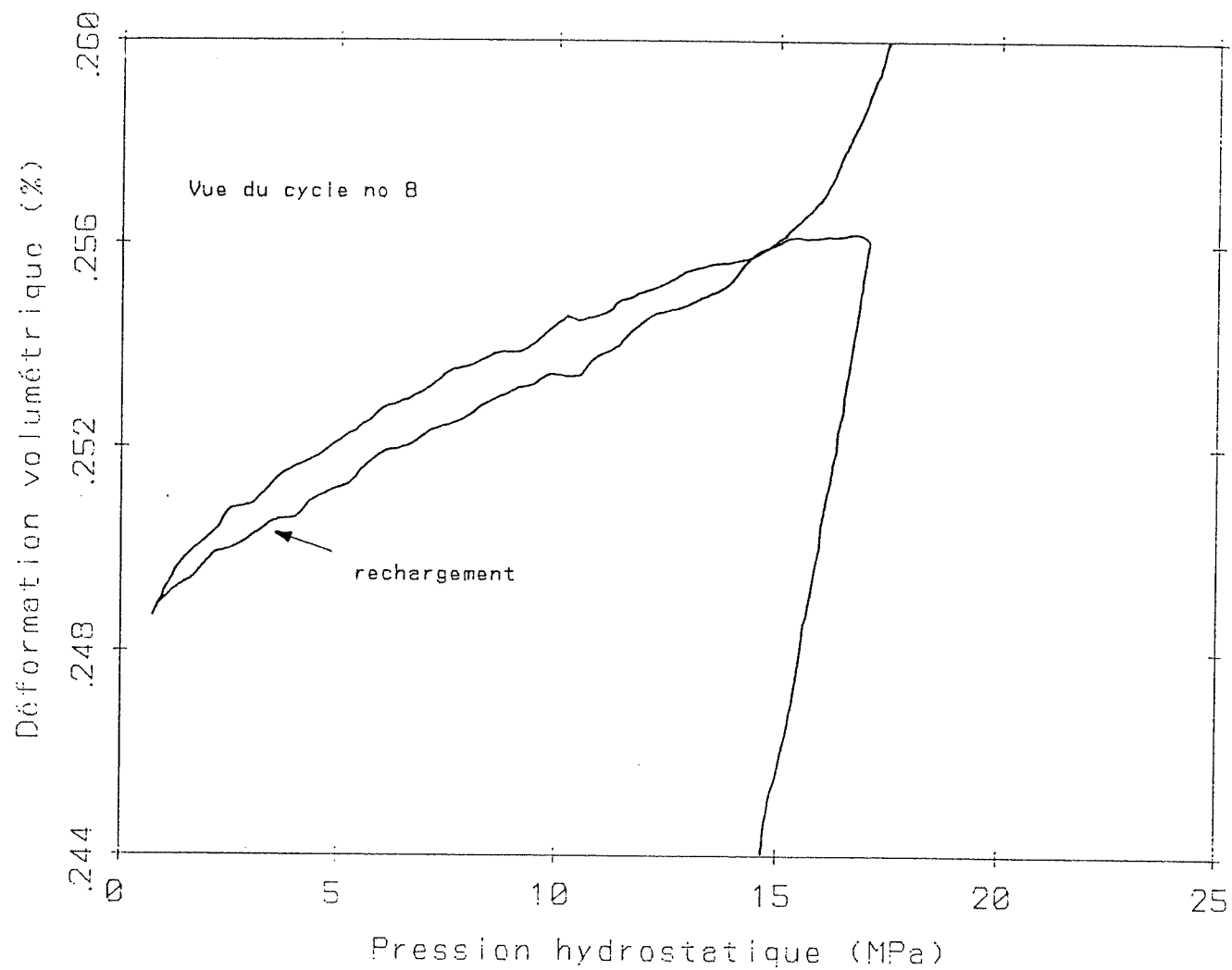


Figure II.23: Agrandissement du cycle No 8 de la courbe présentée à la Figure II.22 (Holcomb et Hannum, 1982).

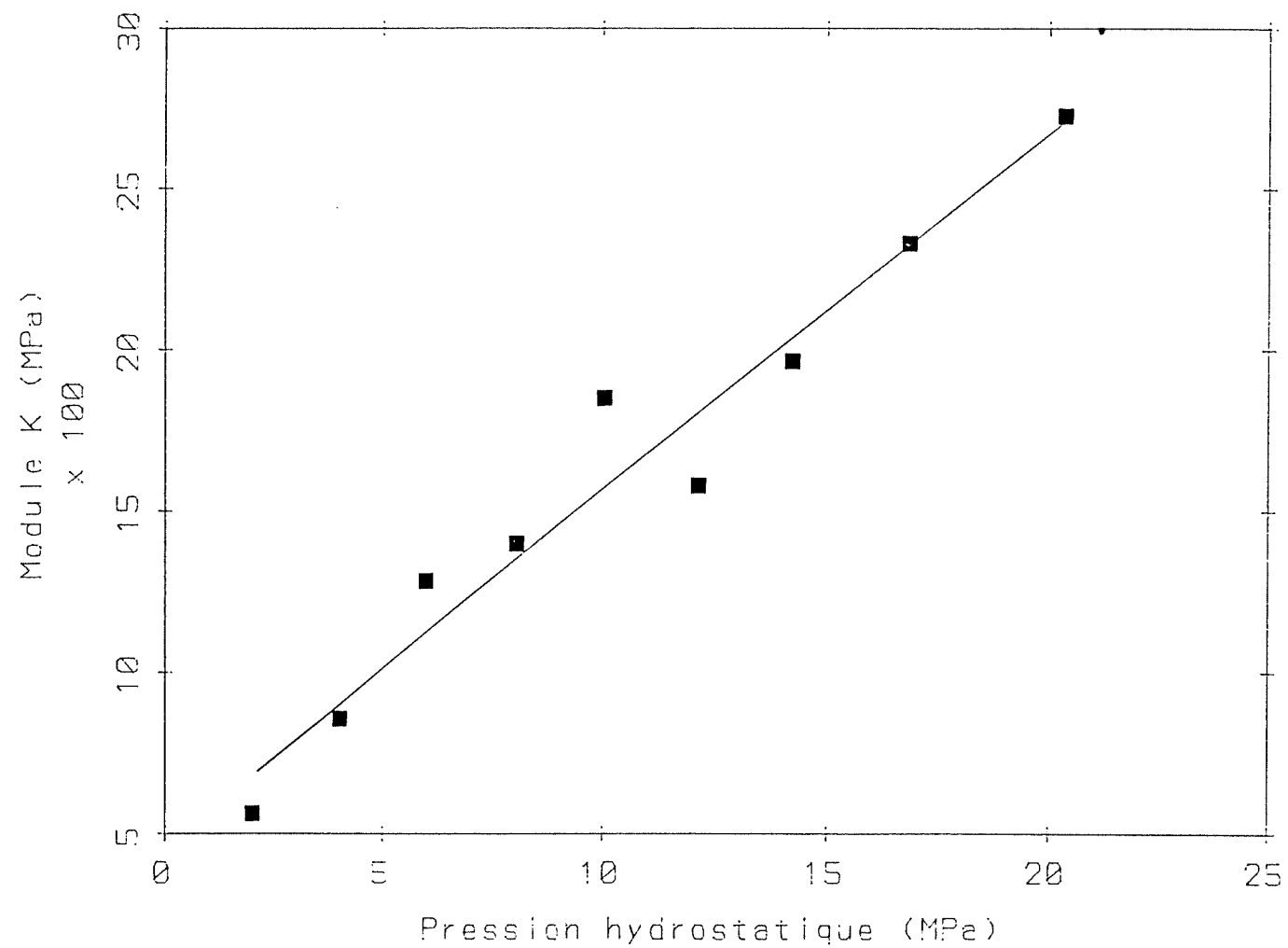


Figure II.24: Variation du module de compressibilité K en fonction de la charge appliquée pour un essai de compression hydrostatique (Holcomb et Hannum, 1982).

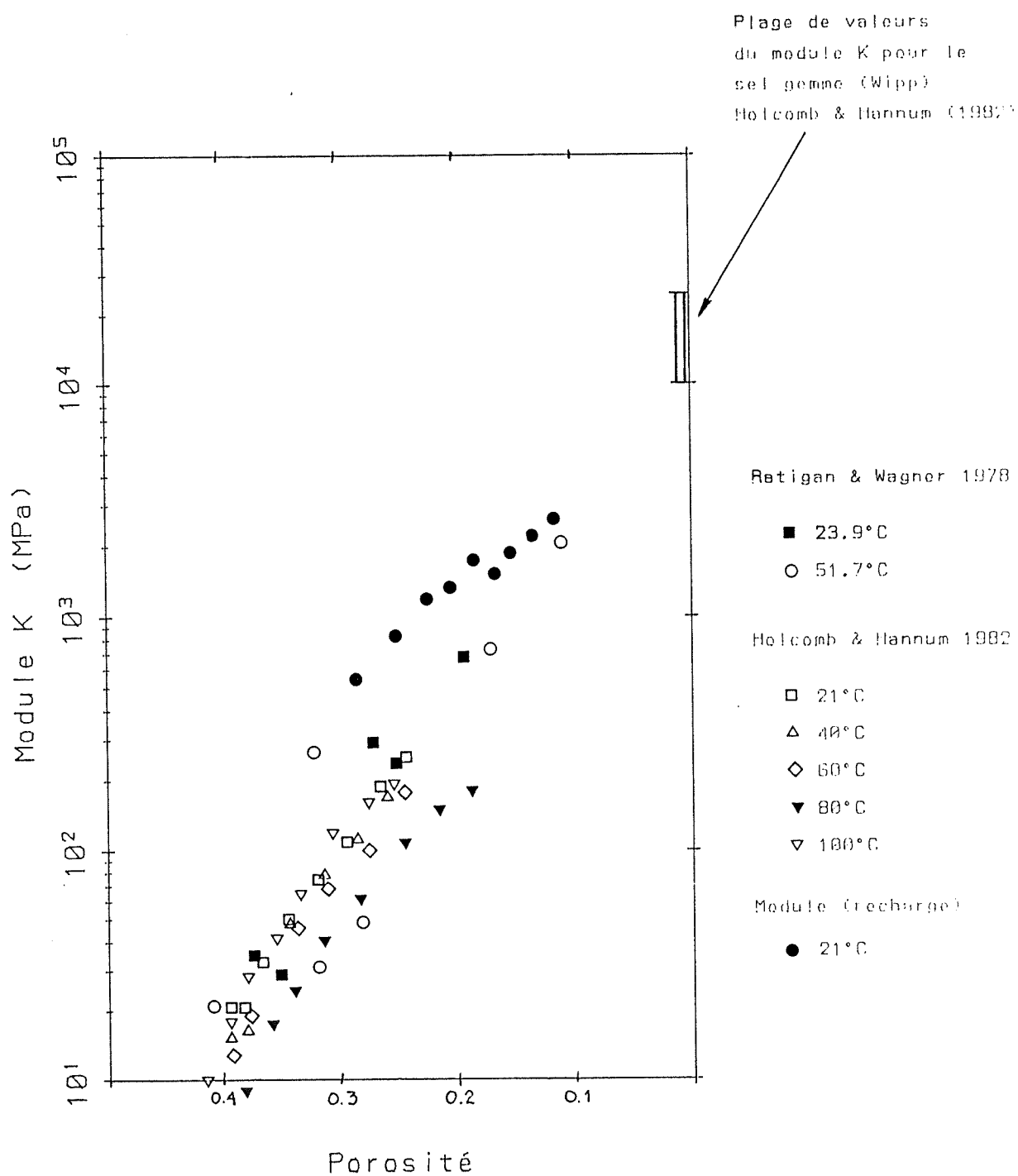


Figure II.25: Variation du module de compressibilité K en fonction de la porosité (IT Corporation, 1984).

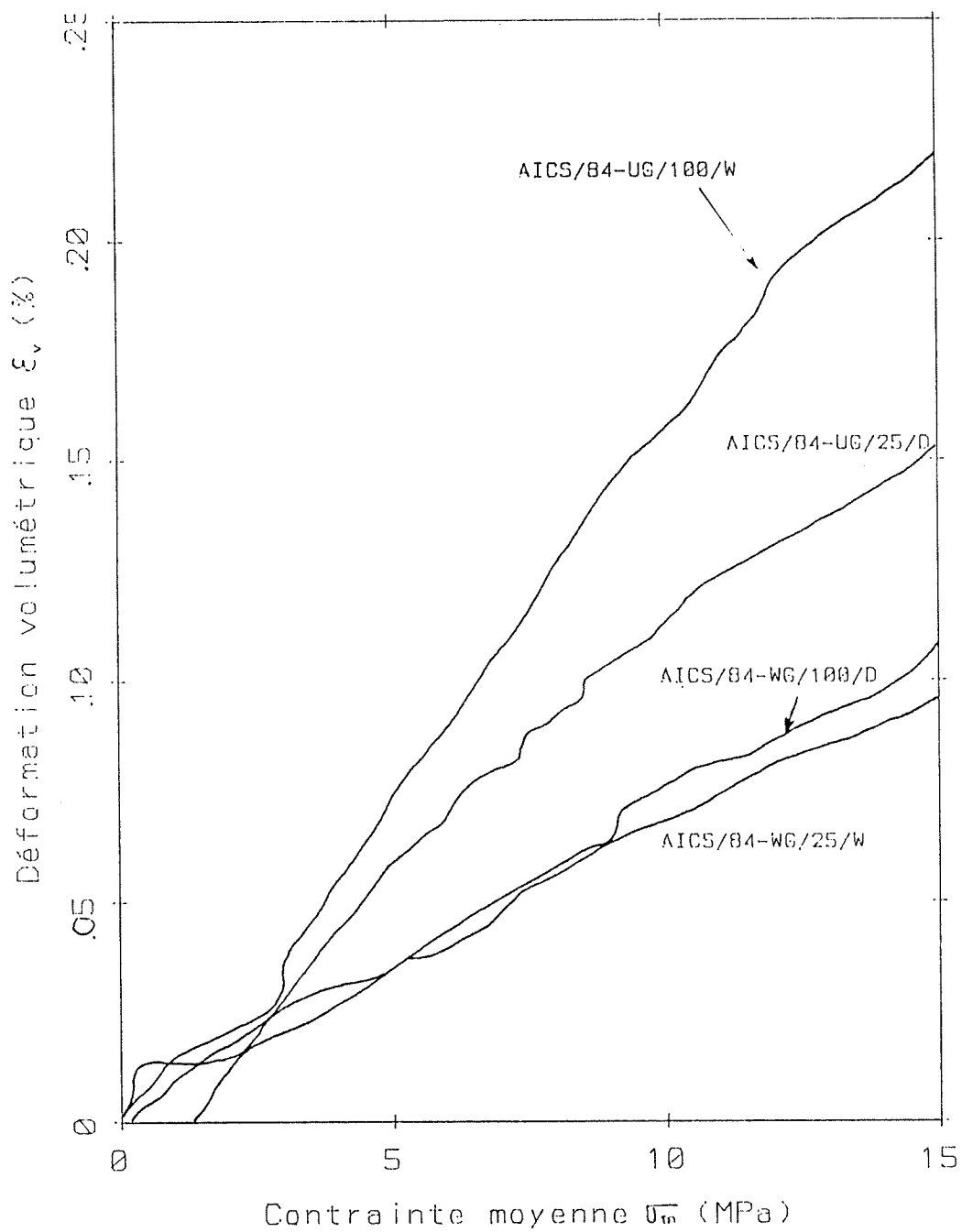


Figure II.26: Courbes contrainte-déformation pour le sel meuble en compression hydrostatique. Code d'identification: UG pour $C_u=1$, WG pour $C_u=8$, D pour sec, W pour saturé, 25 ou 100 pour la température en degrés Celsius (Pfeifle et al., 1987).

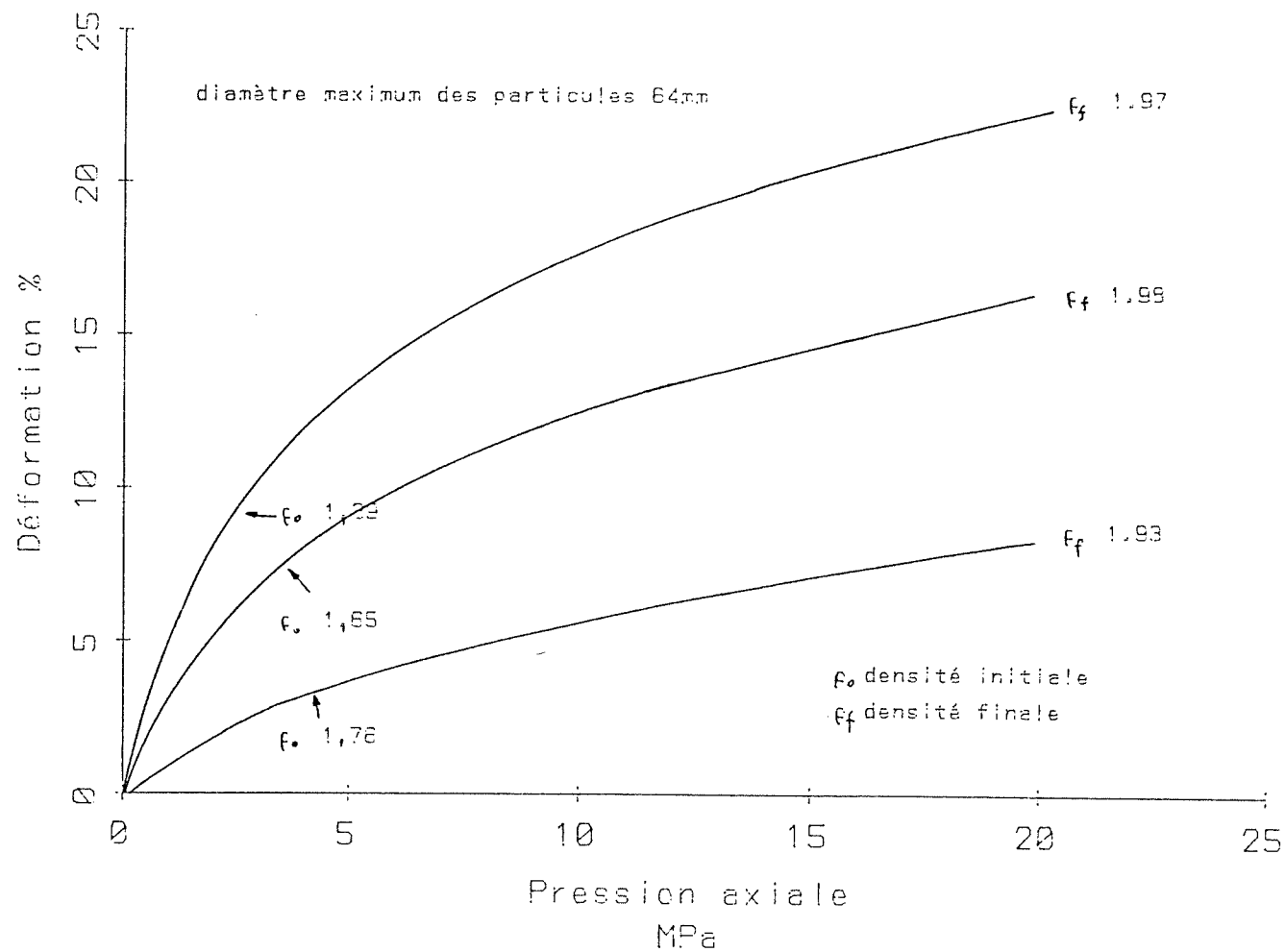


Figure II.27: Courbe contrainte-déformation du sel meuble à sec de la mine d'Asse en compression confinée pour différentes densités initiales (Kappei et Gessler, 1984).

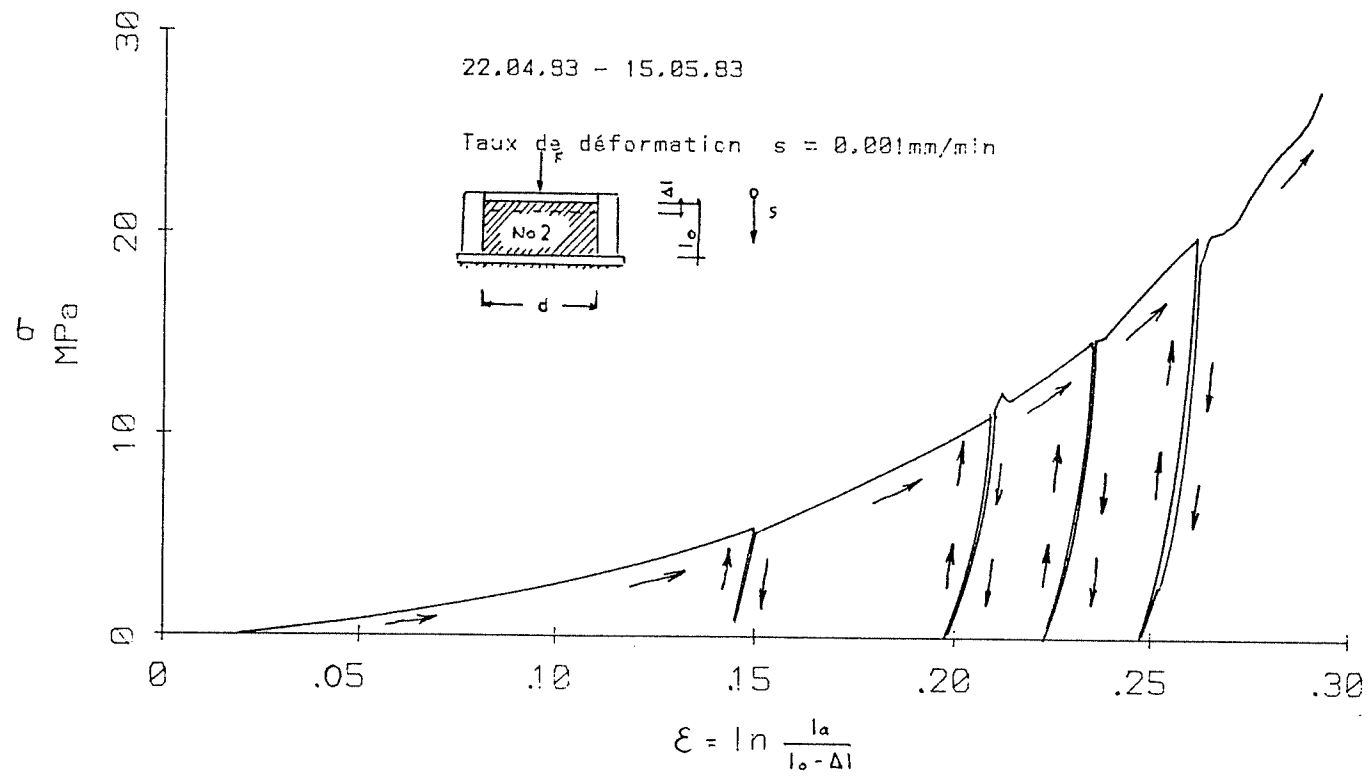


Figure II.28: Essai de compression confinée avec cycle de déchargement et chargement pour le sel meuble sec de la mine d'Asse (Liedtke et Bleich, 1985).

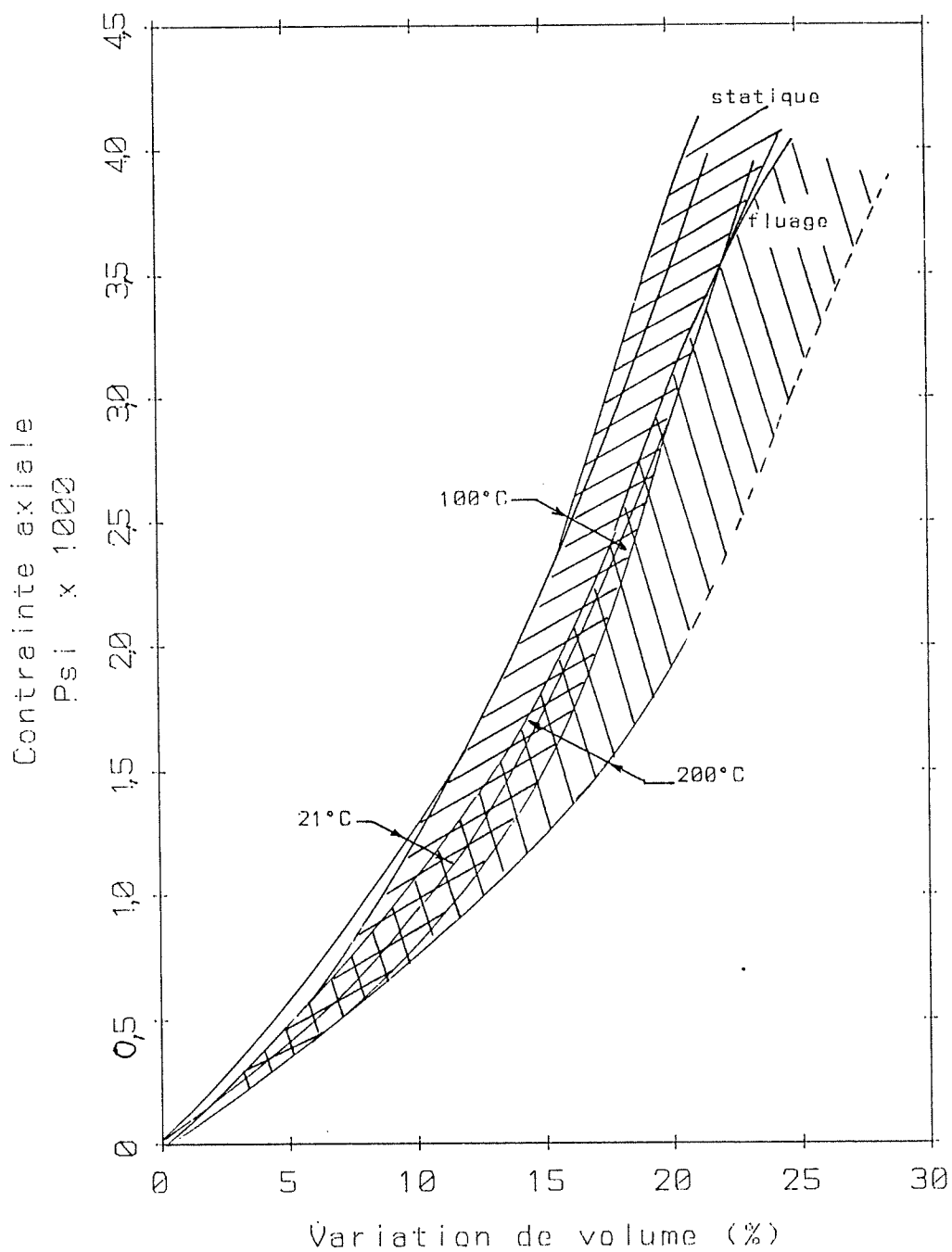


Figure II.29: Effet de la température sur les courbes contrainte-déformation du sel meuble sec en compression confinée (Hansen, 1976).

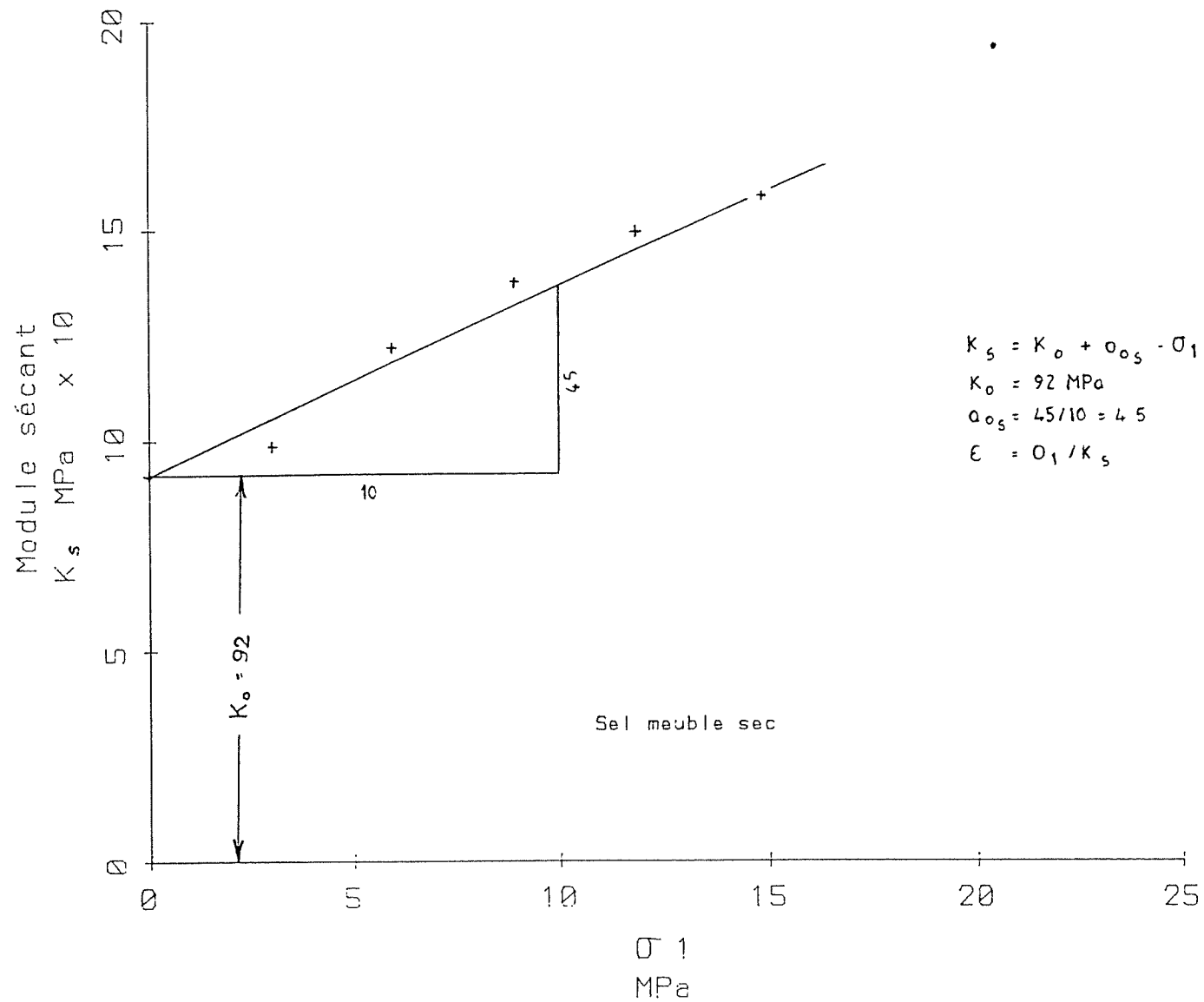


Figure II.30: Variation du module de compressibilité sécant du sel meuble sec en fonction de la contrainte axiale en compression confinée (Liedtke et Bleich, 1985).

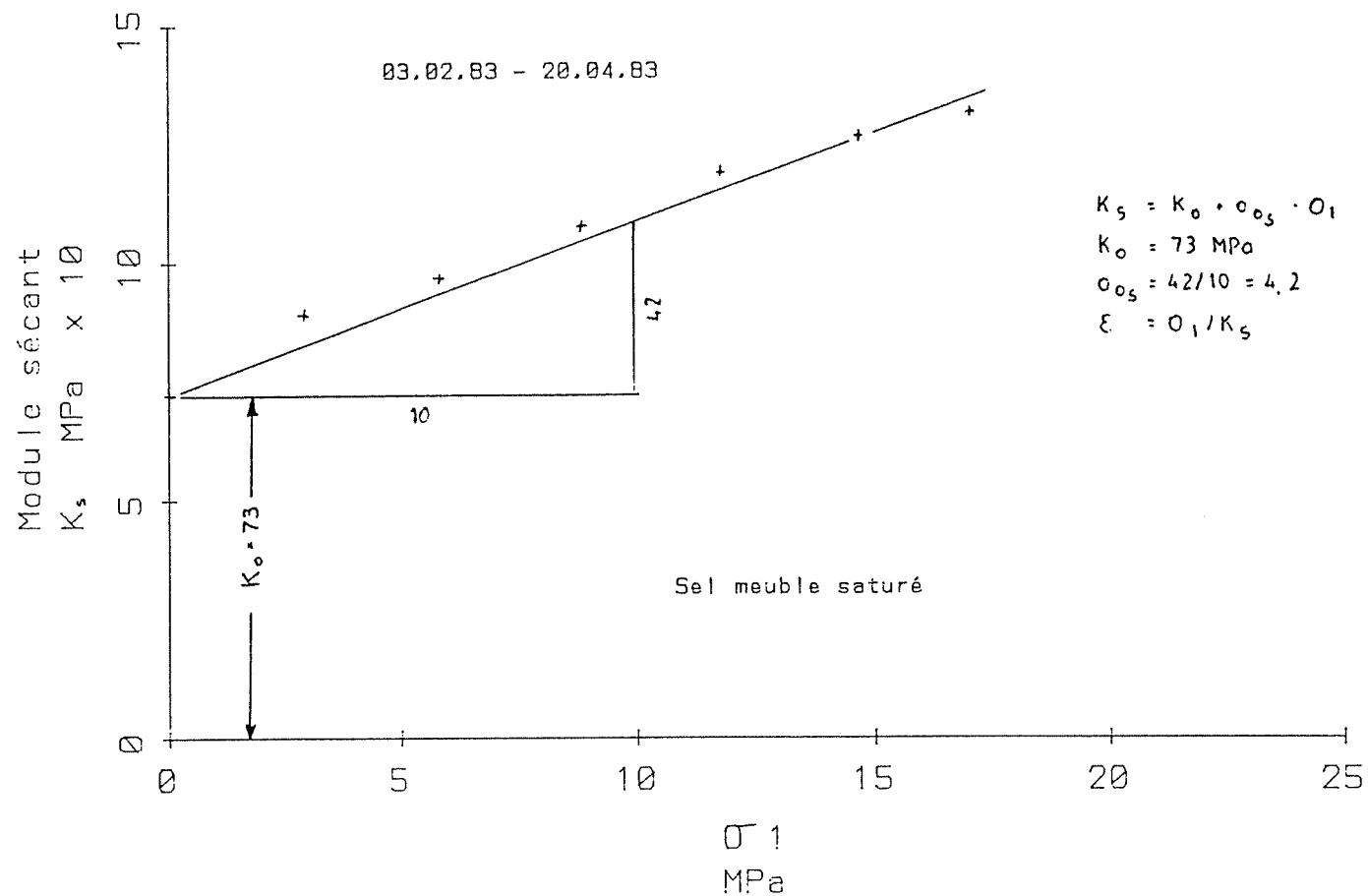


Figure II.31: Variation du module de compressibilité sécant du sel meuble saturé en fonction de la contrainte axiale en compression confinée (Liedtke et Bleich, 1985).

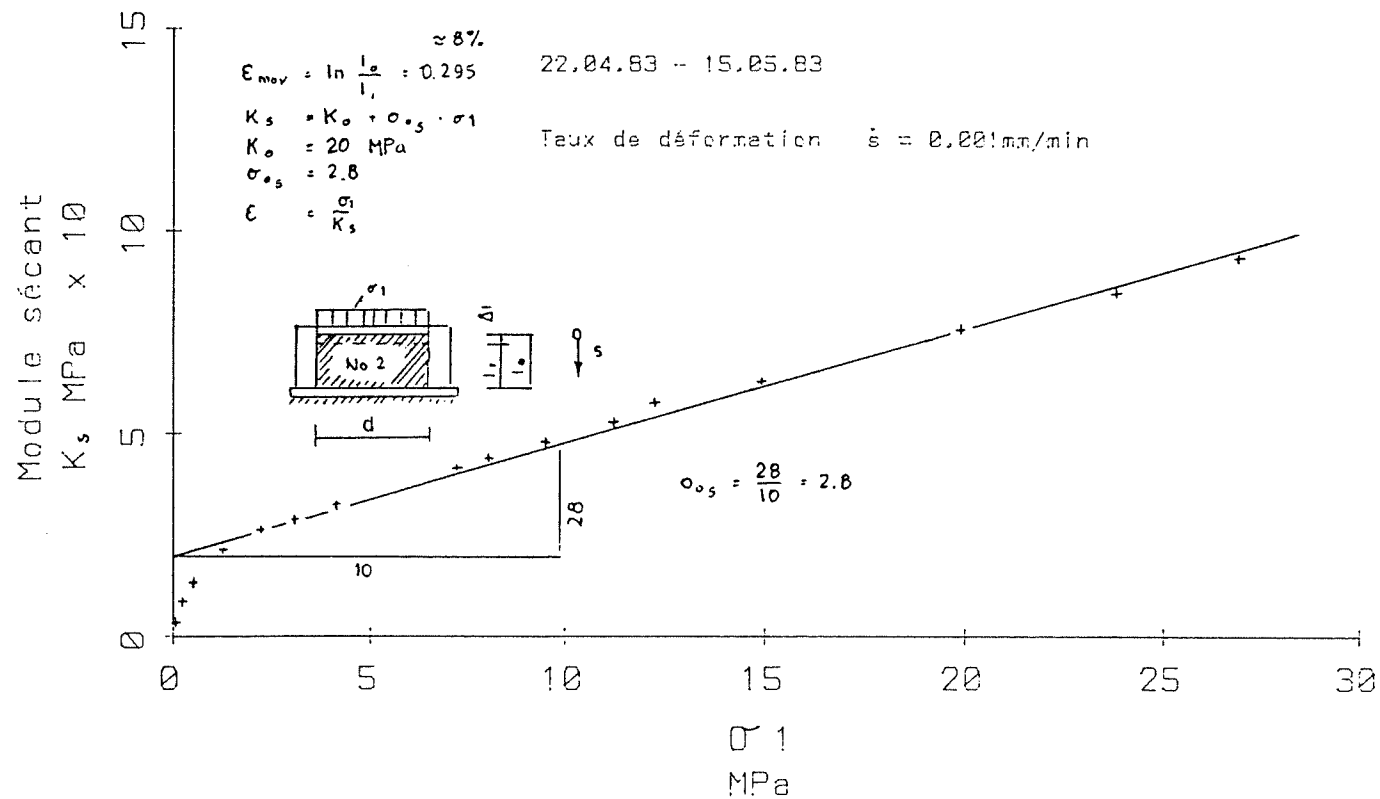


Figure II.32: Variation du module de compressibilité sécant du sel meuble saturé en fonction de la contrainte axiale en compression confinée pour un taux de déformation contrôlé de 0.0001 mm/min (Liedtke et Bleich, 1985).

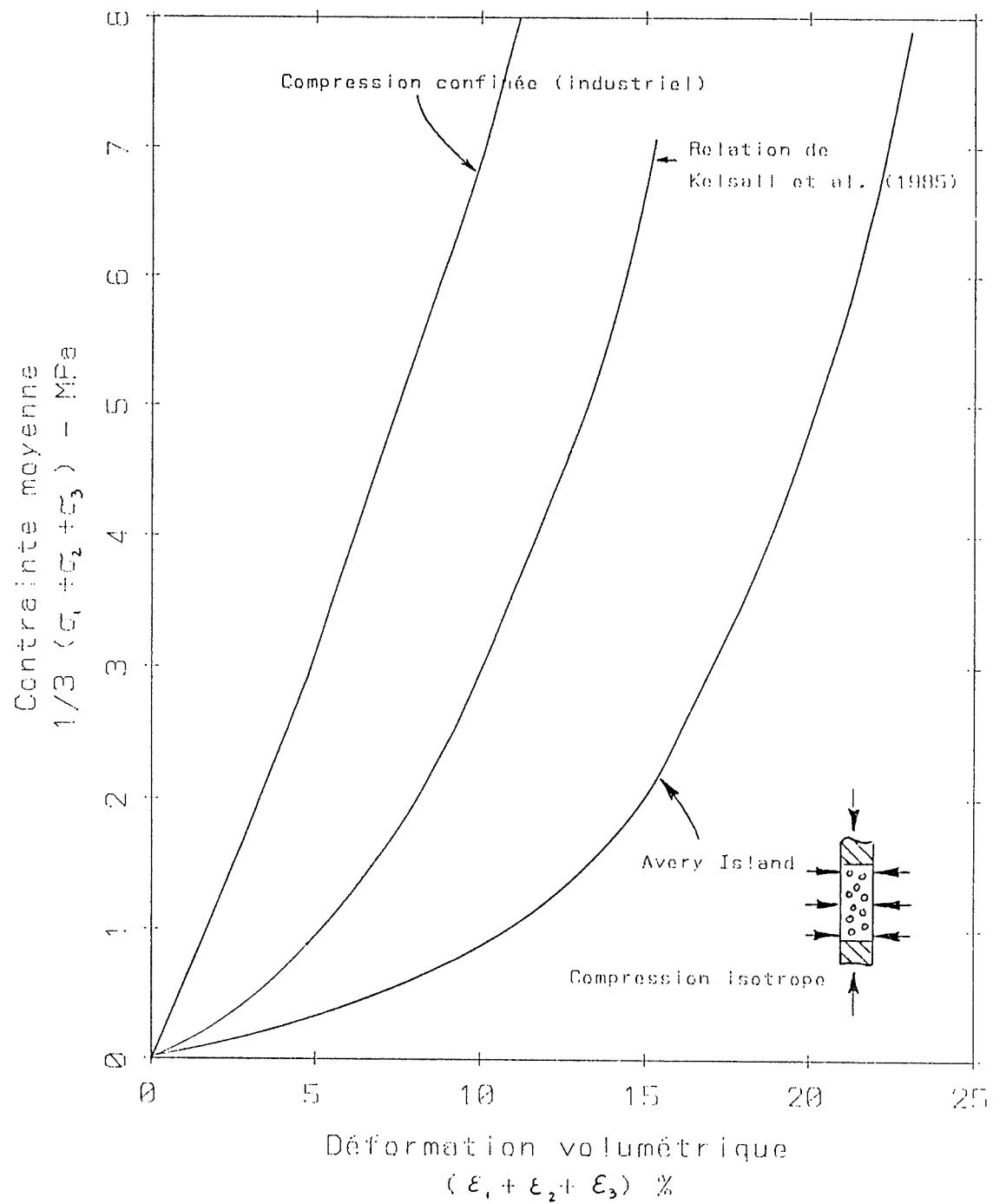


Figure II.33: Courbe contrainte-déformation pour le sel meuble sec en compression confinée et hydrostatique. Courbe représentant le modèle empirique de Kelsall et al., 1985.

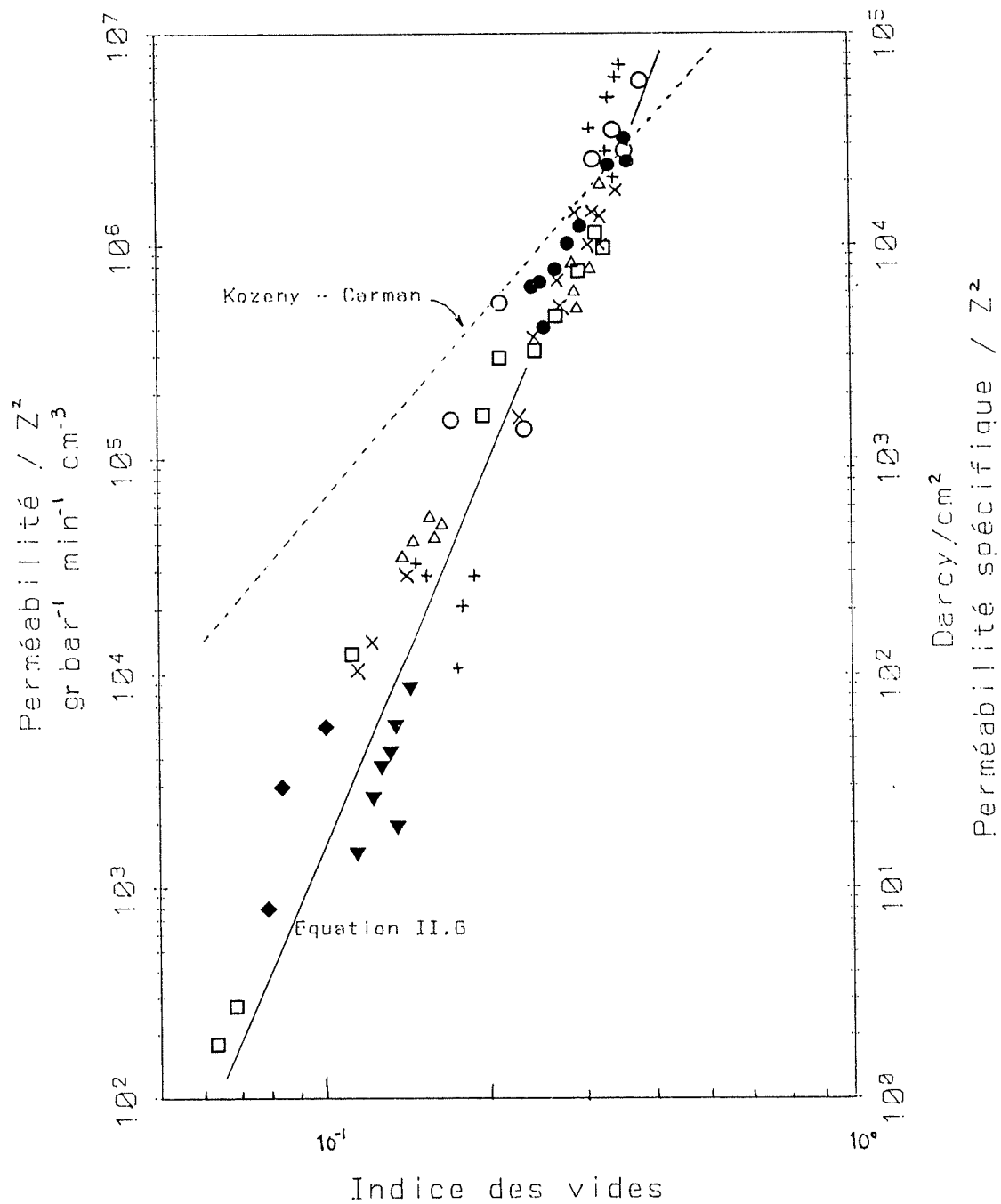


Figure II.34: Perméabilité du sel meuble en fonction de l'indice des vides pour l'eau saturée en sel. Le trait plein représente la relation de Shor et al, 1981 et le trait en pointillé, la relation de Kozeny-Carman.

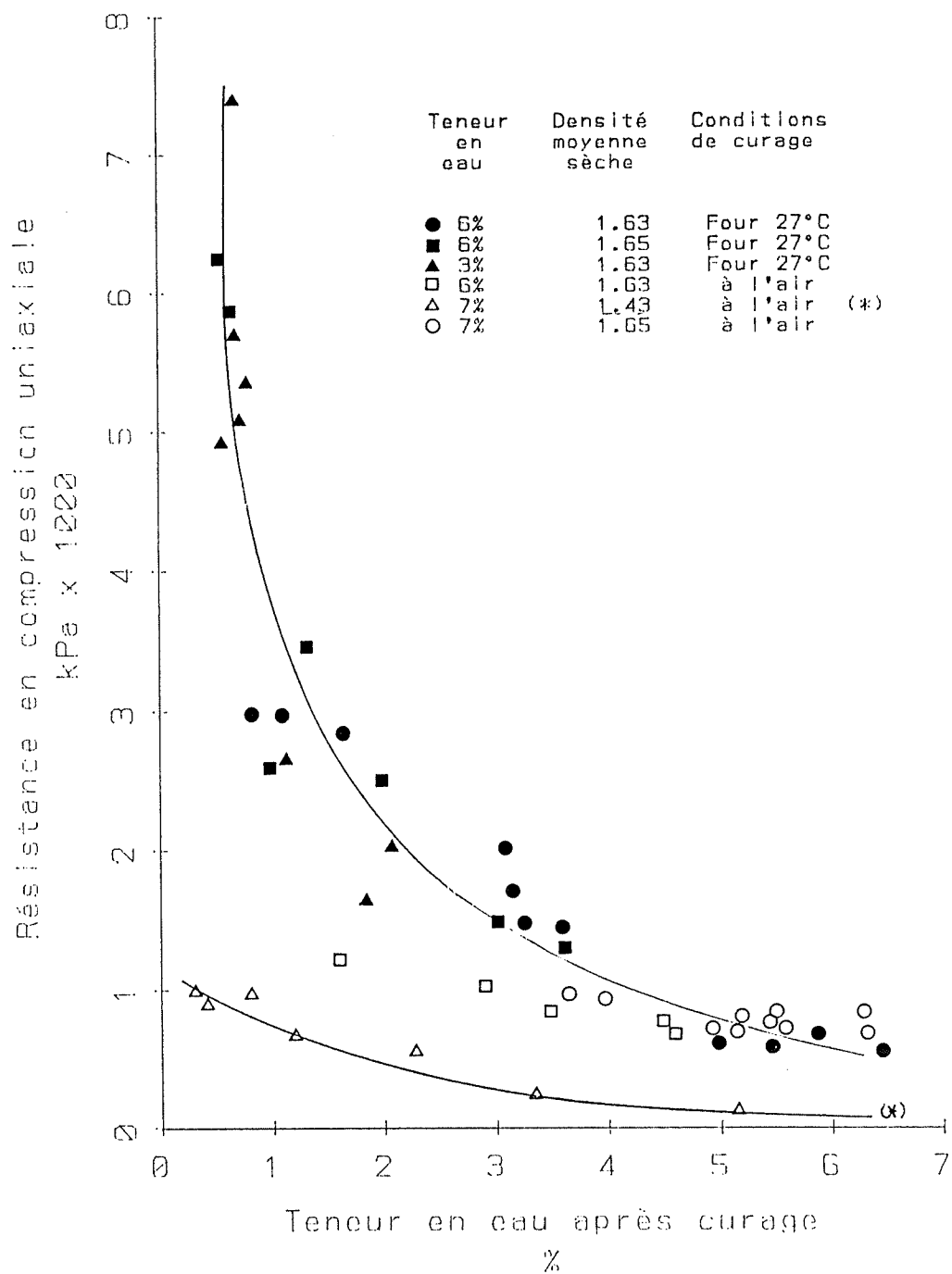


Figure II.35: Résistance en compression uniaxiale des rejets de potasse en fonction de la teneur en eau après curage suivant deux modes différents (Pufahl et Yoshida, 1982).

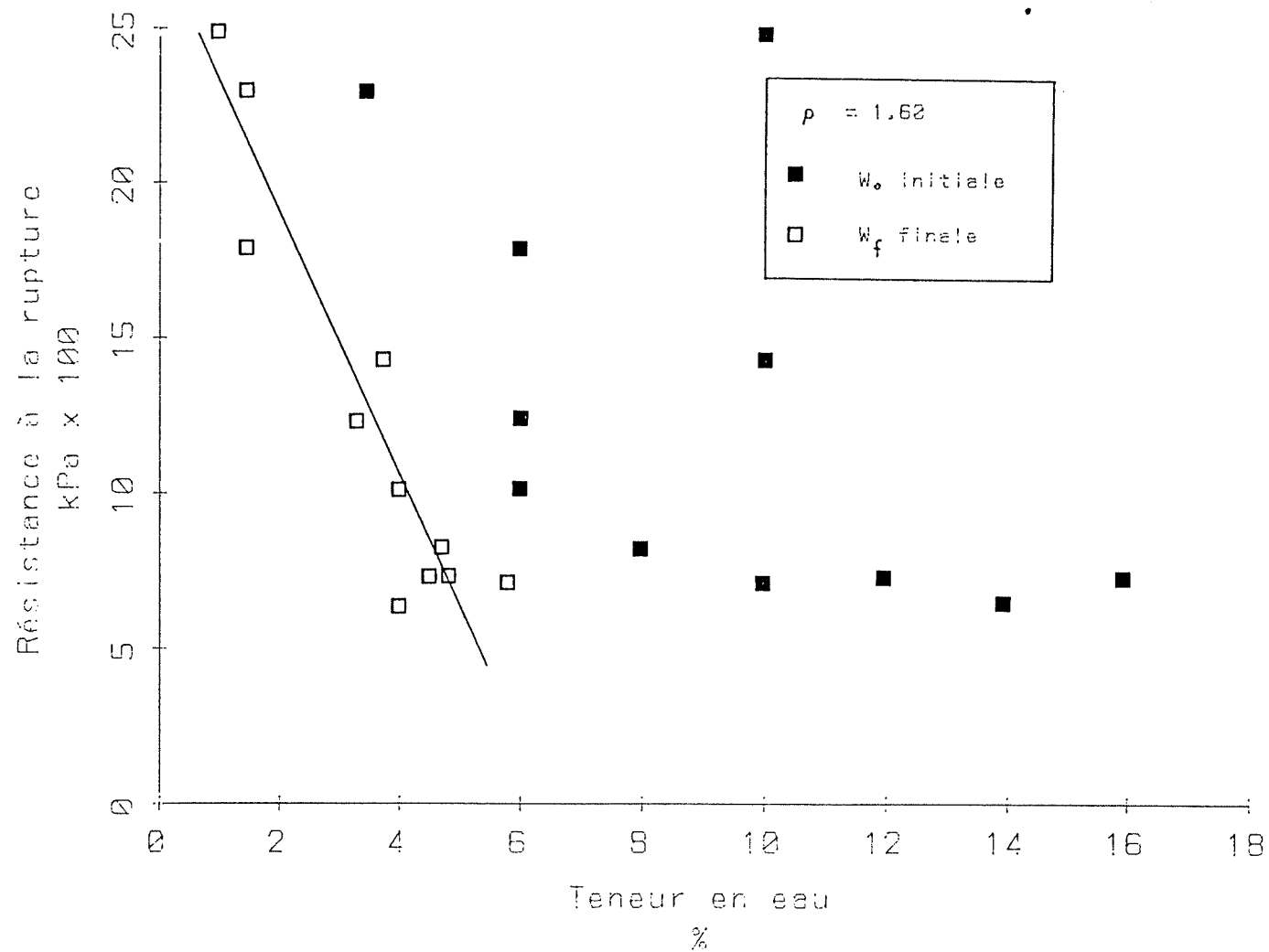


Figure II.36: Résistance en compression uniaxiale en fonction de la teneur en eau avant et après curage des rejets de potasse (Pufahl et Yoshida, 1982).

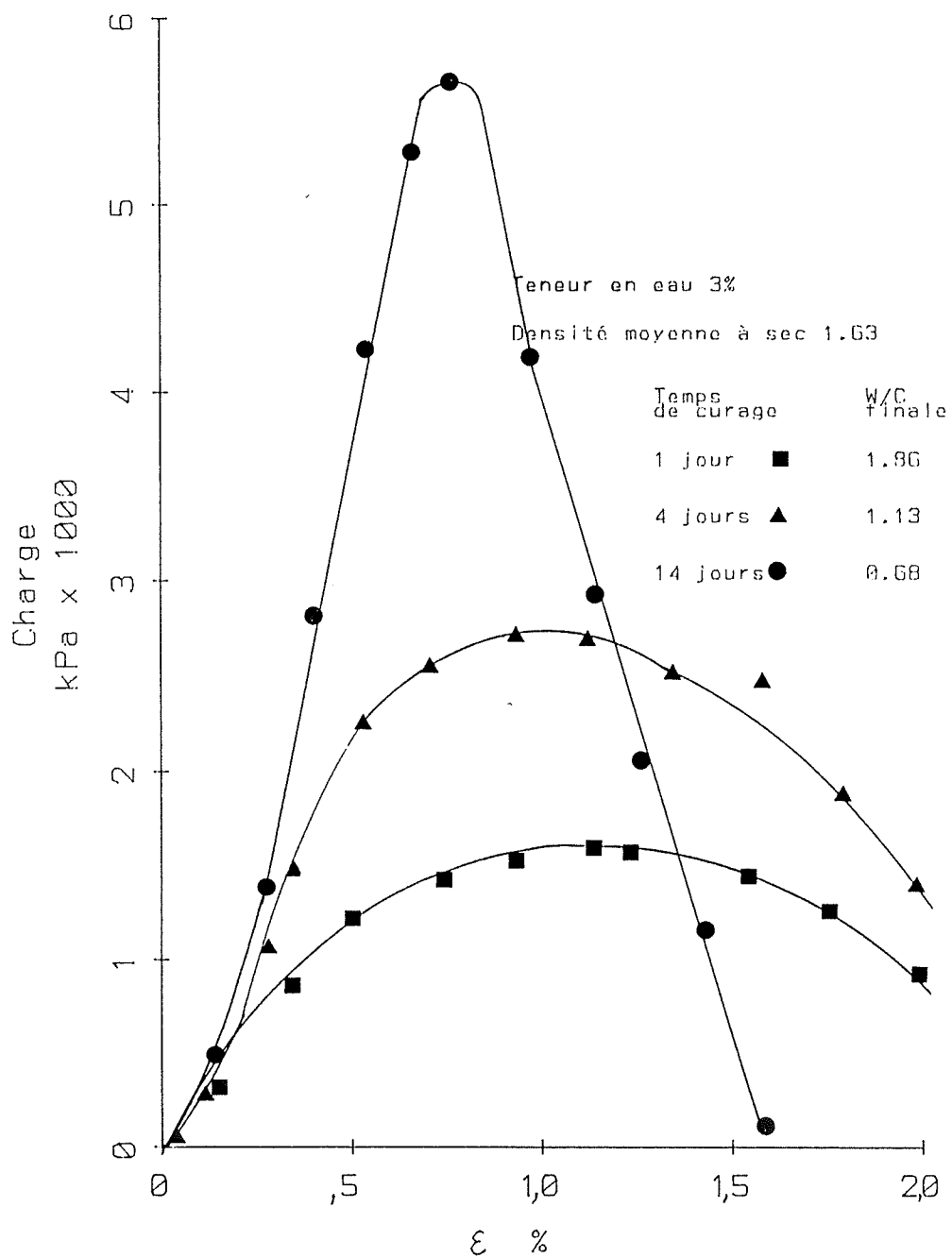


Figure II.37: Courbes contrainte-déformation pour les rejets de potasse après différents temps de curage à teneur en eau initiale donnée (Pufahl et Yoshida, 1982).

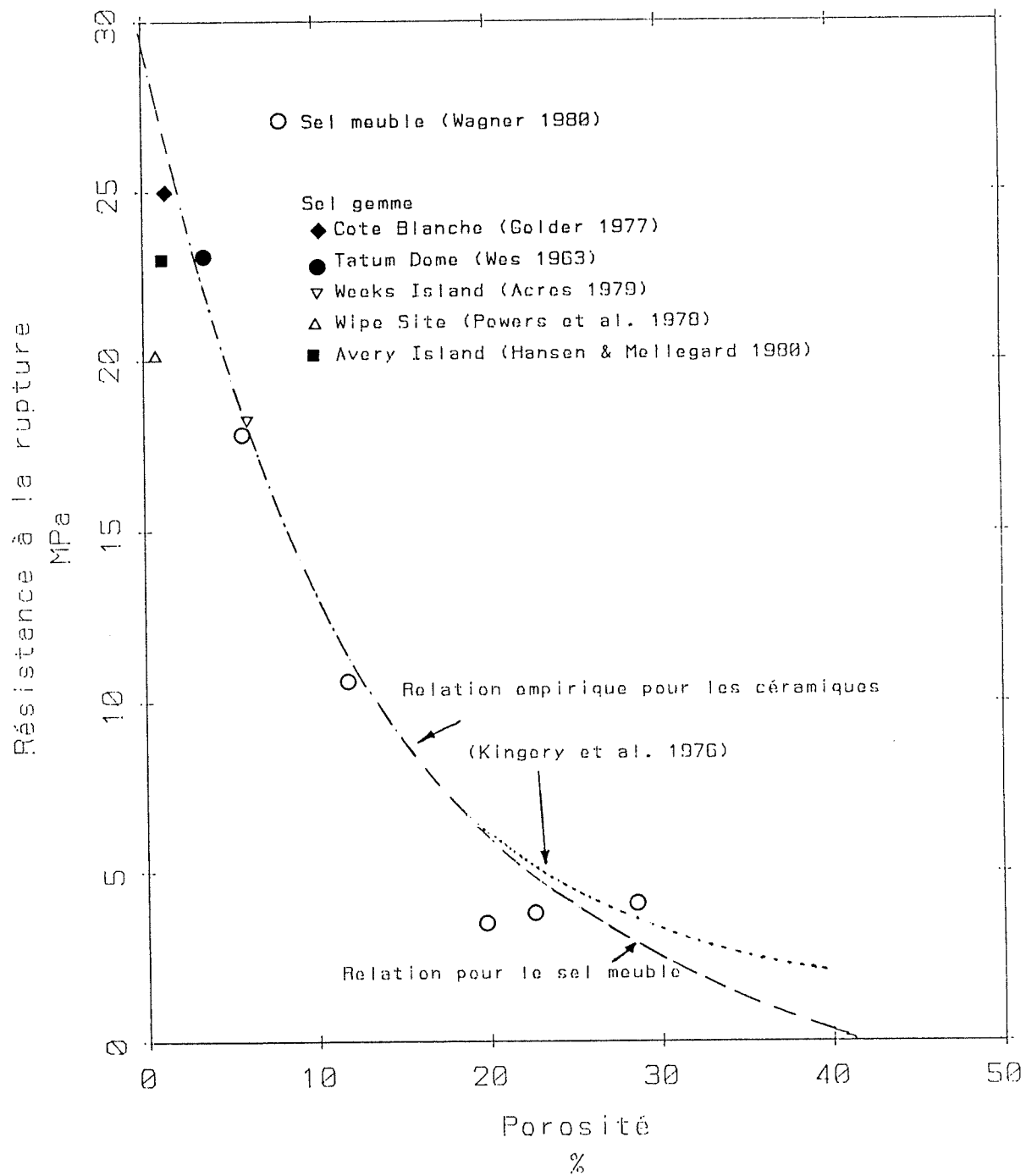


Figure II.38: Résistance à la rupture en compression uniaxiale en fonction de la porosité pour le sel meuble (Wagner, 1980).

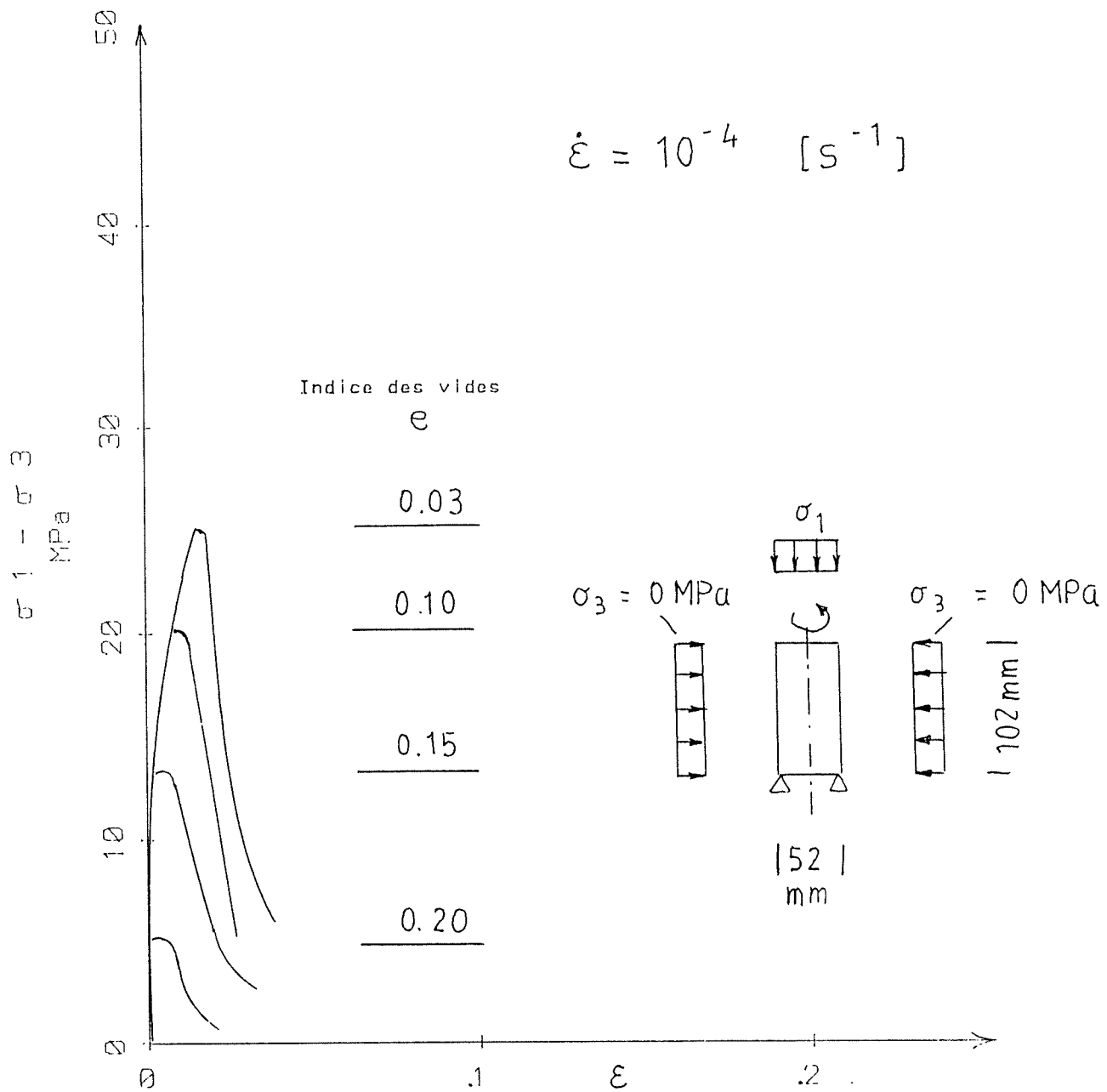


Figure II.39: Courbes contrainte-déformation en compression uniaxiale du sel meuble pour différents indices des vides à pression de confinement nulle (Liedtke et Bleich, 1985).

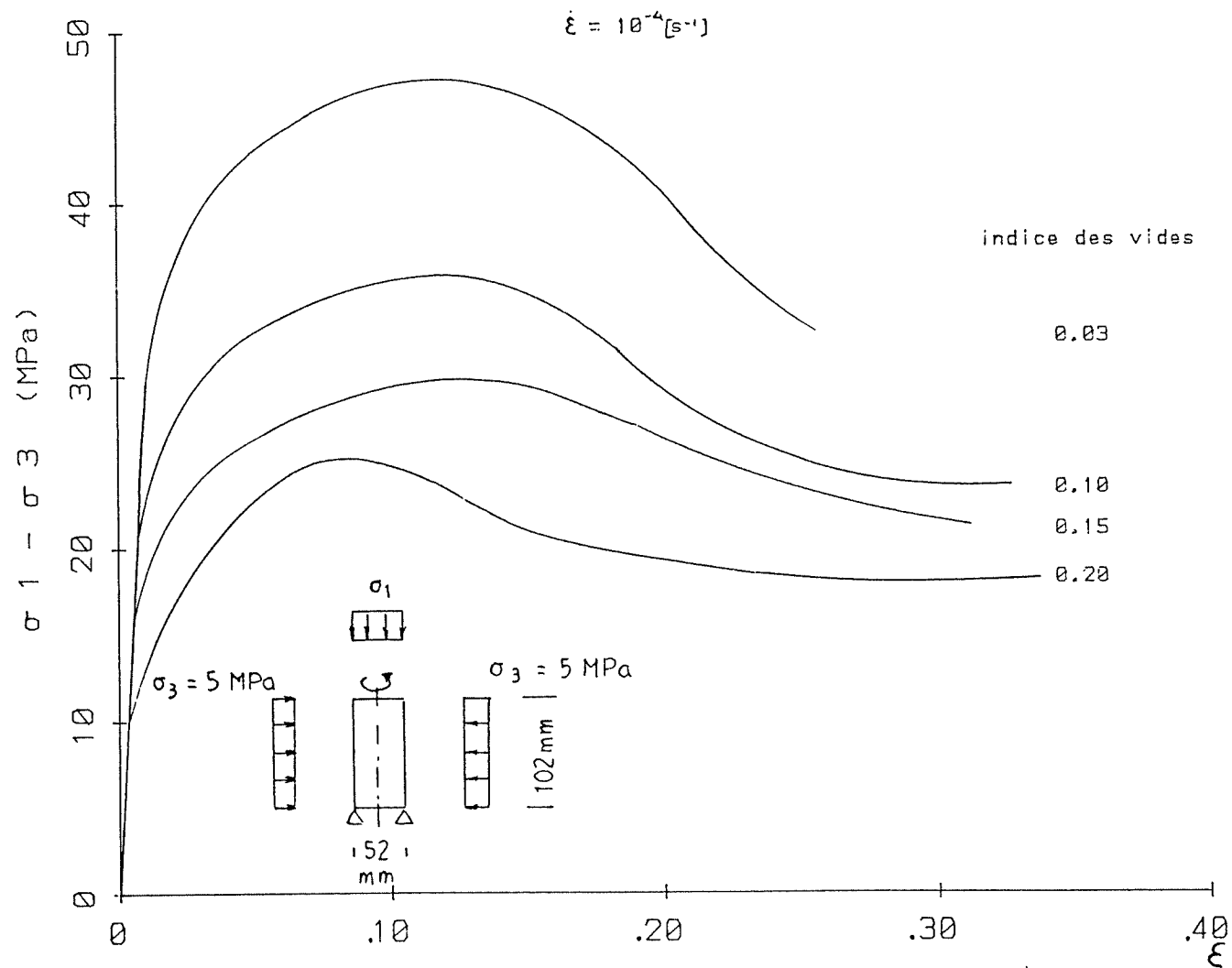


Figure II.40: Courbes contrainte-déformation en compression triaxiale du sel meuble pour différents indices des vides à pression de confinement de 5 MPa (Liedtke et Bleich, 1985).

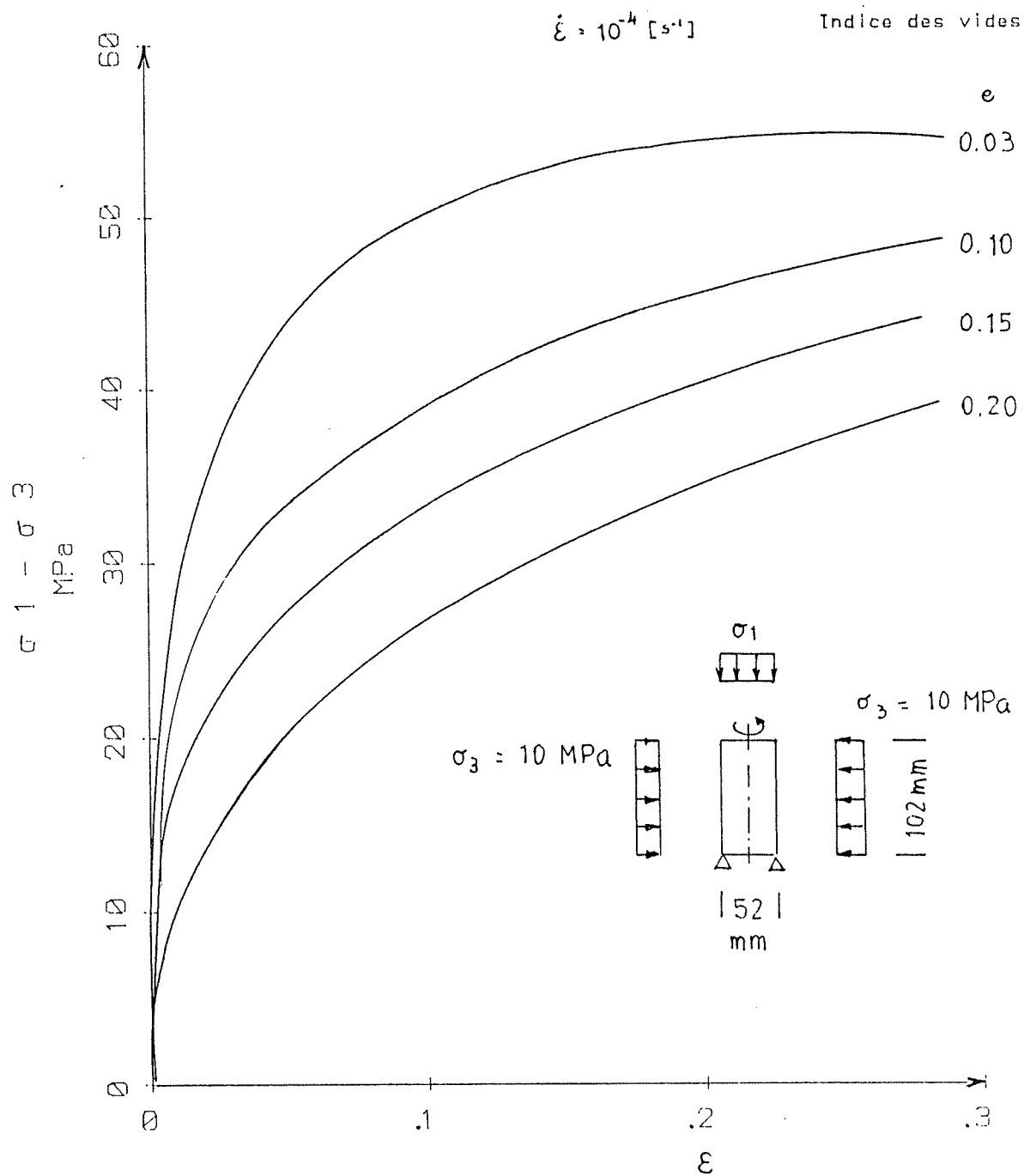


Figure II.41: Courbes contrainte-déformation en compression triaxiale du sel meuble pour différents indices des vides à pression de confinement de 10 MPa (Liedtke et Bleich, 1985).

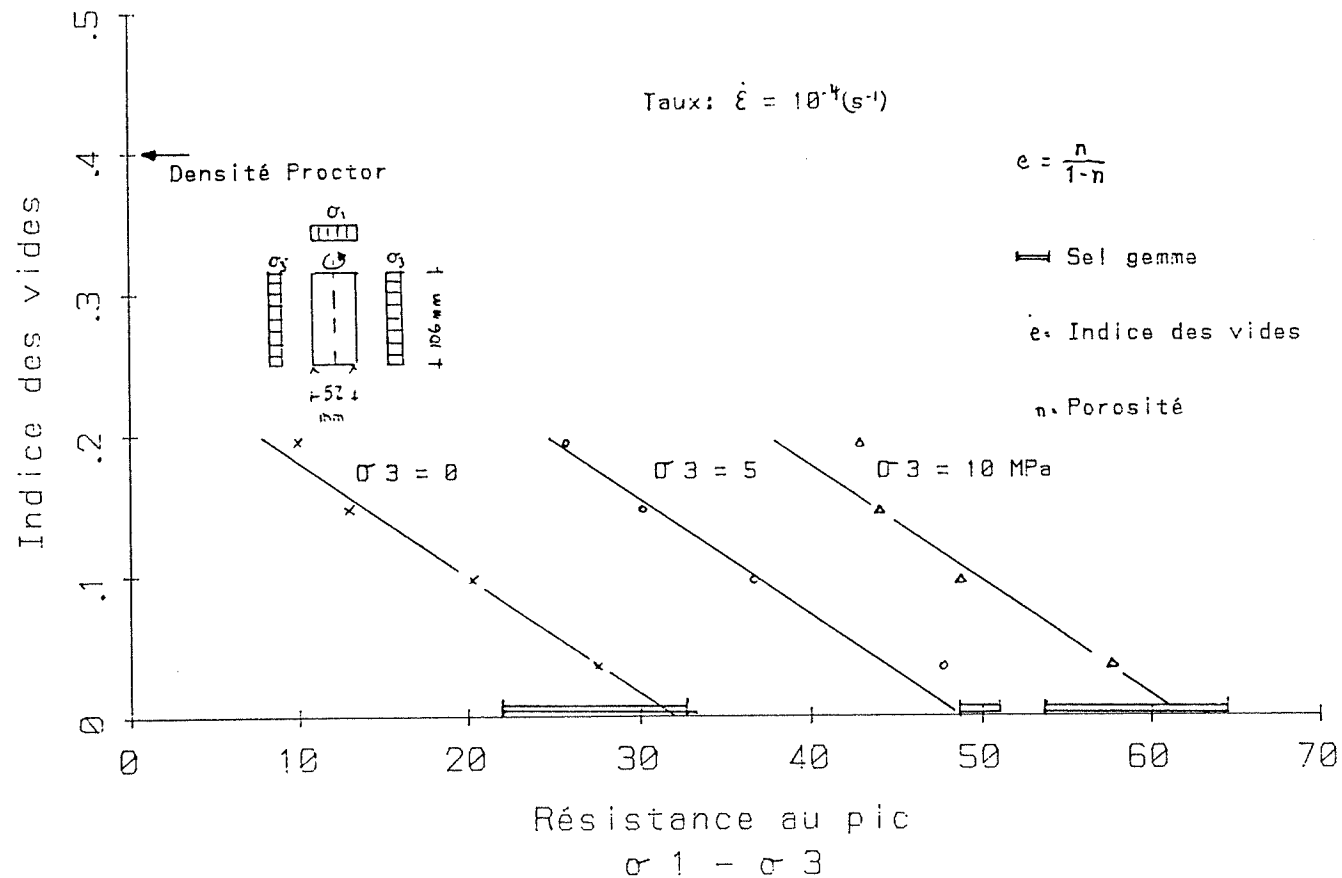


Figure II.42: Résistance au pic ($\sigma_1 - \sigma_3$) en fonction de l'indice des vides et de la pression de confinement du sel meuble de la mine d'Asse. Taux de déformation contrôlé à 10^{-4} s^{-1} (Liedtke et Bleich, 1985).

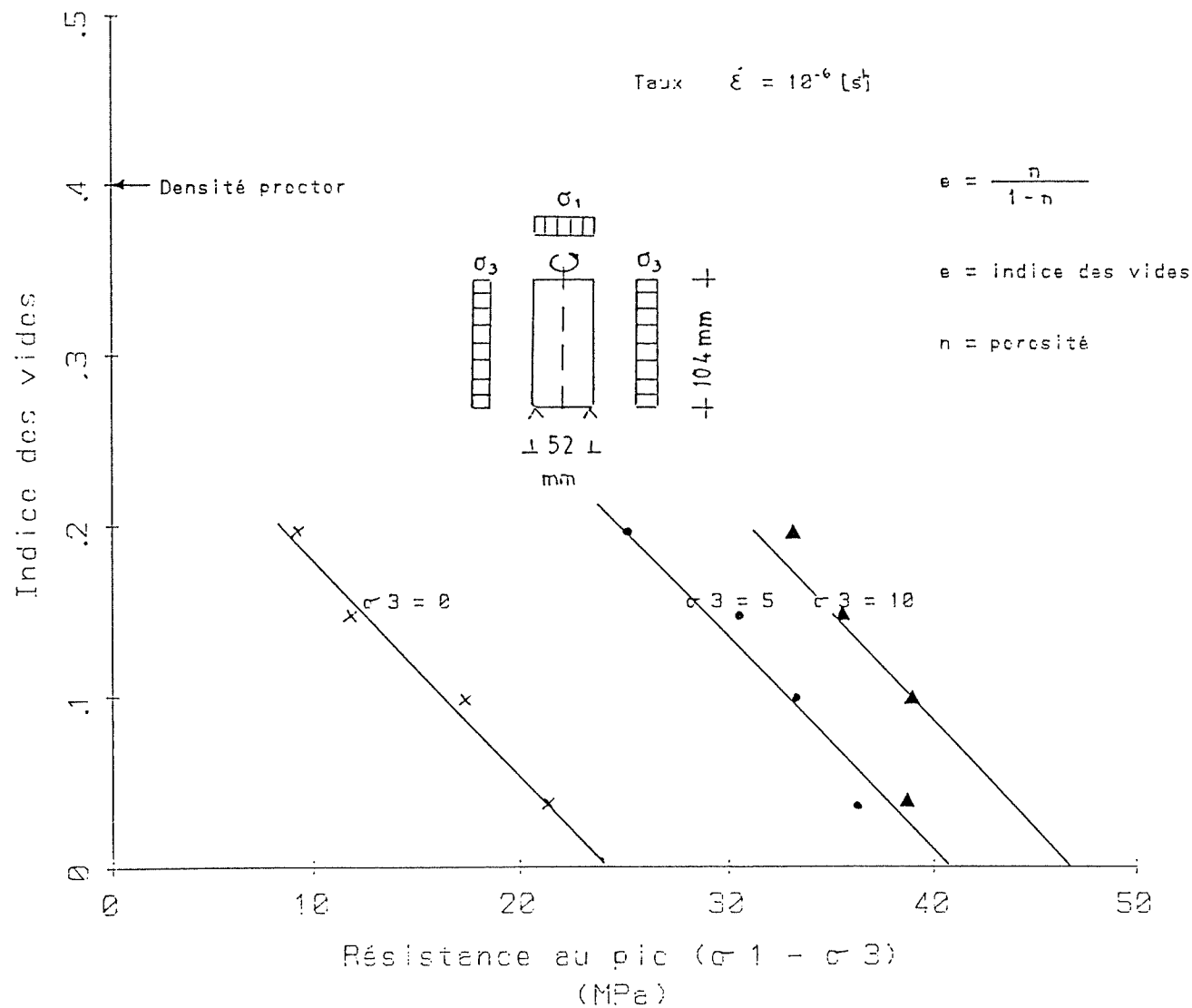


Figure II.43: Résistance au pic ($\sigma_1 - \sigma_3$) en fonction de l'indice des vides et de la pression de confinement du sel meuble de la mine d'Asse. Taux de déformation contrôlé à $10^{-6} s^{-1}$ (Liedtke et Bleich, 1985).

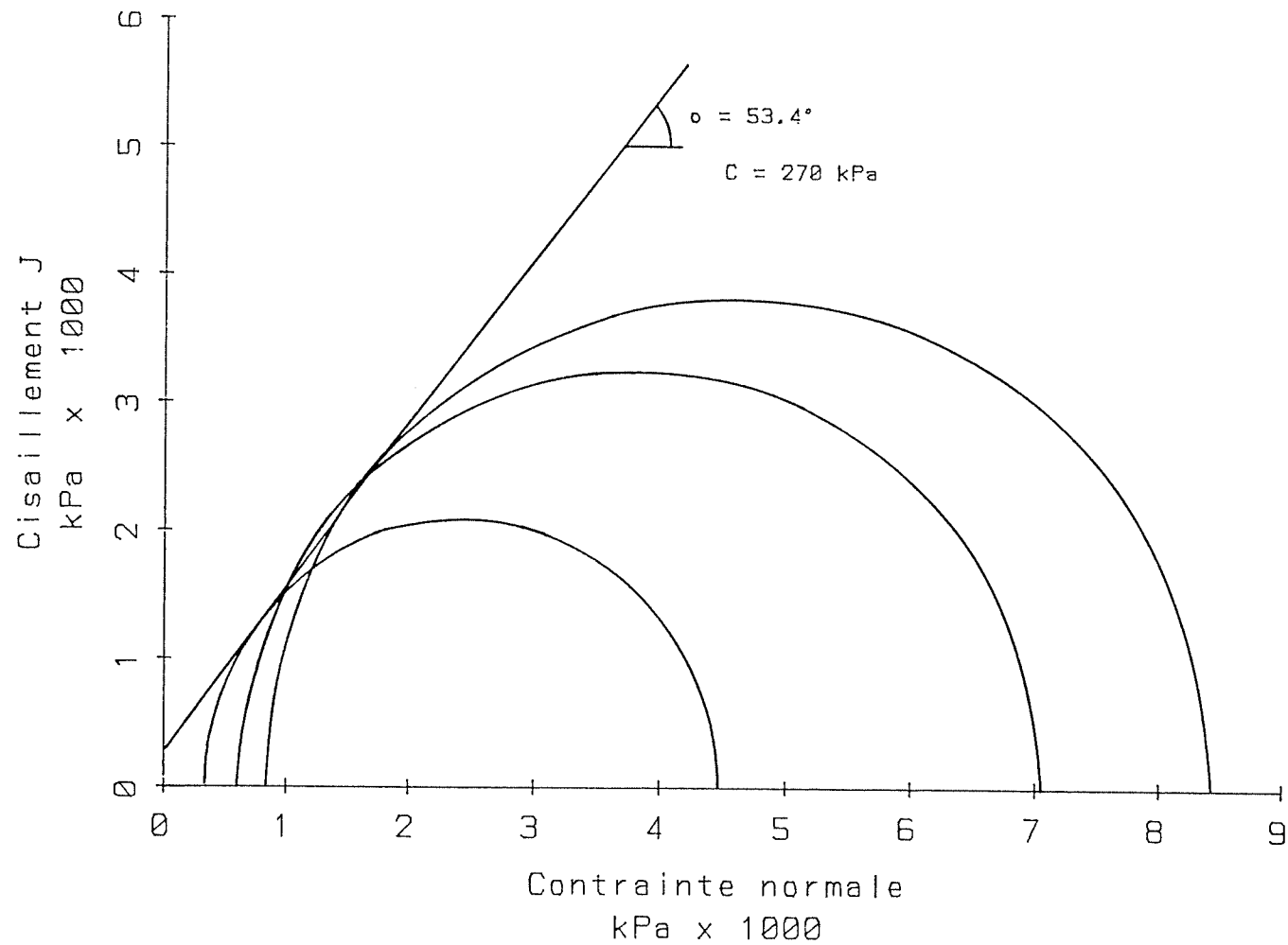


Figure II.44: Enveloppe de rupture de Mohr-Coulomb des rejets de potasse en compression triaxiale (Pufahl et Yoshida, 1982).

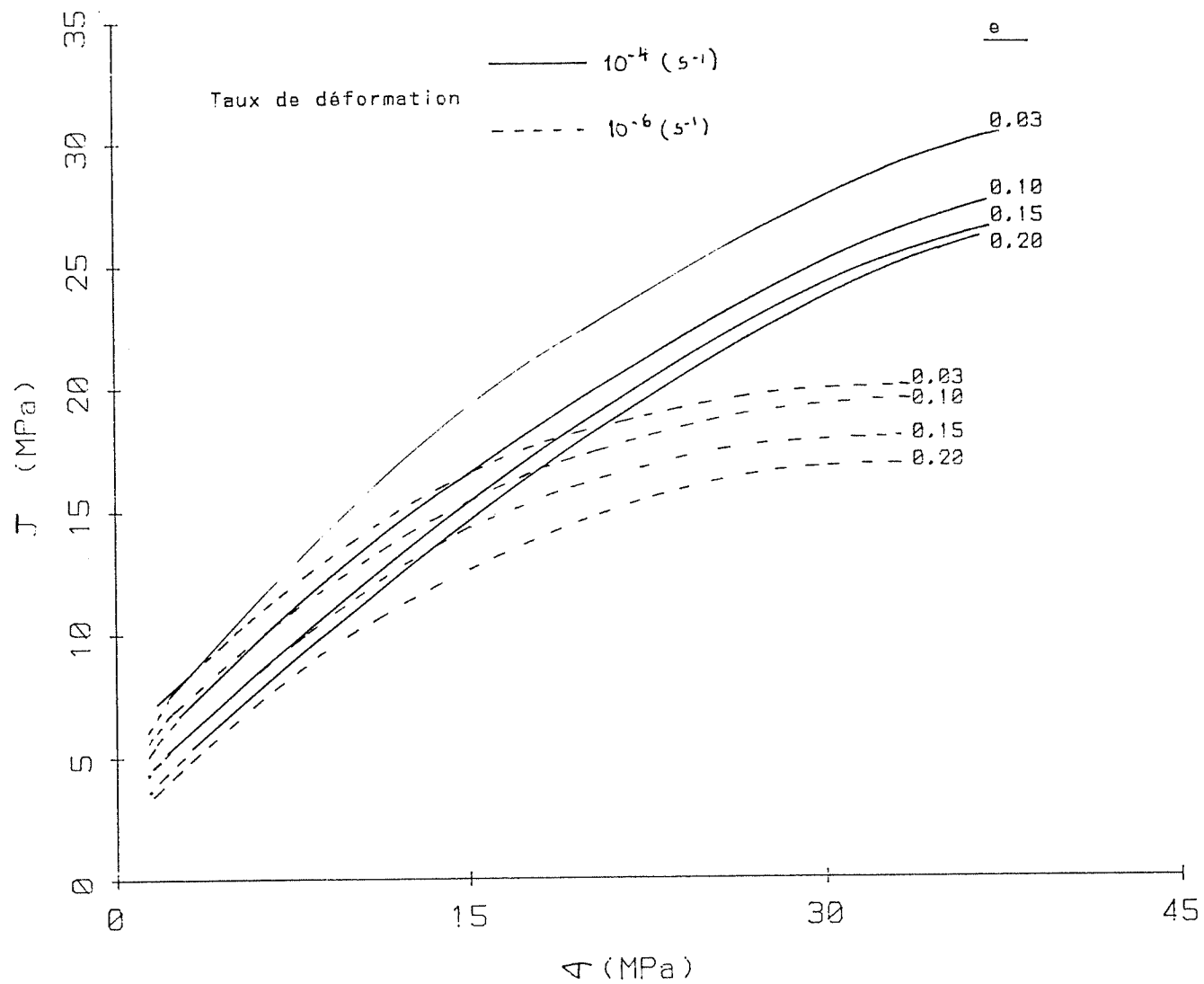


Figure II.44b: Enveloppes de rupture pour le sel meuble à différents indices des vides et taux de déformation tirées des essais de compression uniaxiale et triaxiale de Liedtke et Bleich (1985).

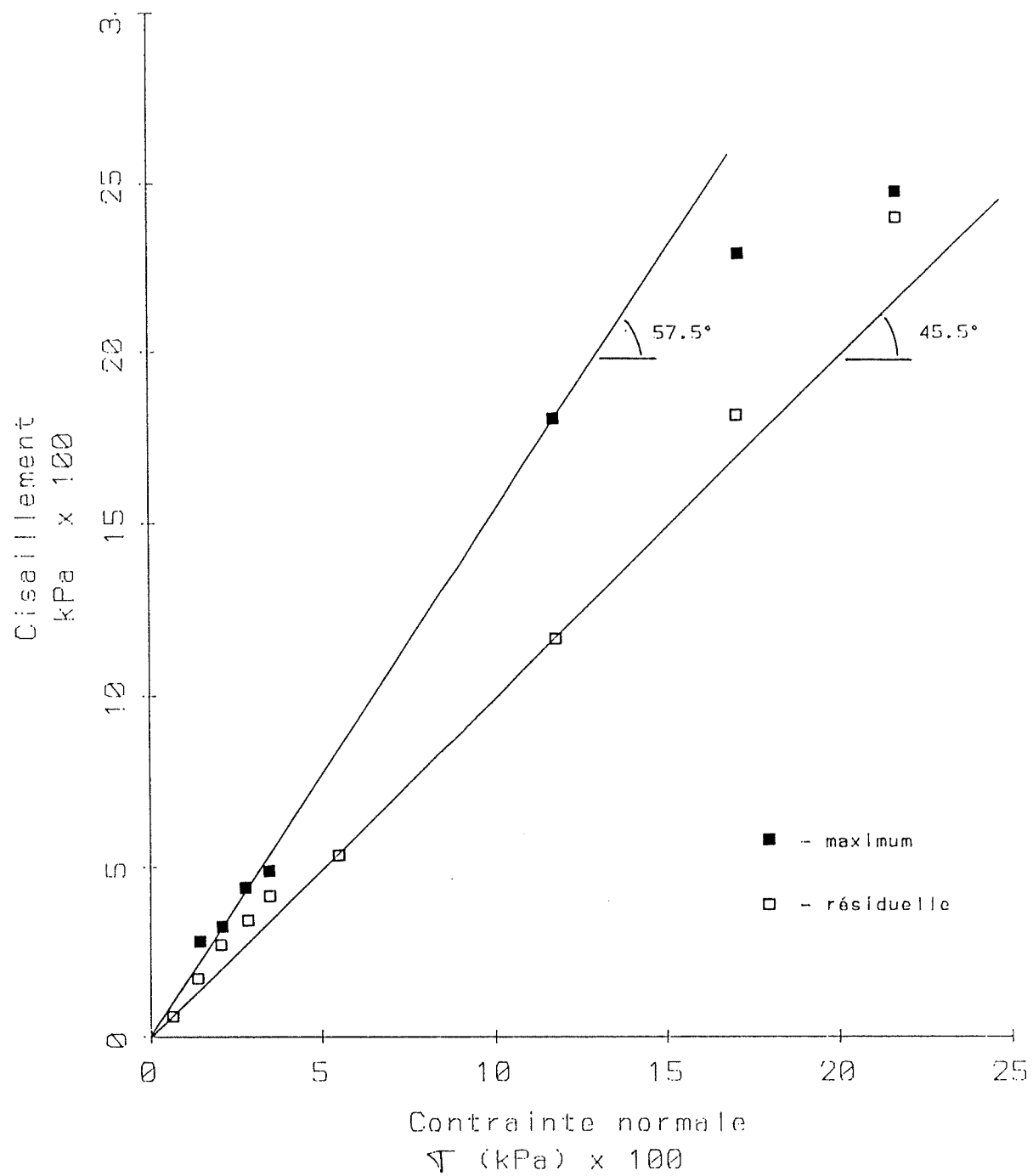


Figure II.45: Enveloppe de rupture de Mohr-Coulomb des rejets de potasse en cisaillement direct (Pufahl et Yoshida, 1982).

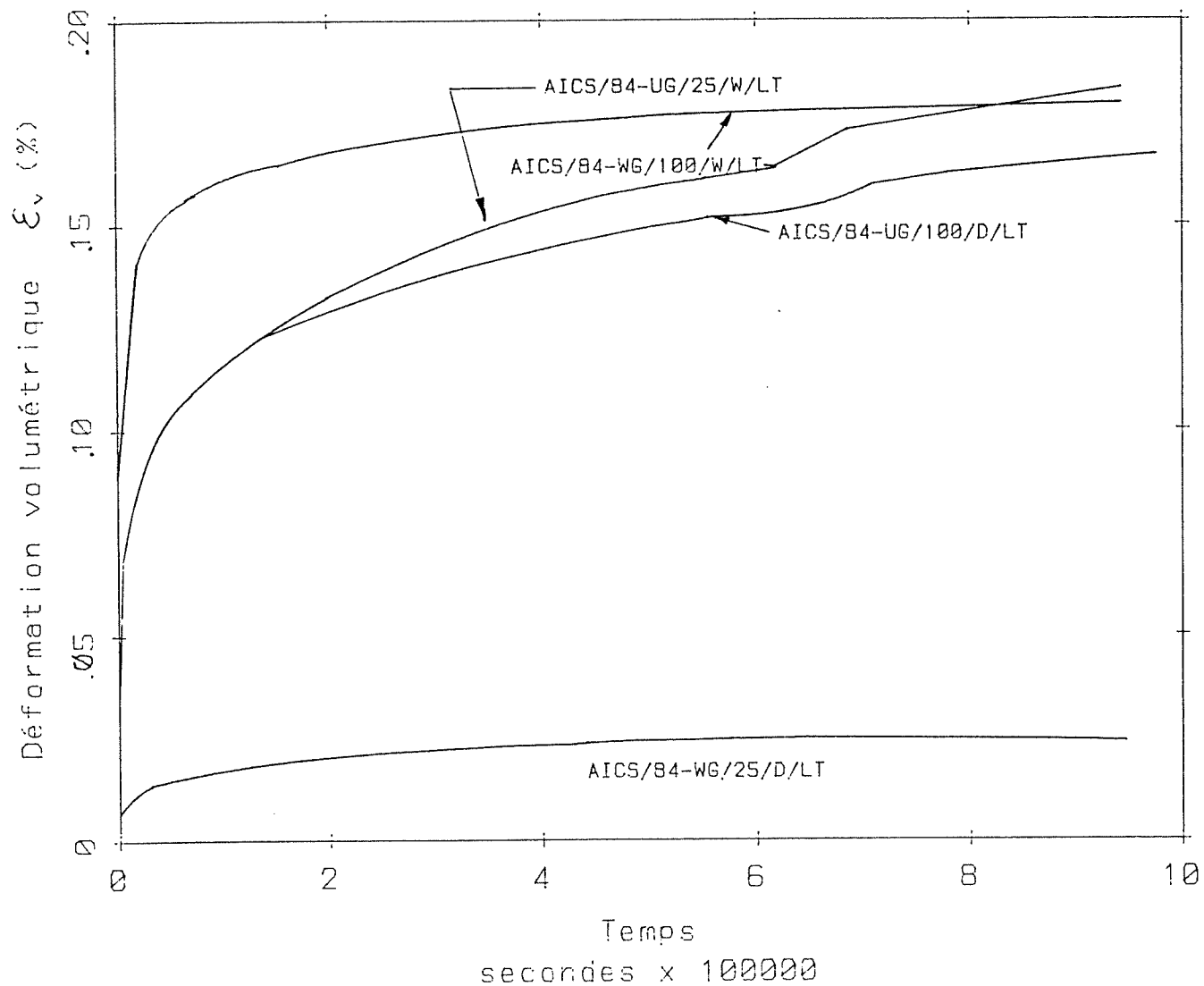


Figure II.46: Courbes de fluage en compression hydrostatique du sel meuble, le temps d'application de la charge est de 20 minutes. Code: UG pour un $C_u = 1$, WG pour un $C_u = 8$, D pour sec, W pour saturé et le nombre pour la température (Pfeifle et al., 1987).

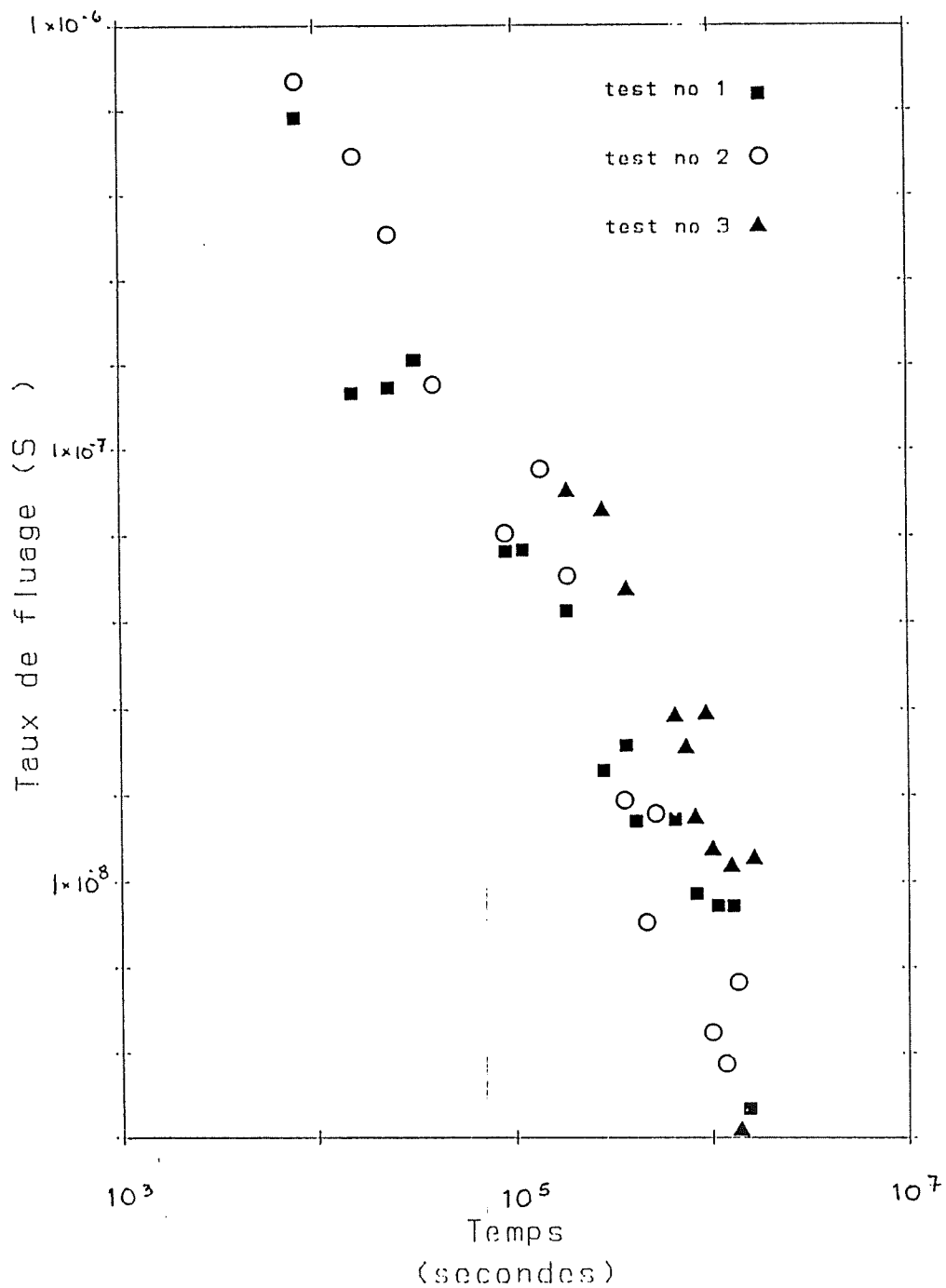


Figure II.47: Variation du taux de fluage volumétrique en compression hydrostatique du sel meuble sec dans le temps pour les essais de Case et al., 1987.

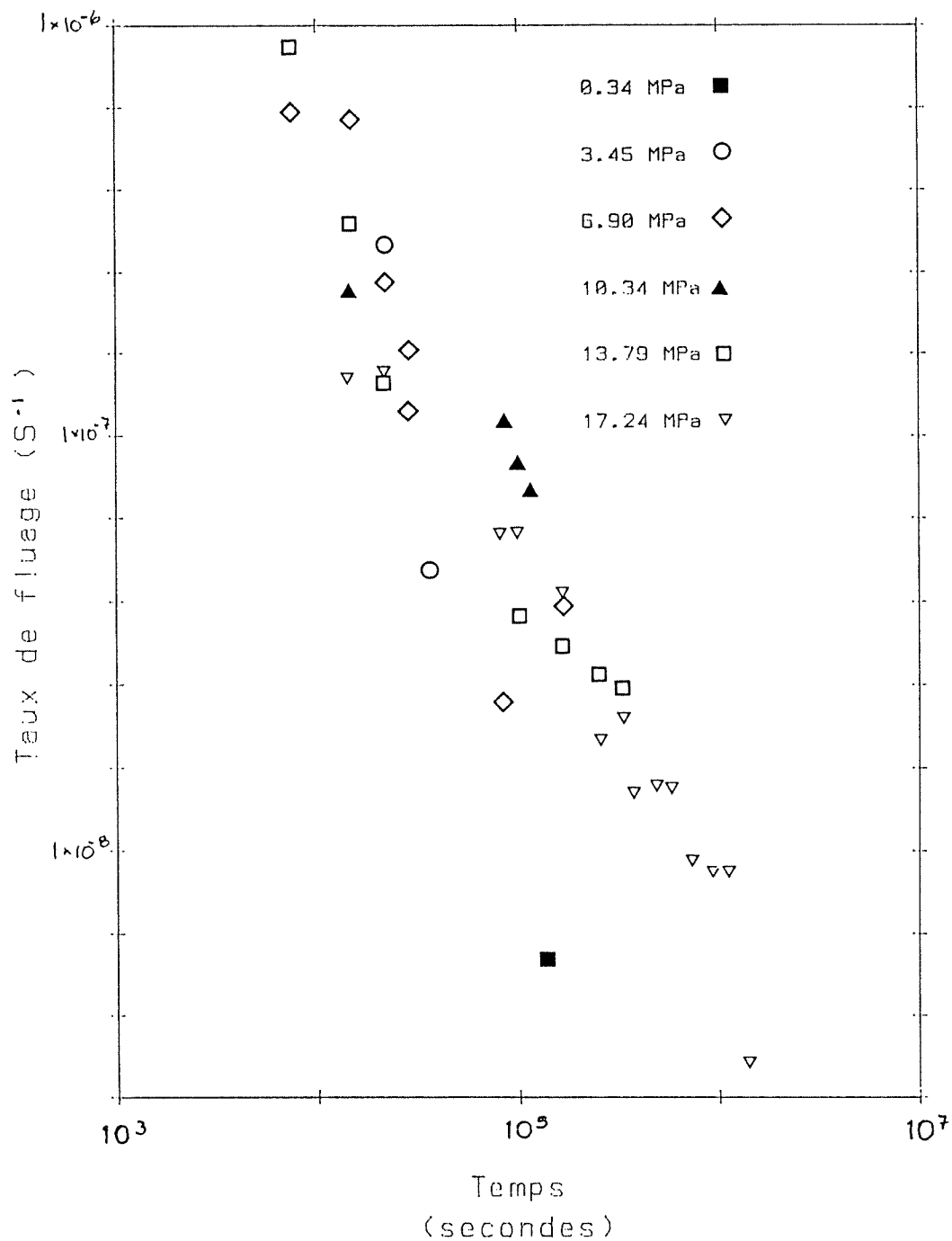


Figure II.48: Variation du taux de fluage volumétrique en compression hydrostatique du sel meuble sec dans le temps pour les différents paliers de chargement de l'essai #1 de Case et al., 1987.

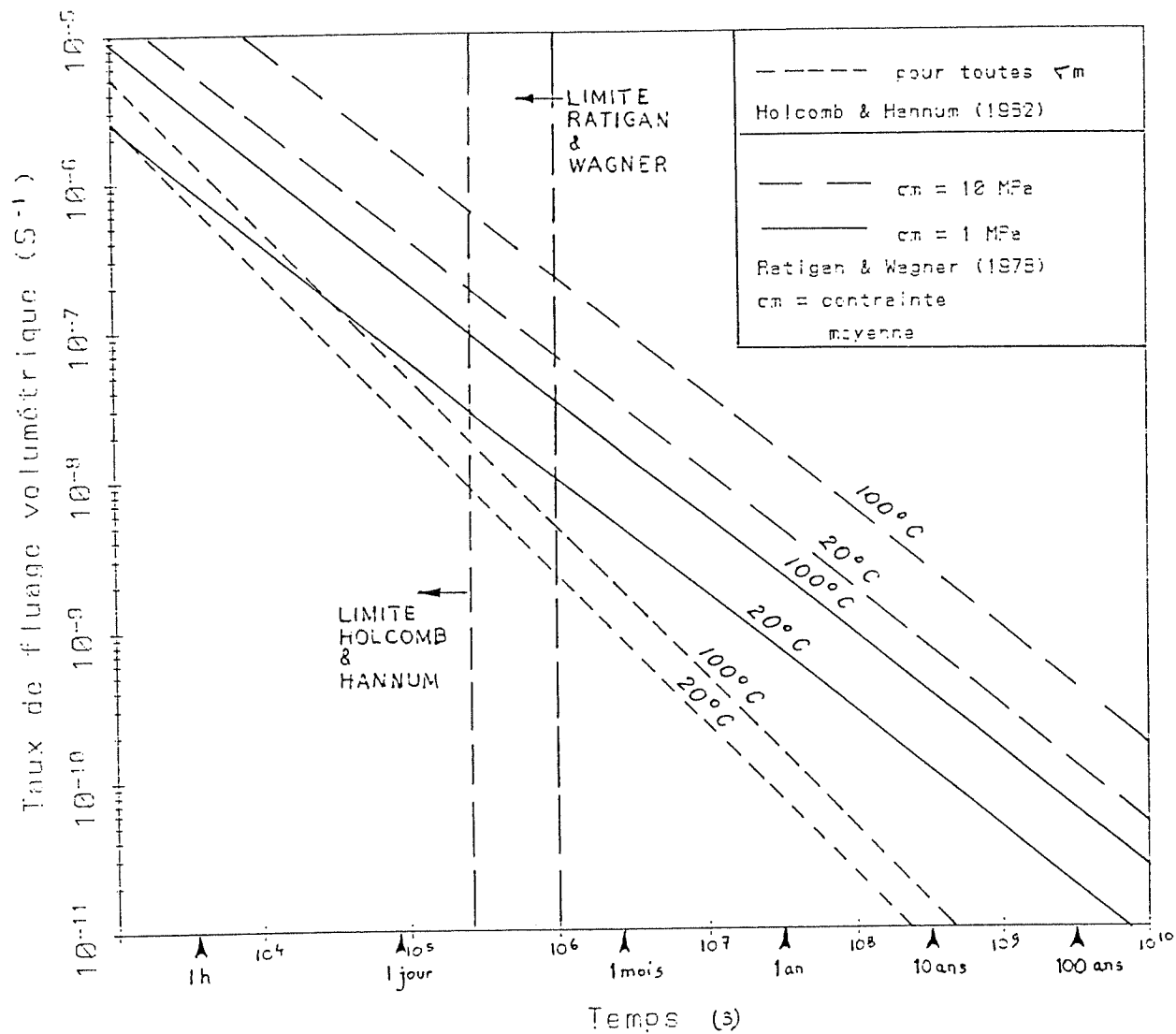


Figure II.49: Variation du taux de fluage volumétrique en compression hydrostatique du sel meuble sec dans le temps pour les différentes contraintes et températures. Les traits verticaux indiquant les durées maximum des essais au laboratoire (tiré de IT Corporation, 1984).

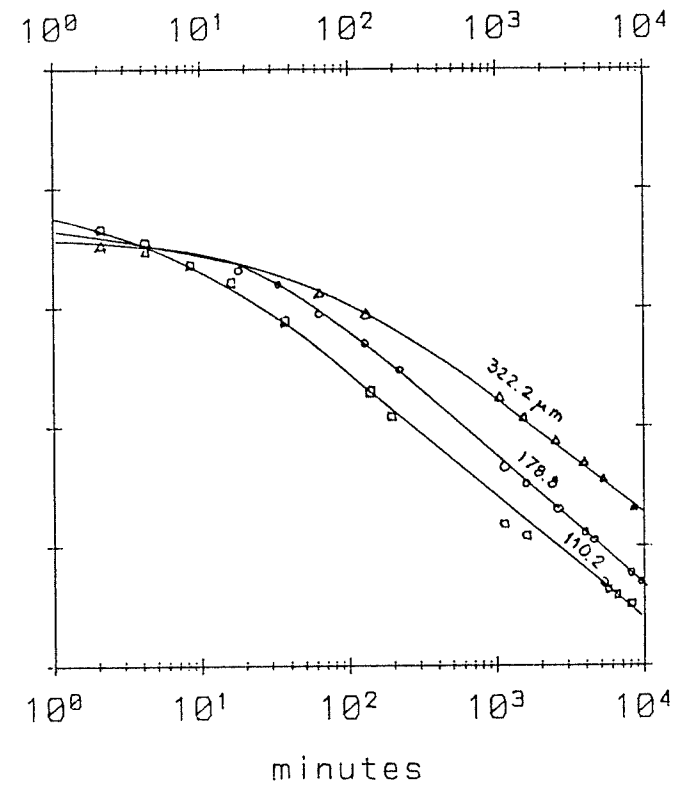
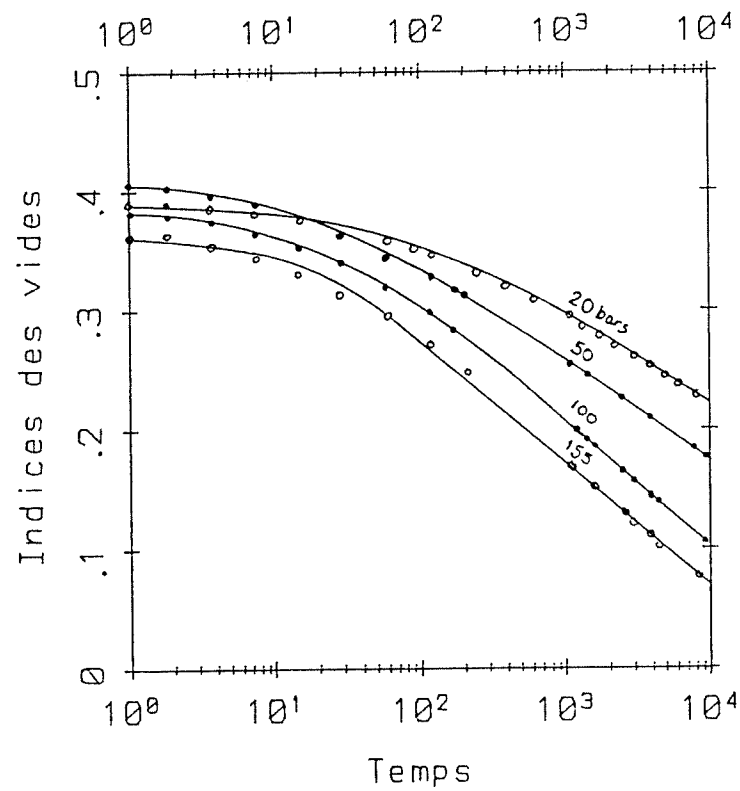


Figure II.50: Essais de fluage en compression confinée pour le sel meuble saturé en eau: a) pour différentes charges appliquées et un diamètre moyen des particules de 178,8 μm; b) pour différents diamètres de particules et une charge de 155 bars (Shor et al., 1981).

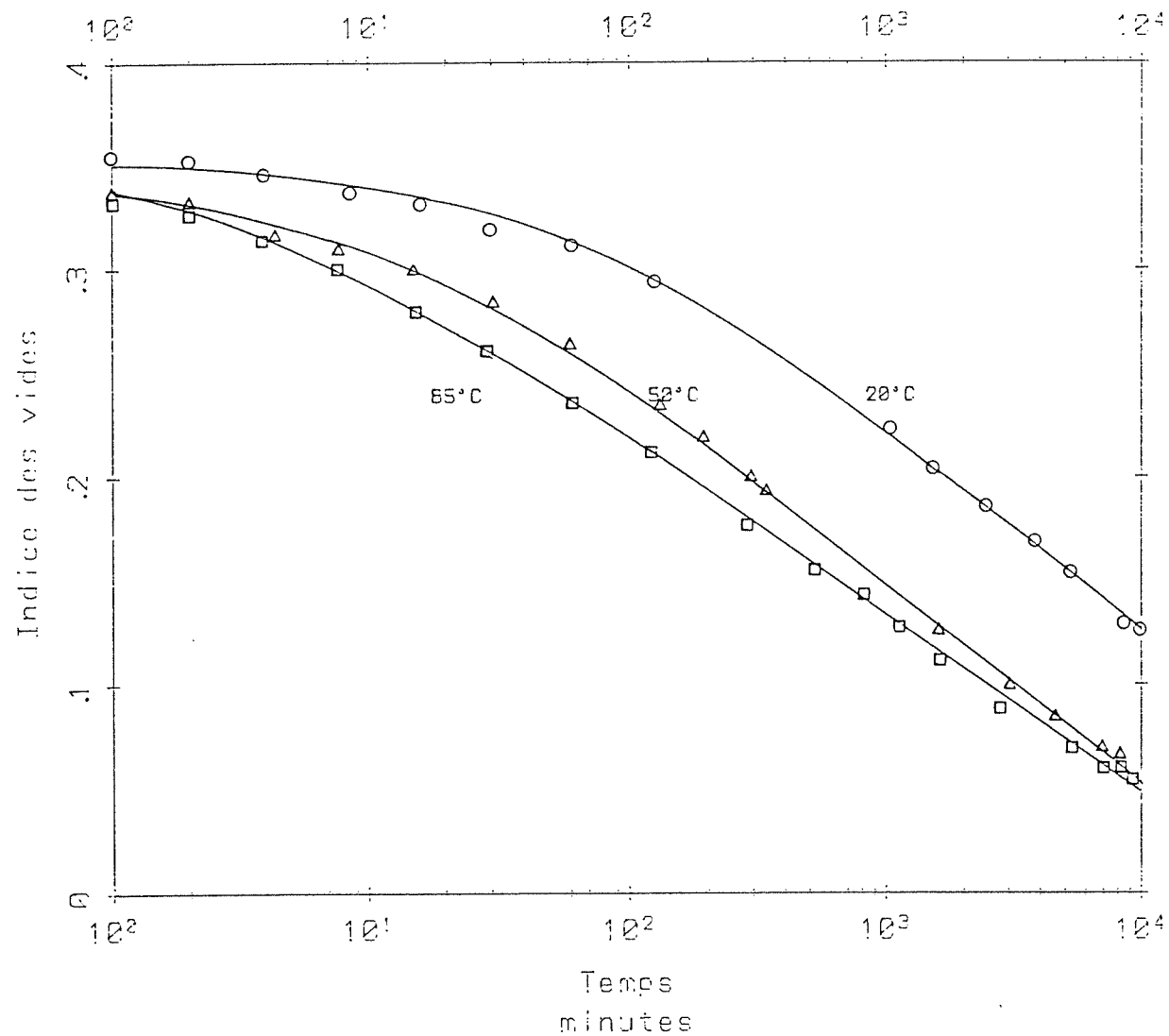


Figure II.51: Essais de fluage en compression confinée pour le sel meuble saturé en eau à différentes températures pour un diamètre moyen des particules de $322,2\mu\text{m}$ et une charge de 155 bars (Shor et al., 1981).

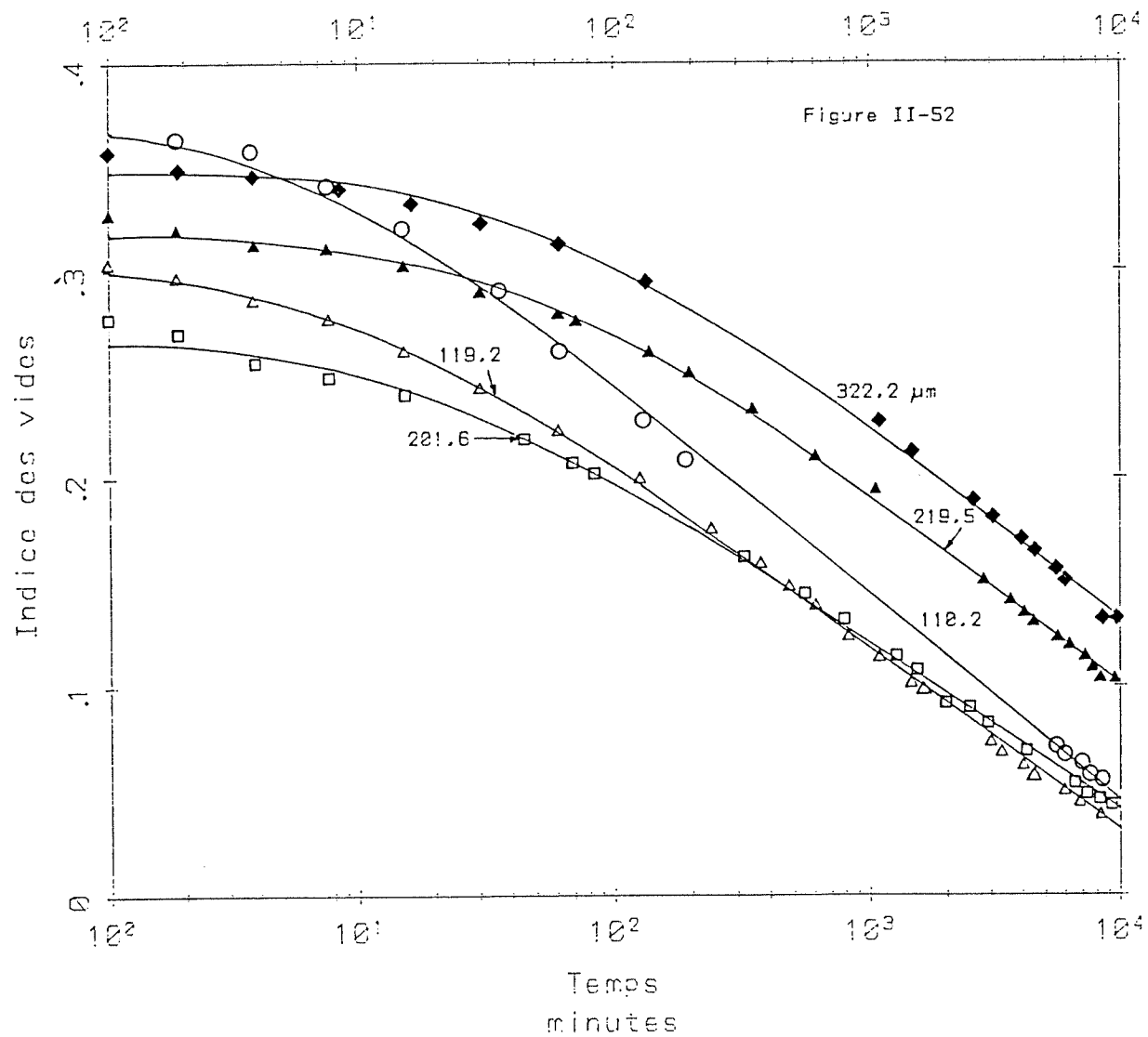


Figure II.52: Essais de fluage en compression confinée pour le sel meuble saturé en eau de différentes granulométries à une charge de 155 bars (Shor et al., 1981).

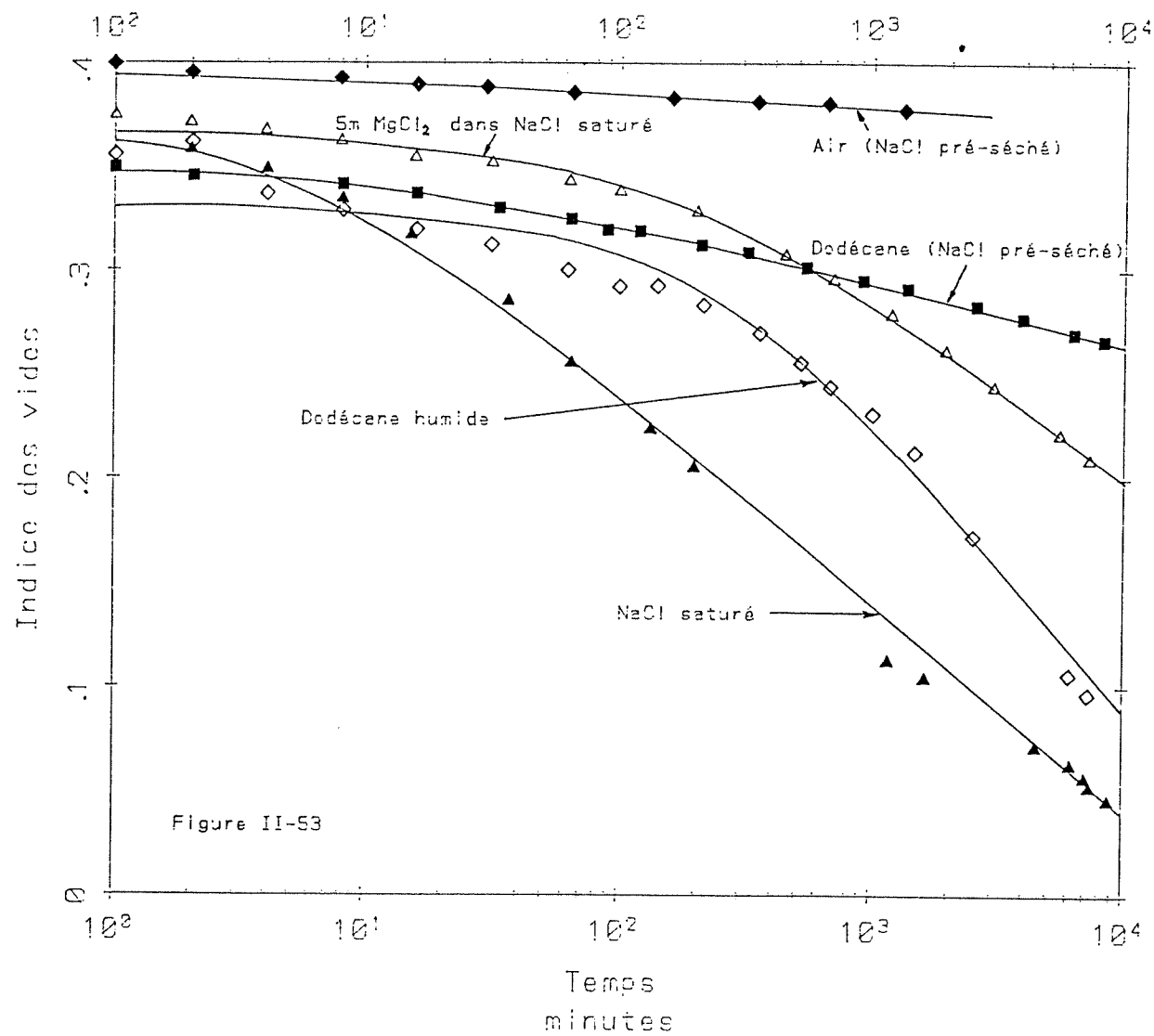


Figure II.53: Essais de fluage en compression confinée pour le sel meuble saturé avec divers fluides à une charge de 155 bars (Shor et al., 1981).

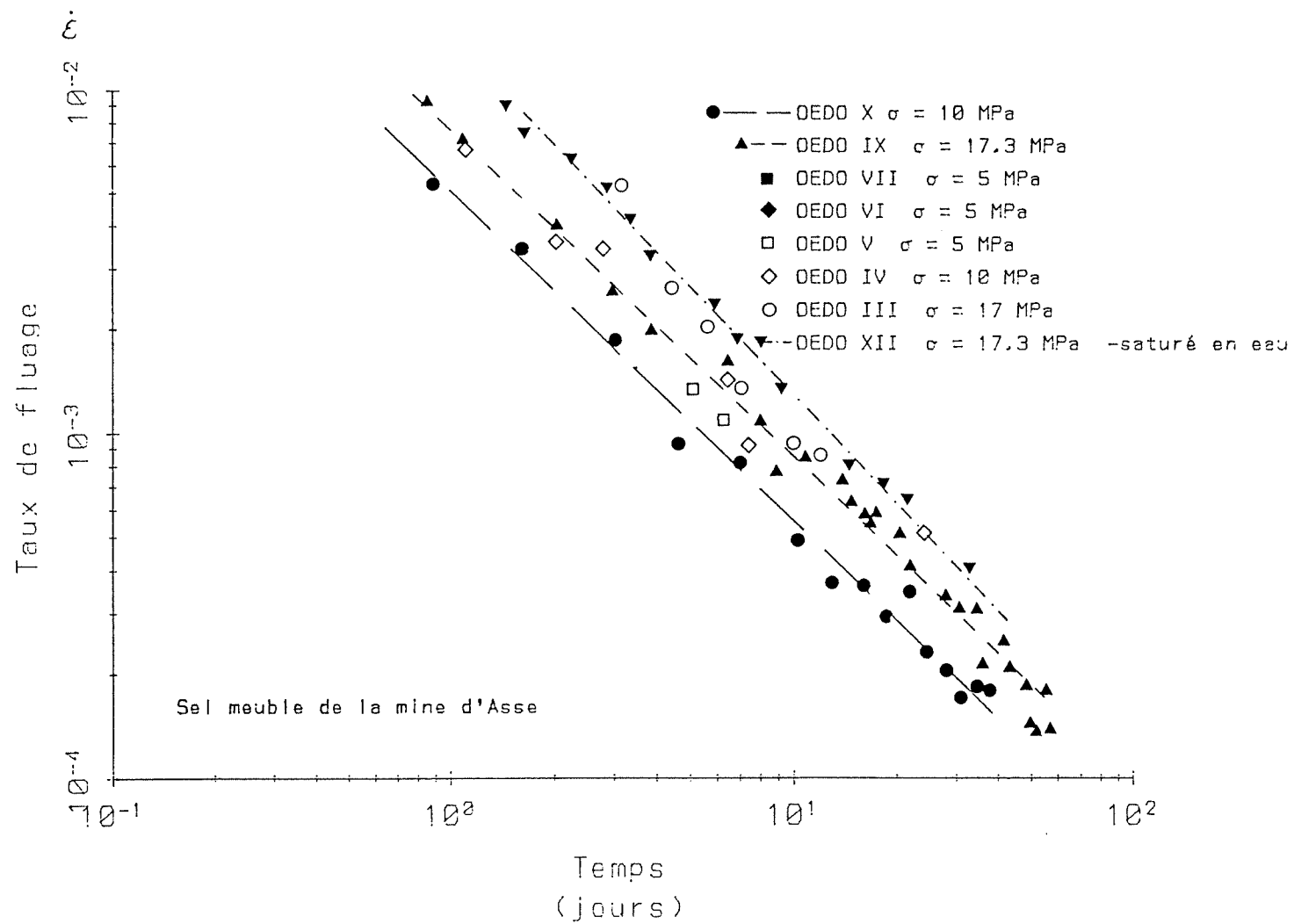


Figure II.54: Variation du taux de fluage volumétrique du sel meuble en compression confinée en fonction du logarithme du temps (Liedtke et Bleich, 1985).

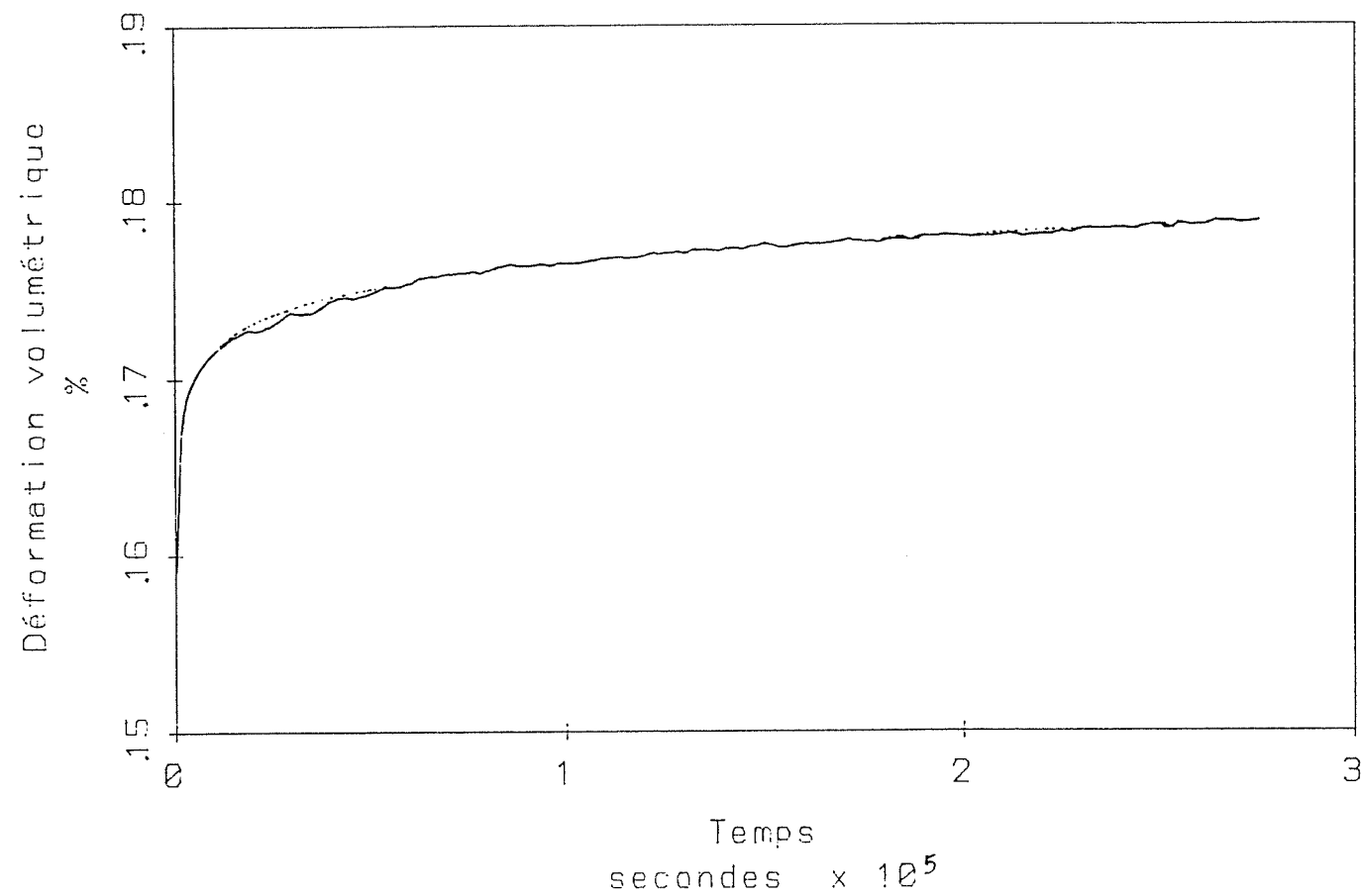


Figure II.55: Courbe de fluage du sel meuble sec en compression hydrostatique. Le trait pointillé représente l'équation [II.14] lissée sur les données expérimentales de cet essai (Holcomb et Hannum, 1982).

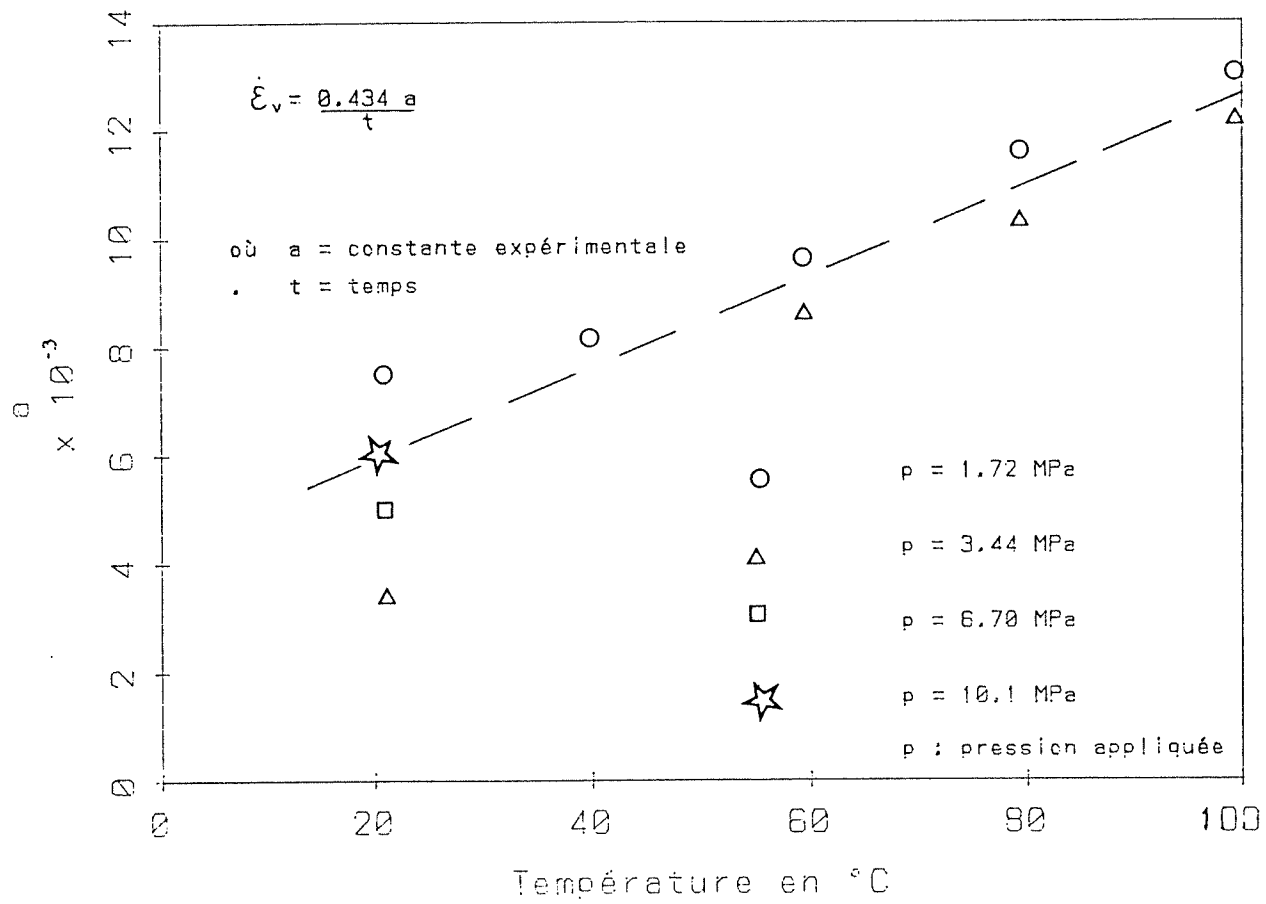


Figure II.56: Relation entre la constante a de l'équation [II.15] et la température (Holcomb et Hannum, 1982).

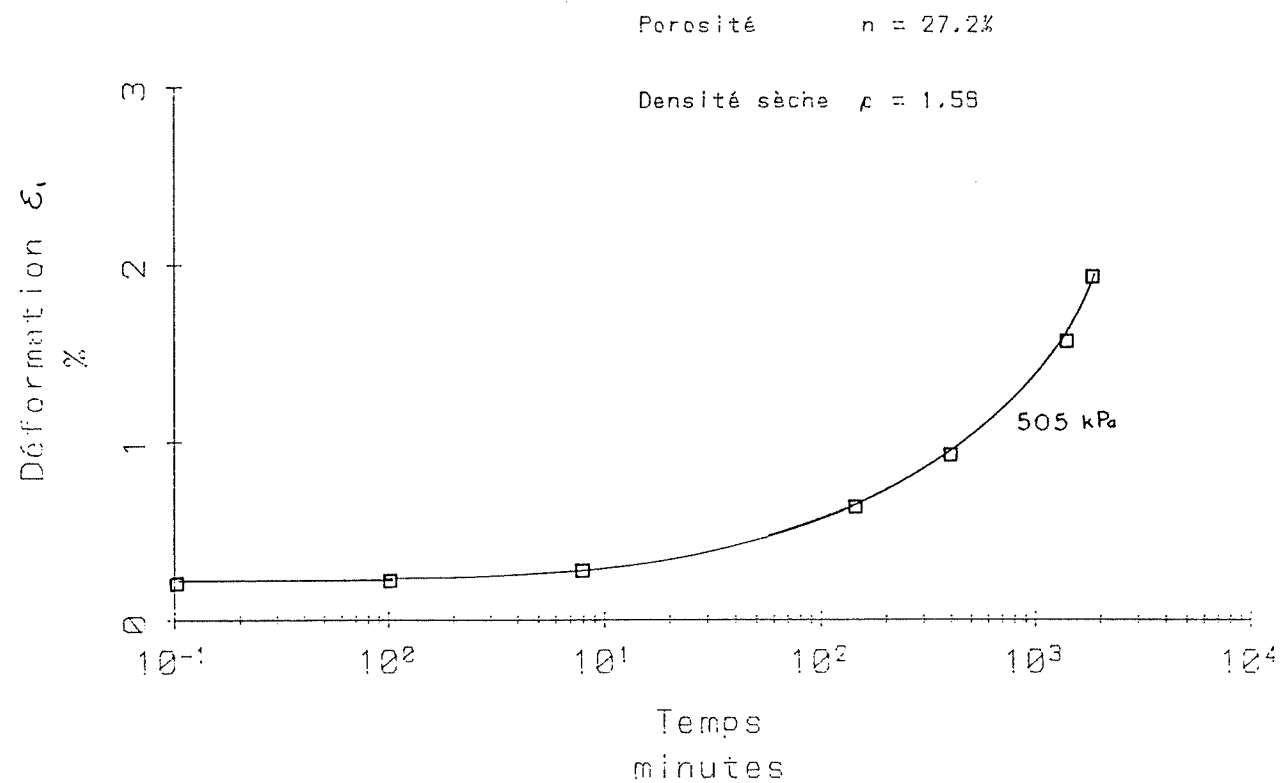


Figure II.57: Courbe de fluage d'un essai de compression uniaxiale avec un seul palier de chargement pour les rejets de potasse (Pufahl et Yoshida, 1982).

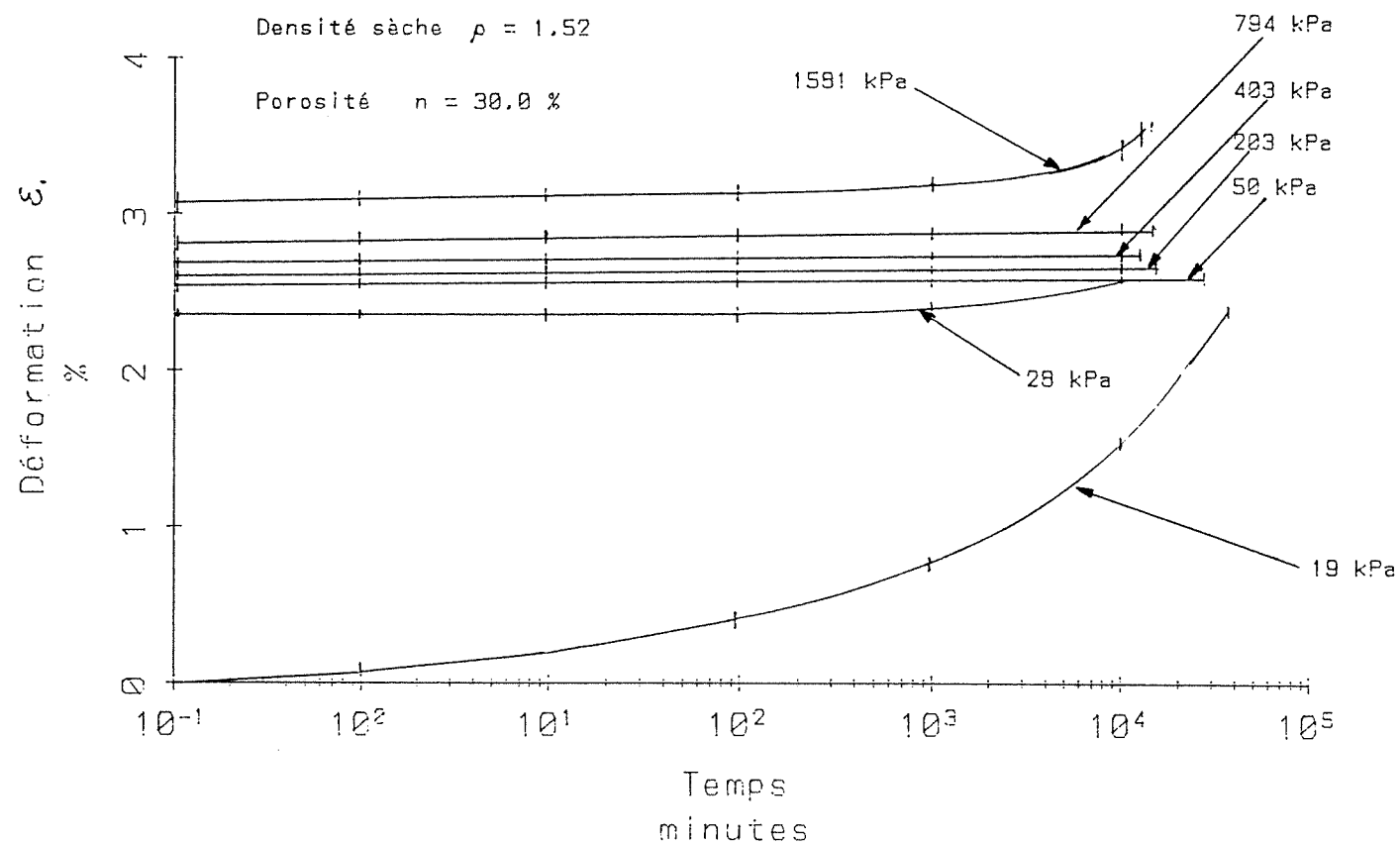


Figure II.58: Courbe de fluage de l'essai SC-300 en compression uniaxiale à plusieurs paliers de chargement pour les rejets de potasse (Pufahl et Yoshida, 1982).

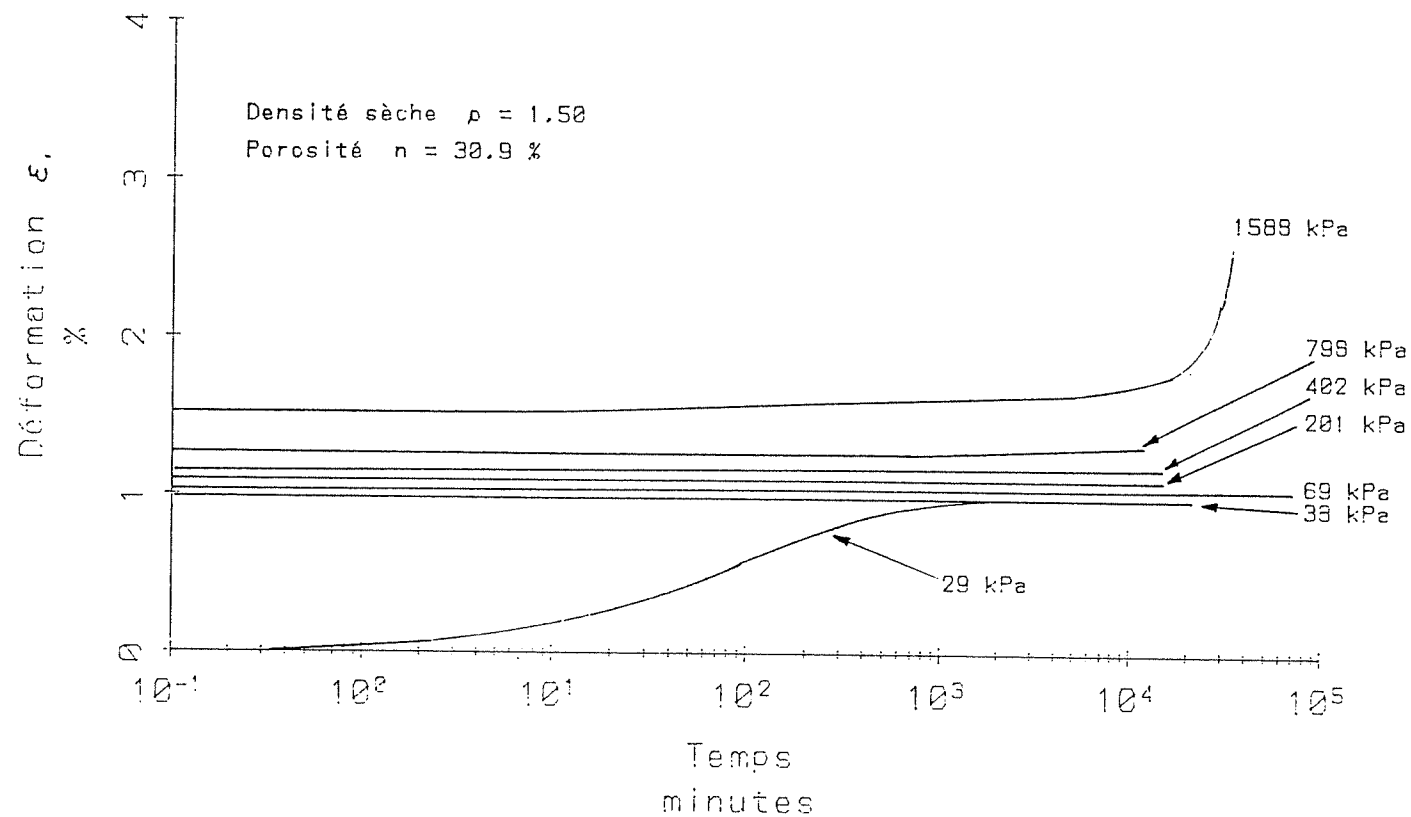


Figure II.59: Courbe de fluage de l'essai SC-302 en compression uniaxiale à plusieurs paliers de chargement pour les rejets de potasse (Pufahl et Yoshida, 1982).

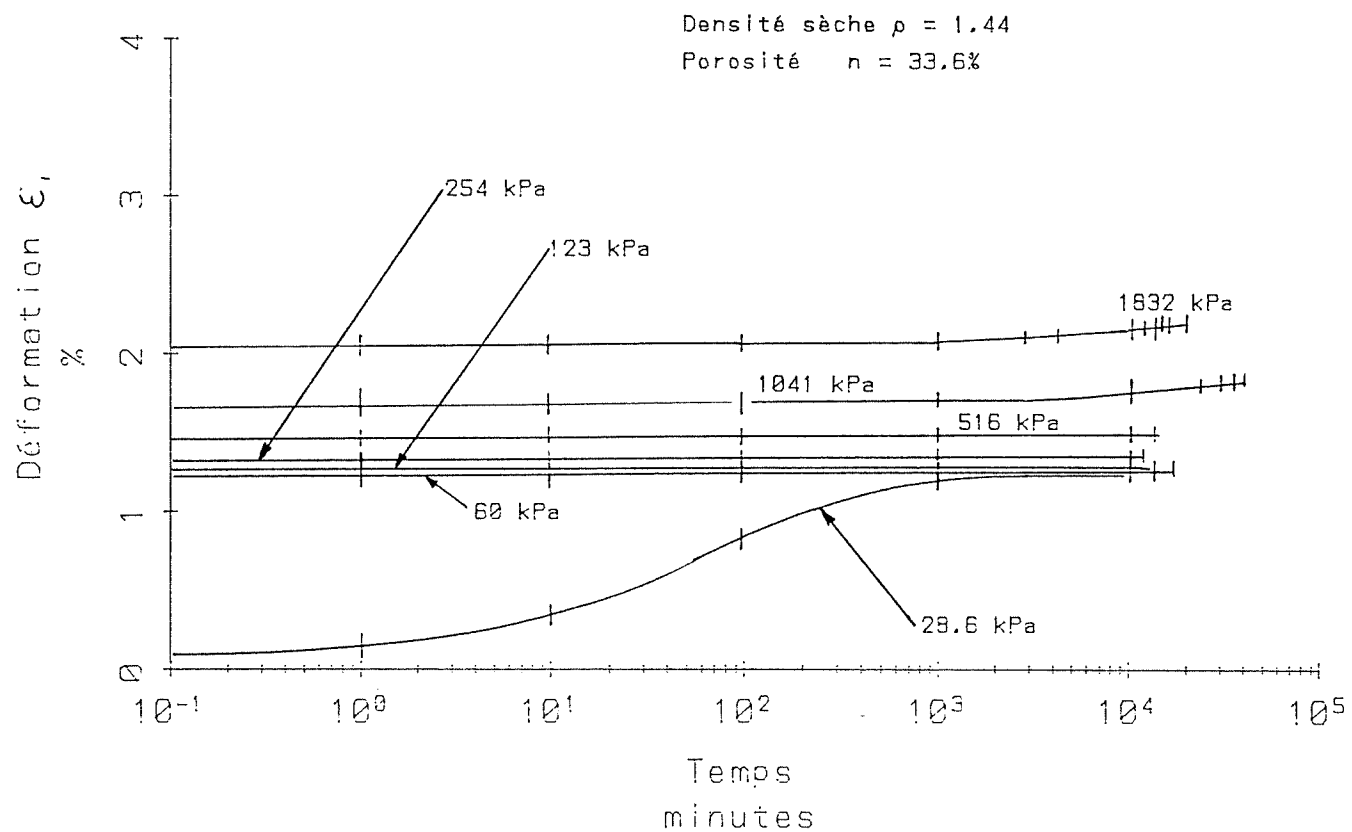


Figure II.60: Courbe de fluage de l'essai SC-305 en compression uniaxiale à plusieurs paliers de chargement pour les rejets de potasse (Pufahl et Yoshida, 1982).

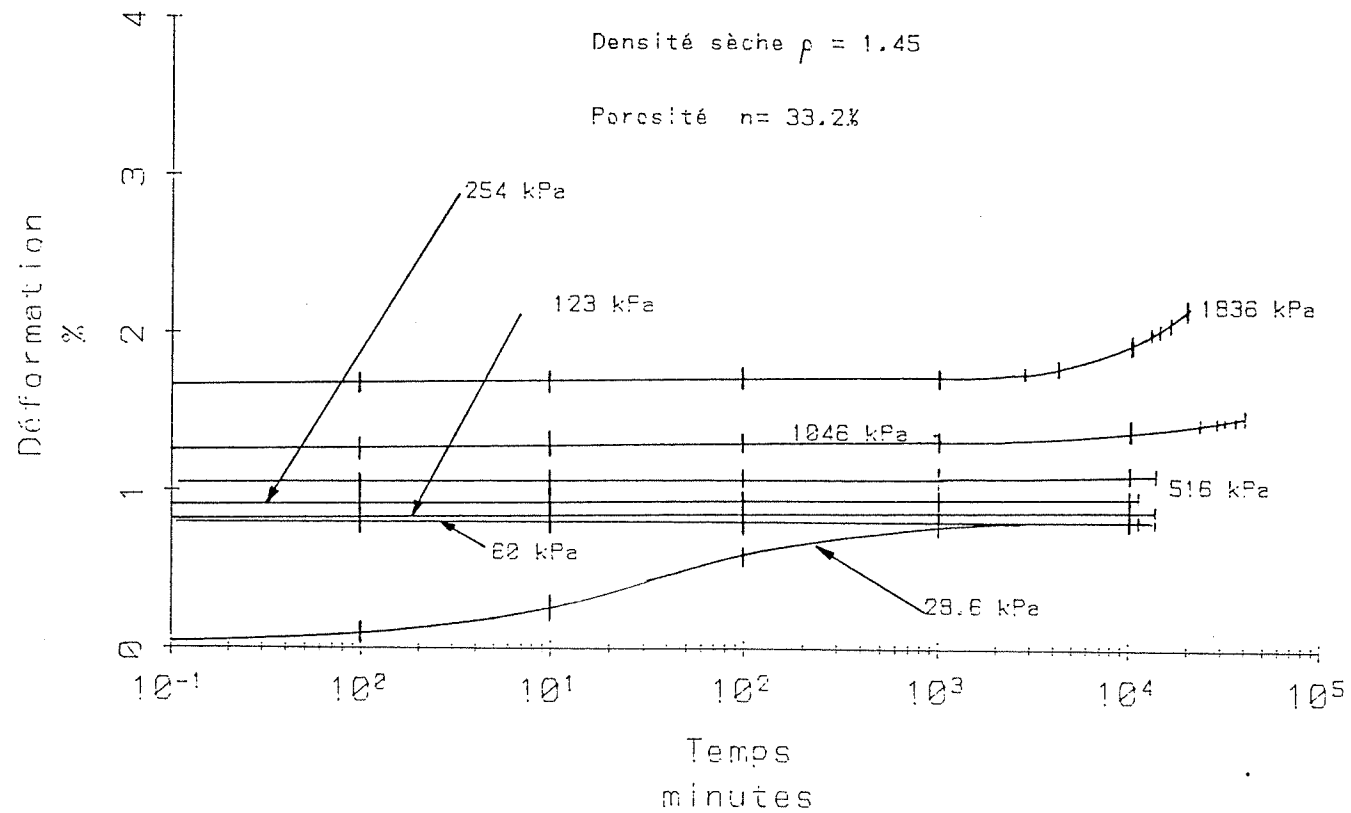


Figure II.61: Courbe de fluage de l'essai SC-306 en compression uniaxiale à plusieurs paliers de chargement pour les rejets de potasse (Pufahl et Yoshida, 1982).

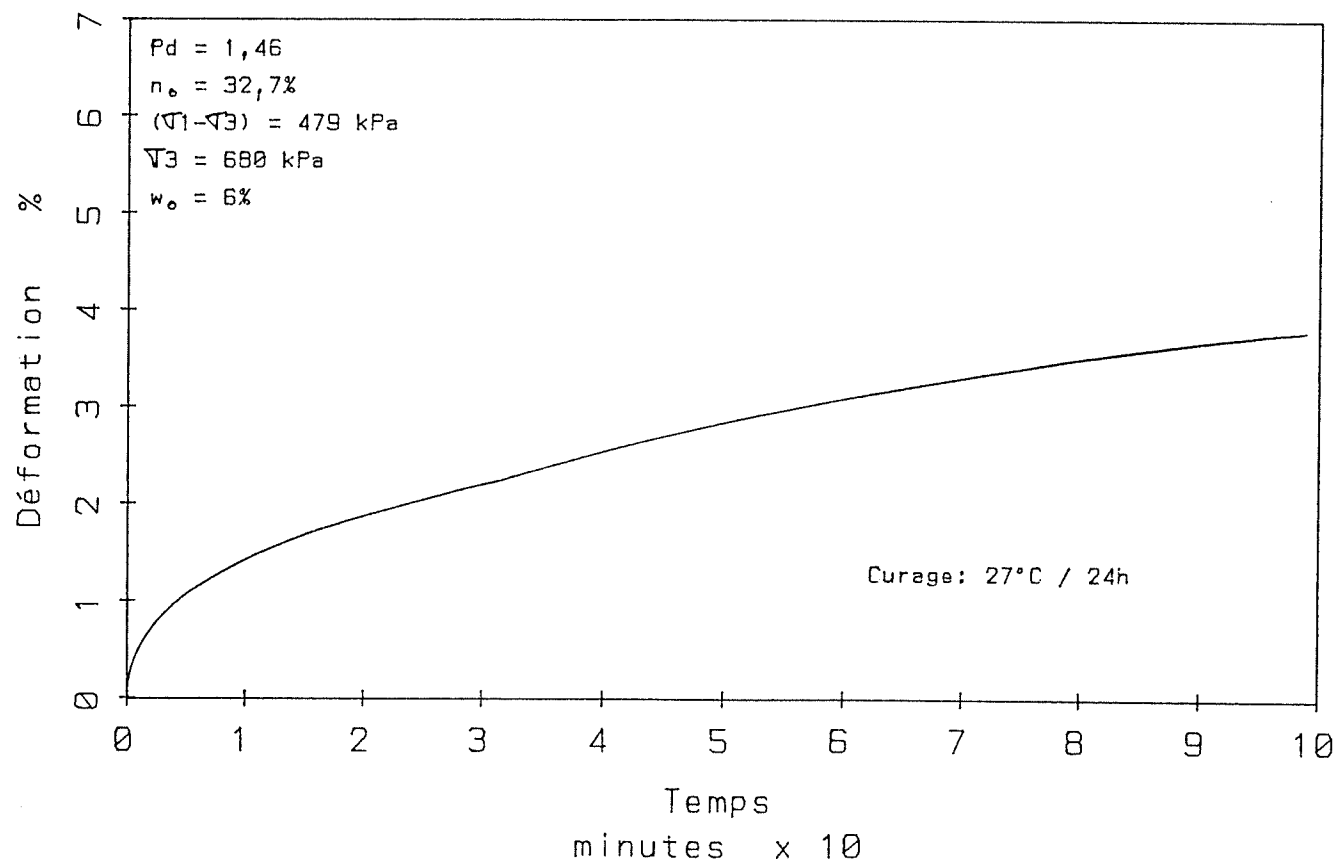


Figure II.62: Courbe de fluage en compression triaxiale sur les rejets de potasse, essai CC-4 (Pufahl et Yoshida, 1982).

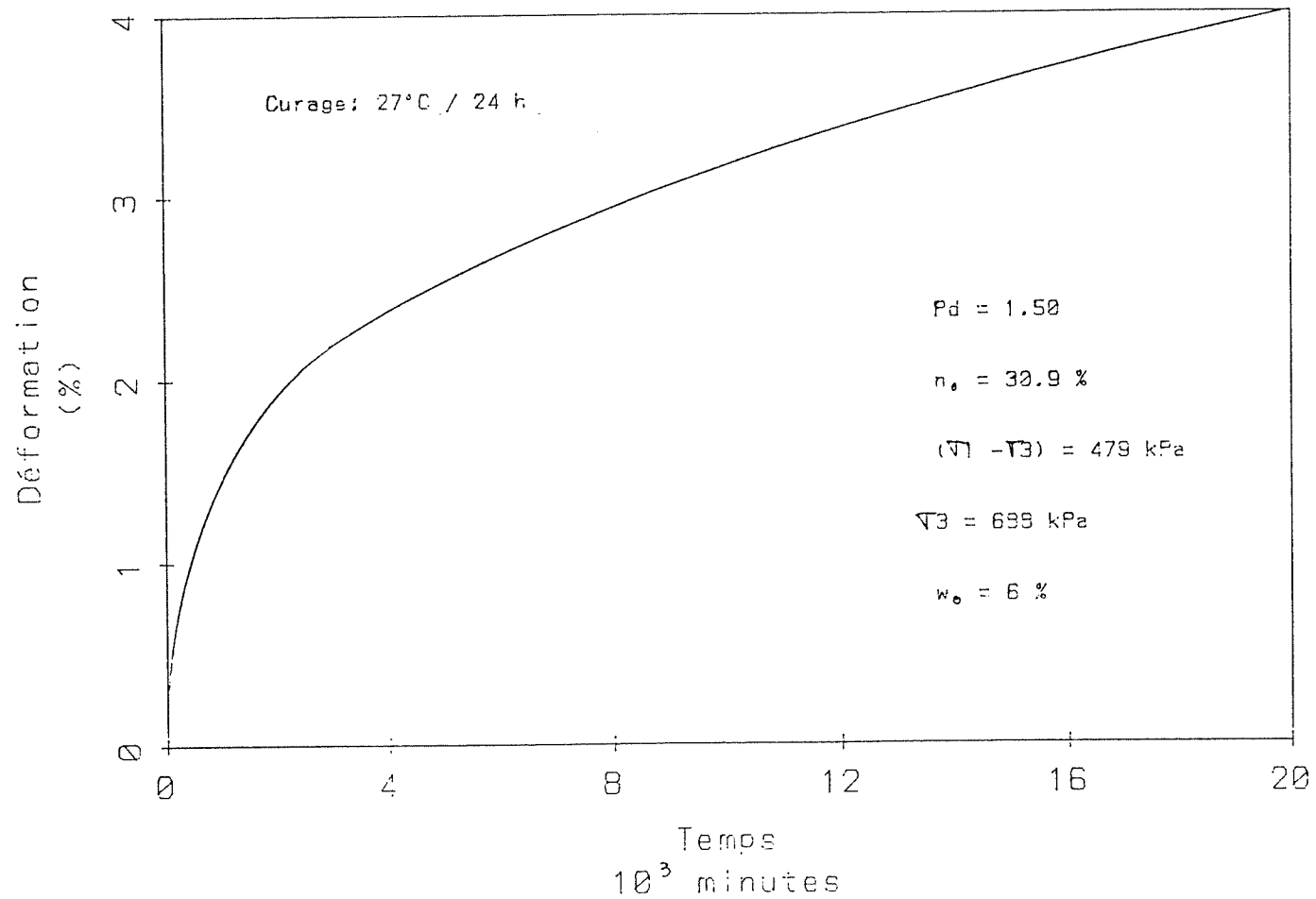


Figure II.63: Courbe de fluage en compression triaxiale sur les rejets de potasse, essai CC-2 (Pufahl et Yoshida, 1982).

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL



3 9334 00289625 4