



HAL
open science

Évolution des caractéristiques mécaniques et de la perméabilité de matériaux argileux sous l'effet de sollicitations thermiques

Véronique Boucly-Norotte

► **To cite this version:**

Véronique Boucly-Norotte. Évolution des caractéristiques mécaniques et de la perméabilité de matériaux argileux sous l'effet de sollicitations thermiques. Minéralogie. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1991. Français. NNT: . pastel-00569032

HAL Id: pastel-00569032

<https://pastel.hal.science/pastel-00569032>

Submitted on 24 Feb 2011

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

3534

NS 16259
(A)

ECOLE NATIONALE DES PONTS ET CHAUSSEES

**EVOLUTION DES CARACTERISTIQUES MECANQUES
ET DE LA PERMEABILITE DE MATERIAUX ARGILEUX
SOUS L'EFFET DE SOLLICITATIONS THERMIQUES**

THESE
présentée par

Véronique BOUCLY-NOROTTE

pour obtenir le titre de

DOCTEUR

de l'ECOLE NATIONALE DES PONTS ET CHAUSSEES

en

GEOLOGIE DE L'INGENIEUR



Soutenue le 19 décembre 1991
devant le jury composé de :

MM M. ARNOULD
J. ESTEOULE
J.P. MAGNAN
V. BOUCLY-NOROTTE
V. BOUCLY-NOROTTE

ENPC

DOC08725
examinateur
Examinateur

10

20



AVANT PROPOS

Je tiens à exprimer ici toute ma reconnaissance aux nombreuses personnes qui m'ont aidée dans la réalisation de ce travail. Je remercie :

Monsieur le professeur ARNOULD qui m'a accueillie au Centre de Géologie de l'Ingénieur et témoigné sa confiance en me proposant ce sujet de recherche.

L'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, en la personne de son directeur Monsieur LAGARDERE, pour le soutien financier qu'elle m'a apportée par l'octroi d'une bourse de recherche.

Monsieur le professeur ESTEOULE, professeur à l'I.N.S.A. de Rennes, pour l'intérêt qu'il porte à ce travail en me faisant l'honneur de participer à ce jury en qualité de rapporteur.

Monsieur MAGNAN, directeur technique du L.C.P.C., qui me fait l'honneur de participer à ce jury en qualité de rapporteur.

Monsieur BOISSON, ingénieur à l'I.P.S.N. (C.E.A.), qui a suivi ce travail, et le C.E.A. qui en a financé une partie.

Madame GUILLAUME, professeur à l'Université de Paris VI, qui m'a très bénévolement aiguillée au Centre de Géologie de l'Ingénieur, commun à l'E.N.S.M.P. et l'E.N.P.C., à mon retour d'Ethiopie.

Monsieur BILLIOTTE, maître de recherche à l'E.N.S.M.P., qui a encadré ce travail. Ses critiques et ses analyses judicieuses m'ont fait progresser dans mes recherches, il fut souvent à l'origine de nouvelles investigations.

Monsieur DEVEUGHELE, maître de recherche à l'E.N.P.C., dont les connaissances et la rigueur scientifique m'ont été souvent utiles.

Madame AUDIGUIER, ingénieur de recherche à l'E.N.S.M.P., qui a secondé Monsieur BILLIOTTE pour son encadrement, en particulier pendant le séjour de celui-ci en Australie. Elle a suivi dans le détail tout mon travail et m'a consacré beaucoup de temps. Ses connaissances scientifiques et techniques sûres, ses idées, son esprit constructif et sa bonne humeur sont autant de qualités dont j'ai eu la chance de profiter tout au long de mon étude, et je lui en suis profondément reconnaissante.

Monsieur LABERTHONNIERE, technicien au C.G.I., qui m'a très largement et très efficacement aidé pour le montage, le suivi et les améliorations de la "manip" avec le concours de Monsieur BILLIOTTE pour la partie informatique. Ses nombreuses idées ont souvent été un gain de temps conséquent et j'ai beaucoup apprécié sa disponibilité aux moments importants.

Les entreprises :

- R.A.T.P. en la personne de Monsieur FABRE
- CIMENTS LAFARGE en la personne de Monsieur RIVES
- DAMREC en la personne de M.ETRONNIER
- AGS en la personne de M.TEYTON
- HUGUENOT FENAL en la personne de M.LAOLOND

qui m'ont fourni les échantillons d'argile indispensables à cette étude.

Madame LAPEYRE, ingénieur de recherche à l'E.N.S.M.P., pour son aide technique et ses remarques en particulier pour les analyses minéralogiques par diffraction des rayons X.

Messieurs REBOUR et GAZZHALI, chercheurs au C.G.I., qui ont consacré leur stage de DEA à une partie de cette étude.

Monsieur BIHANNIC, dessinateur au C.G.I., pour la réalisation d'un grand nombre d'illustrations.

Monsieur LESAFFRE, technicien au C.G.I., qui m'a de nombreuses fois aidé pour le montage ou le démontage des essais, la reproduction et la reliure des différents rapports d'avancement et de ce manuscrit final. Je ne saurais oublier ici le concours de Messieurs HERVOIR et TRICOT.

Mes pensées et ma reconnaissance vont aussi aux nombreux chercheurs, élèves chercheurs ou membres du C.G.I. avec qui j'ai eu l'occasion d'avoir des échanges de vue intéressants et qui m'ont encouragée par leur sympathie. Je citerai également Eric TANAIS et Denis LECA.

Je remercie également Monsieur DEMANEE et tous les membres fondateurs de l'ACMIP (Association des Chercheurs de l'école des Mines de Paris) avec qui nous avons eu des échanges très enrichissants sur "le chercheur": ses désirs, ses motivations, son avenir.... La création de cette association a été l'occasion de former des liens professionnels et amicaux entre chercheurs de différents centres.

Enfin je ne saurais oublier ma famille, parents, beaux parents et tout spécialement mon mari qui m'a aidée dès qu'il le pouvait, encouragée et soutenue à tous les instants.

SOMMAIRE

INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 CARACTERISTIQUES GENERALES DES MATERIAUX ARGILEUX ET LEUR EVOLUTION AVEC LA TEMPERATURE	3
1. CARACTERISTIQUES MINERALOGIQUES, CHIMIQUES ET TEXTURALES	5
1.1. Les grands groupes d'argile	5
1.1.1. Groupe des KAOLINITES	5
1.1.2. Groupe des ILLITES	8
1.1.3. Groupe des SMECTITES	8
1.1.4. Evolution avec la température	8
1.2. Les forces physico-chimiques entre particules	10
1.2.1. Les forces attractives	10
1.2.2. Les forces répulsives	10
1.2.3. Influence de la température sur ces forces	11
2. CARACTERISTIQUES HYDRIQUES	11
2.1. Les deux formes de l'eau	11
2.1.1. Eau liée	11
2.1.2. Eau libre	12
2.2. La double couche et la température	12
3. CARACTERISTIQUES PHYSIQUES	15
3.1. Porosité	15
3.2. Teneur en eau et saturation	15
3.3. Limites d'Atterberg	15
3.4. Dilatation des composants du sol	16
3.5. Perméabilité	18
4. CONCLUSION	20
CHAPITRE 2 ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE DE LA DEFORMATION UNIDIMENSIONNELLE DES SOLS ARGILEUX	21
1. PRESENTATION DES DIFFERENTES CELLULES OEDOMETRIQUES	24
2. DESCRIPTION D'UN CHARGEMENT A TEMPERATURE AMBIANTE	24
2.1. Tassement instantané	27
2.2. Consolidation primaire	27
2.3. Consolidation secondaire et fluage	30
2.4. Modélisation du fluage unidimensionnel	32
2.4.1. Importance du temps	34
2.4.2. Théorie du fluage (lois semi-empiriques)	34
2.4.3. Théories fondées sur les corps idéaux	35
2.4.4. Théorie du fluage héréditaire	35
3. DESCRIPTION DE CHARGEMENTS A TEMPERATURE CONSTANTE ET SUPERIEURE A 25°C	38
3.1. Influence de la température sur la courbe de compressibilité	38

3.2. Influence de la température sur le tassement instantané	40
3.3. Influence de la température sur la vitesse de consolidation	40
3.4. Influence de la température sur la compression secondaire	42
4. CONSOLIDATION SOUS SOLLICITATIONS THERMIQUES VARIABLES	43
4.1. Rôle de la température	47
4.2. Rôle du degré de surconsolidation	49
4.3. Rôle de la teneur en eau	52
4.4. Rôle de la minéralogie	52
4.5. Rôle de la granulométrie et de la plasticité	53
4.6. Rôle de la pression appliquée	53
4.7. Rôle du temps	53
5. CONCLUSION	54
CHAPITRE 3 CARACTERISATION MINERALOGIQUE, GEOTECHNIQUE ET TEXTURALE DES MATERIAUX SELECTIONNES POUR L'ETUDE	55
1. INTRODUCTION, OBJECTIF DE LA SELECTION	57
2. PRESENTATION DES SITES DE PRELEVEMENT	57
2.1. VEXIN	57
2.2. PLATEAU DE BRIE	57
2.3. PROVINS	58
3. MINERALOGIE	58
4. GRANULOMETRIE	58
5. CARACTERISTIQUES GEOTECHNIQUES	59
5.1. Caractéristiques d'identification géotechnique	59
5.2. Caractérisation mécanique	61
5.2.1. Modalité des essais oedométriques	61
5.2.2. Résultats et interprétation des essais	61
6. PERMEABILITE	63
7. TEXTURE DES ARGILES A L'ETAT INITIAL	63
7.1. Terminologie	63
7.2. Argile verte de LAGNY	65
7.3. Argile de ST GENEST	65
7.3.1. A l'état intact	65
7.3.2. Après gonflement libre	67
7.4. Argile de LIMAY	69
8. CONCLUSION, SELECTION DES MATERIAUX	69
CHAPITRE 4 DISPOSITIF EXPERIMENTAL ET CONDUITE DES ESSAIS	71
1. LA CELLULE OEDOMETRIQUE ET SON ENVIRONNEMENT	73
1.1. Introduction, principe de l'étude	73
1.2. Spécificités de la cellule	73
1.3. Description de l'oedomètre	73
1.3.1. Description de la cellule oedométrique	73
1.3.2. Description du vérin de l'oedomètre	76
1.3.3. Description du bâti de presse	76
1.3.4. Nature des matériaux	77

1.4. Description de l'environnement de la cellule	77
1.5. Essais de qualification	79
1.5.1. Etanchéité de la cellule	79
1.5.2. Influence de la température sur le système de mesure	79
1.6. Mesures du chargement	83
1.7. Montée en température de l'échantillon	83
1.8. Conclusion	83
2. DEROULEMENT DES TRAVAUX EXPERIMENTAUX	83
2.1. Principe des essais	83
2.2. Mode opératoire	84
2.3. Planning des essais	85
2.3.1. Programme initial	85
2.3.2. Adaptation du programme	85
3. CONCLUSION	86
CHAPITRE 5 LES RESULTATS	89
1. ESSAIS OEDOMETRIQUES A 20-50-110°C	91
1.1. LAGNY	91
1.2. ST GENEST	92
1.3. LIMAY	95
1.4. Conclusion	97
2. ESSAI DE CONSOLIDATION A TEMPERATURE CONSTANTE: 20,50,80 ou 110°C	98
2.1. ST GENEST.G	99
2.2. ST GENEST.N	102
2.3. LAGNY	104
2.4. LIMAY	105
2.5. Conclusion	106
3. ESSAI DE MONTEE RAPIDE EN TEMPERATURE: 20-50, 20-80 et 20-110	108
3.1. LAGNY	112
3.2. ST GENEST.N	112
3.3. LIMAY	113
3.4. Conclusion	114
4. MONTEE DE 20 à 80°C à DES VITESSES DIFFERENTES :	116
4.1. LIMAY	122
4.2. ST GENEST.N	122
4.3. Conclusion	123
5. MONTEE ET DESCENTE PROGRESSIVE PAR PALIERS DE 30°C: "20-110", "20-50-20", "20-80-20", et "20-110-20"	124
5.1. LAGNY	126
5.2. ST GENEST.N	128
5.3. ST GENEST.G	130
5.4. LIMAY	130
5.5. Conclusion	133
6. ETUDE DE LA TEXTURE	135
6.1. Courbes de porosimétrie au mercure	135
6.1.1. LAGNY	136
6.1.2. ST GENEST.N	136
6.1.3. ST GENEST.G	136
6.1.4. LIMAY	136

6.1.5. Conclusion	141
6.2. Observation au M.E.B.	142
6.3. Analyse des mesures de perméabilité en cours d'essai	142
6.3.1. Principe des mesures de perméabilité	142
6.3.2. Résultats	143
6.4. Conclusion	148
CHAPITRE 6 CONCLUSION GENERALE	151
BIBLIOGRAPHIE	155
ANNEXE A CORRECTION C3 SUR LES MESURES DU CHARGEMENT	161
ANNEXE B MODELISATION DU FLUAGE PAR FELIX	165
ANNEXE C RAYONS X	169
ANNEXE D COURBES DE CONSOLIDATION CORRESPONDANT AUX DIFFERENTS PALIERS DES ESSAIS OEDOMETRIQUES DECRITS AU PARAGRAPHE 5.1.	175
ANNEXE E COURBES DE CONSOLIDATION POUR LES ECHANTILLONS MIS SOUS CHARGE A UNE TEMPERATURE CONSTANT DE 20, 50, 80 ou 110°C.	191
ANNEXE F COURBES DE CONSOLIDATION POUR LES MONTEES PROGRESSIVES ET DESCENTES PROGRESSIVES PAR PALIER DE 30°C	201
ANNEXE G COURBE DE MONTEE EN TEMPERATURE AU MILIEU DE L'EPROUVETTE	217

FIGURES

Figure 1.1:	Représentation du tétraèdre SiO_4^{4-} .	6
Figure 1.2:	Vue en perspective de la structure d'un feuillet tétraédrique arrangé selon un réseau hexagonal.	6
Figure 1.3:	Structure d'alumine tétraédrique	6
Figure 1.4:	Représentation en perspective d'une couche de kaolinite.	7
Figure 1.5:	Représentation en perspective d'une structure de muscovite.	7
Figure 1.6:	Représentation en perspective d'une structure de smectite.	9
Figure 1.7:	Structure de la double couche électronique (G.BAUDET 1981).	9
Figure 1.8:	Distribution du potentiel entre deux particules plates parallèles.	13
Figure 1.9:	Evolution des limites d'Atterberg avec la température.	13
Figure 1.10:	Loi des variations de la vitesse de filtration aux faibles gradients.	16
Figure 2.1:	Courbe de compressibilité et construction de σ'_c	24
Figure 2.2:	Schéma de l'oedomètre à chargement pneumatique du CECP d'Angers.	25
Figure 2.3:	Schéma de l'oedomètre à contre-pression du CECP d'Angers.	25
Figure 2.4:	Cellule de ROWE: Schéma de principe (ROWWE 1966)	26
Figure 2.5:	Courbe oedométrique.	26
Figure 2.6:	Représentation en fonction du temps des surpressions interstitielles rapportées à la charge appliquée.	28
Figure 2.7:	Isochromes caractéristiques de la consolidation de l'argile de CBZAC-LES -PONTS sous une forte charge de 320 kPa.	28
Figure 2.8:	Méthode pour la mesure du coefficient de consolidation c_v , (a) la racine carré par TAYLOR, (b) le logarithme par CASAGRANDE.	31
Figure 2.9:	Déformations de consolidation calculées et mesurées pour différentes charges constantes.	31
Figure 2.10:	Courbe de compressibilité oedométrique.	31
Figure 2.11:	Histoire géologique et compressibilité d'une argile normalement consolidée.	33
Figure 2.12:	Courbes typiques de la relation contrainte-déformation-vitesse de déformation pour une argile (LEROUEIL 1987).	33
Figure 2.13:	Modèles rhéologiques: (a) utilisé par MERCHANT (FELIX 1981), (b) de HOOKE, (c) de KELVIN-VOIGT	36
Figure 2.14:	Essais de compressibilité à différentes températures sur l'argile noire.	36
Figure 2.15:	Consolidation isotrope d'une illite saturée.	36
Figure 2.16:	Essais de compressibilité à différentes températures sur une bentonite.	39
Figure 2.17:	Courbes de compressibilité à différentes températures sur le loess de Rungis.	39
Figure 2.18:	Comparaison des valeurs de t_{100} pour les deux types d'essais à 20°C (classique) et à 70°C (accéléré).	41
Figure 2.19:	Essais oedométriques sur l'argile de Vallauris à différentes températures ($\sigma-t_{100}$).	41
Figure 2.20:	Essais oedométriques sur la bentonite à différentes températures ($\sigma-t_{100}$).	41
Figure 2.21:	Coefficient de consolidation secondaire en fonction de la température pour le loess de Rungis.	44
Figure 2.22:	Courbe (volume d'eau drainé-logarithme du temps) suite à un changement de température à pression constante.	44
Figure 2.23:	Variation de volume total $(dV_{tot})_{dt}$ due à un changement de température.	45
Figure 2.24:	Variation de volume structural $(dV_{st})_{dt}$ due à des phénomènes physico-chimiques	45

Figure 2.25:	Détail d'une courbe oedométrique classique avec un cycle chargement- déchargement.	48
Figure 2.26:	Courbe (Vess.drainé-lg(t)) à chaque palier de pression eau cours duquel un cycle 25-50-25°C est appliqué.	48
Figure 2.27:	Effet de cycles 25-50-25°C sur la courbe de compressibilité.	48
Figure 2.28:	Relation U_{max} (essai non drainé) et u (essai drainé).	50
Figure 2.29:	Effet du taux de surconsolidation sur le changement de volume d'une illite dû au chauffage de 24 à 50°C.	50
Figure 2.30:	Courbes de déformation volumique avec la température pour un cycle de chauffage-refroidissement: (a) hystérésis de la courbe pour l'argile silteuse de Pontilda chargée à 0,5 MPa et OCR=2, (b) argile de Boom normalement consolidée (BALDI).	50
Figure 2.31:	Courbes de déformation verticale au cours du chauffage sous pression effective isotrope constante pour l'argile silteuse de Pontilda.	51
Figure 2.32:	Droites des points de rupture à la compression en fonction de la teneur en eau pour différentes températures.	51
Figure 2.33:	Courbe (I_p -(de_{st}) _{dt}) pour un cycle de température 25-50-25°C.	51
Figure 3.1:	Courbes granulométriques des argiles de (1) LAGNY, (2) ST.GENEST, (3) LIMAY.	60
Figure 3.2:	Classification de laboratoire des sols fins, diagramme de plasticité LCPC 1965.	60
Figure 3.3:	Courbes de consolidation en fonction de la contrainte effective à 20°C pour les argiles de LAGNY, ST.GENEST, et LIMAY.	62
Figure 3.4:	Courbes porosimétriques par injection de mercure pour les argiles à l'état intact de LAGNY, ST.GENEST et LIMAY.	64
Figure 3.5:	Modèles des principales textures des argiles sédimentaires.	64
Figure 3.6:	Courbes porosimétriques par injection de mercure pour l'argile de ST.GENEST: intact et après gonflement.	66
Figure 4.1:	Plan de la cellule oedométrique.	75
Figure 4.2:	Plan du vérin pour oedomètre.	75
Figure 4.3:	Plan du bâti de presse pour oedomètre.	75
Figure 4.4:	Schéma de principe du banc de mesure.	78
Figure 4.5:	Schéma de principe de la cellule oedométrique.	81
Figure 4.6:	Schéma du programme initial des sollicitations thermiques.	81
Figure 5.1:	Schéma de principe des essais oedométriques à T1 (50 ou 110°C). .	93
Figure 5.2:	Courbes oedométriques de LAGNY à 20, 50 et 110°C.	93
Figure 5.3:	Courbes oedométriques de ST.GENEST à 20, 50 et 110°C.	94
Figure 5.4:	Evolution du taux de compression secondaire "réduit" $C_{\sigma}/(d\sigma'_{n+1}/\sigma'_{n+1})$ avec la pression appliquée σ'_{n+1} pour ST.GENEST et LIMAY.	94
Figure 5.5:	Courbes oedométriques de LIMAY.	97
Figure 5.6:	Schéma de principe des essais de consolidation à 50, 80 ou 110°C. .	97
Figure 5.7:	Courbe de gonflement (taux de gonflement-logarithme du temps) pour ST.GENEST à 20°C.	100
Figure 5.8:	Courbe de gonflement ($t-t_0/(dh/h_0)$) pour ST.GENEST à 20°C.	100
Figure 5.9:	Evolution de $c_{v(T)}/c_{v(20^\circ C)}$ avec la température pour ST.GENEST.G.	101
Figure 5.10:	Evolution de $C_{\sigma e}$ avec le temps pour LAGNY, LIMAY, ST GENEST.N et ST GENEST.G.	101
Figure 5.11:	Paramètres de FELIX.	107
Figure 5.12:	Evolution du c_v "réduit" ($c_v/(d\sigma'_{n+1}/\sigma'_{n+1})$) avec la teneur en eau initiale w_i pour LAGNY et ST.GENEST.	107
Figure 5.13:	Evolution du c_v avec la température pour LIMAY.	107
Figure 5.14:	Evolution de la déformation avec la température à la pression d'antigonflement.	109
Figure 5.15:	Schéma de principe des essais de montée rapide en température (T=50, 80 ou 110°C).	109

Figure 5.16:	Courbe de fluage de l'argile de ST.GENEST.N avec des paliers de température à 20 et 80°C.	111
Figure 5.17:	Courbe de fluage corrigée correspondant au palier à 80°C de la figure.5.16 avec pour origine des temps l'instant d'application de la température et pour origine du tassement la hauteur acquise à cet instant.	111
Figure 5.18:	Courbes de consolidation des trois essais: 20-50, "20-80" et "20-110" sur LAGNY: (a) courbe complète, (b) courbe correspondant aux paliers de température supérieures avec changement d'origine au moment du chauffage.	113
Figure 5.19:	Courbes de consolidation des trois essais: 20-50, "20-80" et "20-110" sur ST.GENEST.N: (a) courbe complète, (b) courbe correspondant aux paliers de température supérieures avec changement d'origine au moment du chauffage.	115
Figure 5.20:	Courbes de consolidation des trois essais: 20-50, "20-80" et "20-110" sur LIMAY: (a) courbe complète, (b) courbe correspondant aux paliers de température supérieures avec changement d'origine au moment du chauffage.	118
Figure 5.21:	Schéma des cinq types de montée en température effectuées de 20 à 80°C.	119
Figure 5.22:	Courbe de consolidation complète pour 5 essais de montée en température de 20 à 110°C à des vitesses différentes: (a) sur ST.GENEST, (b) sur LIMAY.	121
Figure 5.23:	Courbe $(dh - \lg(d(dh)/dt))$ pour LIMAY à 20°C.	119
Figure 5.24:	Courbes de consolidation partielles correspondant au palier de température supérieur pour les essais de la figure 5.22 avec un changement d'origine au moment du début des sollicitations thermiques.	123
Figure 5.25:	Courbes $(dh - \lg(t))$ pour chaque palier de la montée progressive "20-80.TL". L'origine des temps est pour chaque courbe le début de la dernière sollicitation thermique.	125
Figure 5.26:	Schéma de principe des essais de montée et descente progressives par paliers de 30°C.	125
Figure 5.27:	Deux types de représentation d'une consolidation $(dh - \lg(t))$	127
Figure 5.28:	Evolution du C_α pour des incréments de température de 30°C sur LAGNY.	127
Figure 5.29:	Evolution de la déformation verticale d'une éprouvette d'argile de ST.GENEST.N suite à une succession de montées en température de 30°C.	129
Figure 5.30:	Evolution du C_α pour des incréments de température de 30°C sur ST.GENEST.N.	129
Figure 5.31:	Evolution du C_α pour des incréments de température de 30°C sur ST.GENEST.G.	131
Figure 5.32:	Evolution de la déformation verticale d'une éprouvette d'argile de ST.GENEST.G suite à une succession de montées en température de 30°C.	131
Figure 5.33:	Evolution de la déformation verticale d'une éprouvette d'argile de LIMAY suite à une succession de montées en température de 30°C.	132
Figure 5.34:	Evolution du C_α pour des incréments de température de 30°C sur LIMAY.	132
Figure 5.35:	Courbe $(dh - \lg(t))$ pour un cycle 20-50-20°C sur LIMAY.	134
Figure 5.36:	Courbes porosimétriques de l'argile de ST.GENEST (a)-intacte, (b)-gonflée et (c)-gonflée puis tassée.	134
Figure 5.37:	Evolution dans le temps des coefficients de perméabilité K_T et $K_{T,20}$ (à 20°C) lors des essais de fluage sur l'argile de LAGNY. .	144
Figure 5.38:	Evolution dans le temps des coefficients de perméabilité K_T et $K_{T,20}$ (à 20°C) lors des essais de fluage sur l'argile de ST.GENEST.N.	145

Figure 5.39:	Evolution dans le temps des coefficients de perméabilité K_T et $K_{T,20}$ ° (à 20°C) lors des essais de fluage sur l'argile de ST.GENEST.G.	146
Figure 5.40:	Evolution dans le temps des coefficients de perméabilité K_T et $K_{T,20}$ ° (à 20°C) lors des essais de fluage sur l'argile de LIMAY. .	147

TABLEAUX

Tableau 1.1:	Valeurs de la constante diélectrique à différentes températures. . . .	13
Tableau 1.2:	Tableau des valeurs de la masse volumique et de la viscosité à différentes températures comprises entre 0 et 110°C.	19
Tableau 3.1:	Composition minéralogique.	59
Tableau 3.2:	Répartition en classes granulométriques.	59
Tableau 3.3:	Caractéristiques géotechniques.	59
Tableau 3.4:	Résultats de la porosimétrie.	65
Tableau 4.1:	Contraintes théoriques (en kPa) exercées sur la face supérieure de l'échantillon.	76
Tableau 4.2:	Corrections à apporter aux valeurs données par le capteur pour avoir directement le $dh_{\text{échantillon}}$	82
Tableau 4.3:	Pression de préconsolidation appliquée aux échantillons.	84
Tableau 5.1:	Evolution de l'indice de compression en fonction de la température pour LAGNY.	93
Tableau 5.2:	Evolution de l'indice de compression en fonction de la température pour ST.GENEST.	95
Tableau 5.3:	Evolution du fluage avec la température et la pression appliquée σ'_{n+1}	95
Tableau 5.4:	Evolution de l'indice de compression en fonction de la température pour LIMAY.	96
Tableau 5.5:	Evolution du fluage avec la température et la pression appliquée σ'_{n+1}	96
Tableau 5.6:	Evolution des paramètres du fluage en fonction de la température pour ST.GENEST.G.	102
Tableau 5.7:	Evolution des paramètres de fluage de FELIX en fonction de la température pour ST.GENEST.G.	102
Tableau 5.8:	Evolution des paramètres du fluage en fonction de la température pour ST.GENEST.N.	103
Tableau 5.9:	Evolution des paramètres de fluage de FELIX en fonction de la température pour ST.GENEST.N.	103
Tableau 5.10:	Evolution des paramètres du fluage en fonction de la température pour LAGNY.	105
Tableau 5.11:	Evolution des paramètres du fluage en fonction de la température pour LIMAY.	105
Tableau 5.12:	Evolution des paramètres de fluage de FELIX en fonction de la température pour LIMAY.	106
Tableau 5.13:	Comparaison du palier à T avec le palier à 20°C pour LAGNY. . . .	112
Tableau 5.14:	Comparaison du palier à T avec le palier à 20°C pour ST.GENEST.N.	112
Tableau 5.15:	Comparaison du palier à T avec le palier à 20°C pour LIMAY. . . .	114
Tableau 5.16:	Paramètres descriptifs du palier à 80°C après différents types de montée de 20 à 80°C pour LIMAY.	122
Tableau 5.17:	Paramètres descriptifs du palier à 80°C après différents types de montée de 20 à 80°C pour ST.GENEST.N.	122
Tableau 5.18:	Tassements (mm) consécutifs à chaque palier de 30°C des essais effectués sur LAGNY.	128
Tableau 5.19:	Tassements (mm) consécutifs à chaque palier de 30°C des essais effectués sur ST.GENEST.N.	128
Tableau 5.20:	Tassements (mm) consécutifs à chaque palier de 30°C des essais effectués sur ST.GENEST.G.	130
Tableau 5.21:	Tassements (mm) consécutifs aux différents paliers de 30°C des essais effectués sur LIMAY.	133
Tableau 5.22:	Résultats des courbes de porosimétrie au mercure sur des essais de fluage sous sollicitations thermiques diverses pour LAGNY.	137

Tableau 5.23:	Résultats des courbes de porosimétrie au mercure sur des essais de fluage sous sollicitations thermiques diverses pour ST.GENEST.N. .	138
Tableau 5.24:	Résultats des courbes de porosimétrie au mercure sur des essais de fluage sous sollicitations thermiques diverses pour ST.GENEST.G. .	139
Tableau 5.25:	Résultats des courbes de porosimétrie au mercure sur des essais de fluage sous sollicitations thermiques diverses pour LIMAY.	140

RESUME

Cette recherche, entreprise dans le cadre d'un programme de la C.C.E. pour le compte du Commissariat à l'Energie Atomique a pour objectif d'étudier les effets à long terme de variations de température sur le volume et la texture de sols argileux, en fonction notamment de leurs caractéristiques pétrophysiques et pétrographiques initiales et de leur état de consolidation. Cette étude repose d'un point de vue expérimental sur le suivi de la déformation volumique et de la perméabilité d'échantillons placés dans une cellule oedométrique et soumis à des sollicitations thermiques dans la gamme de température 20°C-110°C. Une étude texturale complète (porosimétrie au mercure, observation au M.E.B., etc) avant et en fin d'essai permet d'apprécier l'évolution de la texture des matériaux.

— D'une analyse bibliographique sur les argiles, leurs caractéristiques, leur évolution avec la température et leur déformation volumique uniaxiale lors d'un chargement pour différentes températures, il ressort qu'une argile peut présenter un comportement dilatant ou compactif sous l'effet d'une augmentation de température. Le comportement est le plus souvent compactif à la pression de préconsolidation. Certains paramètres ont un rôle prépondérant ; ce sont : la teneur en eau, l'état de consolidation, la plasticité, la minéralogie et le temps.

— Ces paramètres ont été des critères de sélection afin de retenir quatre matériaux pour la phase expérimentale. Le dispositif expérimental utilisé et conçu au Centre de Géologie de l'Ingénieur est une cellule oedométrique à contre-pression, de conception générale classique, avec des aménagements particuliers destinés notamment à minimiser le frottement latéral du piston, et la dilatation des pièces qui interviennent dans la mesure du déplacement vertical.

— Les principaux résultats obtenus sont :

- une augmentation de la compressibilité entre 20 et 110°C ;
- une évolution du module de fluage avec la température dans le cas d'une application du chargement à cette température ;
- une augmentation du tassement avec l'incrément de température appliqué ;
- un fluage notable d'où l'importance du temps dans la mesure de la déformation ;
- une analogie entre consolidation mécanique et consolidation thermique amenant à effectuer un changement d'origine du temps pour les courbes à chaque nouvelle sollicitation thermique ;
- un comportement fortement irréversible lors du refroidissement ;
- un comportement particulier pour l'argile de LIMAY à rattacher à ses caractéristiques spécifiques: minéralogie, plasticité élevée, perméabilité faible, ... ;
- une modification de la texture du matériau due à la température, modification réelle mais bien moindre que celle due à la pression ;
- la perméabilité intrinsèque est pratiquement indépendante des variations thermiques imposées dans la gamme de 20 à 110°C.

INTRODUCTION

Les quatre formations géologiques envisagées (sel, granite, schistes et argile) pour stocker les conteneurs de déchets radioactifs présentent toutes des avantages mais aussi certains inconvénients. Les matériaux argileux font l'objet du présent rapport. Ils présentent comme caractéristiques favorables : plasticité, perméabilité très faible, capacité d'adsorption élevée.

Dans le cadre du programme "gestion et stockage des déchets radioactifs" de la CCE , le CEA a confié au CGI une étude des effets à long terme de variations de température sur le volume et la texture de sols argileux.

A court terme en l'absence de drainage significatif, il est généralement admis qu'une élévation de température conduit à une augmentation du volume du matériau, augmentation due essentiellement aux phénomènes de dilatation de ses constituants.

A long terme l'effet d'un drainage doit être pris en considération. Une étude récente (C.HURET 1985) a ainsi montré qu'un silt argileux (loess de Rungis- Bassin de Paris) remanié, remis dans un état normalement consolidé, puis resaturé, présente au contraire à long terme sous l'influence d'une augmentation de température une diminution de volume; celle-ci serait liée à une dissipation des surpressions interstitielles générées par le chauffage et une modification de texture du sol consécutive à cette élévation de température. Ce phénomène avait été observé par PLUM et ESRIG (1969) sur une illite lors d'un chauffage de 24 à 50°C. D'autres expérimentateurs ont également fait de telles observations. On ne peut cependant pas affirmer que ce type de comportement soit systématique. Il doit être fonction des caractéristiques minéralogiques, pétrophysiques et du degré de surconsolidation du sol. BALDI (1988) montre l'importance de ce dernier paramètre.

L'étude repose d'un point de vue expérimental sur le suivi de la déformation volumique d'échantillons soumis, dans une cellule oedométrique, à des sollicitations thermiques variables dans la gamme de température allant de 20 à 110°C.

Elle fait l'objet de ce mémoire contenant cinq chapitres :

- (1) une étude bibliographique concernant les argiles, leurs propriétés et leur évolution avec la température ;
- (2) une analyse bibliographique de la déformation uniaxiale verticale de ce type de matériau sous consolidation mécanique. Il ressort de cette partie l'importance prépondérante de certains facteurs comme l'état de consolidation, la nature minéralogique, la teneur en eau, la plasticité et le temps... Ces paramètres sont par conséquent les critères de choix utilisés pour sélectionner quatre matériaux sur lesquels on a effectué les essais ;
- (3) une caractérisation minéralogique, géotechnique et texturale des trois argiles retenues en provenance de LAGNY, ST GENEST et LIMAY. L'argile de ST GENEST est étudiée sous deux états: intact, et remanié sous forme d'un gonflement libre d'une semaine ;
- (4) une description du dispositif expérimental constitué de cellules oedométriques spécifiques mises au point au Centre de Géologie de l'Ingénieur, afin de limiter le frottement latéral du piston ainsi que les corrections dues à la température et d'effectuer des essais de longue durée jusqu'à 110°C ;
- (5) une présentation et une interprétation des résultats des nombreux essais de déformation volumique effectués :
 - essais oedométriques à 20, 50 et 110°C
 - essais de montée rapide à 50, 80 et 110°C
 - essais de montée à 80°C à des vitesses différentes

- essais de montée progressive à 50, 80 et 110°C suivie de descente progressive à 20°C
- essais de montée progressive arrêtée à 110° C

Une analyse de l'évolution de la perméabilité au cours des essais et des modifications texturales termine ce chapitre.

Chapitre 1

CARACTERISTIQUES GENERALES DES MATERIAUX ARGILEUX ET LEUR EVOLUTION AVEC LA TEMPERATURE

1. CARACTERISTIQUES MINERALOGIQUES, CHIMIQUES ET TEXTURALES

Le critère physique le plus élémentaire est la dimension des particules constituant le sol. Du plus gros au plus fin on distingue les graviers, les sables plus ou moins grossiers, les silts et enfin les argiles dont le diamètre est inférieur à $2\mu\text{m}$. Les particules argileuses ont un comportement particulier, et deux sols ayant une même répartition granulométrique caractéristique des argiles peuvent présenter des propriétés très différentes. Il faut donc aller plus loin dans la description de ces matériaux et faire notamment une analyse minéralogique.

La méthode de diffractométrie aux rayons X permet de distinguer plusieurs types d'argile d'après leur structure. On classe ces matériaux argileux en différents groupes.

1.1. Les grands groupes d'argile

Parmi les différents groupes d'argiles, citons les plus connus :

- les kaolinites,
- les illites,
- les smectites.

Les minéraux interstratifiés sont des mélanges réguliers ou non de feuillets de minéraux argileux simples.

Les éléments de base dans la structure des minéraux argileux sont de deux types : des tétraèdres de silice (figure 1.1) et des octaèdres d'alumine (figure 1.3) dont les ions Si et Al peuvent être remplacés par d'autres ions de rayons ioniques similaires et pouvant entrer dans une structure tétraédrique ou octaédrique.

Ainsi Si^{4+} peut être remplacé par Al^{3+} et

Al^{3+} peut être remplacé par Mg^{2+} ou Fe^{3+} .

Le premier élément de base est constitué d'un atome de silicium de valence (+4) entouré par quatre atomes d'oxygène de valence (-2). Dans la structure en feuillet présentée sur la figure 1.2, il reste pour chaque élément de base une charge négative sur l'oxygène supérieur, qui peut atteindre un état d'équilibre s'il fixe un ion H^+ .

Le deuxième élément de base est constitué d'un atome d'aluminium équidistant de six atomes d'oxygène ou hydroxyles, selon une coordination octaédrique présentée sur la figure 1.3.

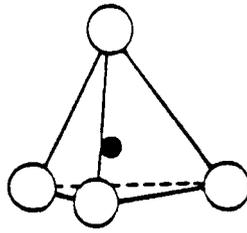
Ces deux éléments peuvent s'assembler en feuillets que l'on symbolisera par un trapèze pour les tétraèdres (de silicium) et par un rectangle pour les octaèdres (d'aluminium ou autre).

1.1.1. Groupe des KAOLINITES

La formule générale du groupe des kaolinites est $(\text{Si}_2)(\text{Al}_2)\text{O}_5(\text{OH})_4$ (extrait de Grimm 1968).

Les feuillets Si et Al sont fortement liés du fait de l'oxygène qu'ils mettent en commun (cf figure 1.4). Les faces inférieures des feuillets Si sont chargées par des oxygènes, et les faces supérieures des feuillets Al par des groupes hydroxyles OH^- , ce qui permet la création de liens hydrogènes puissants entre les couches successives. Les feuillets presque en contact empêchent les molécules d'eau, dont le diamètre de $2,7 \text{ \AA}$ est important, de pénétrer.

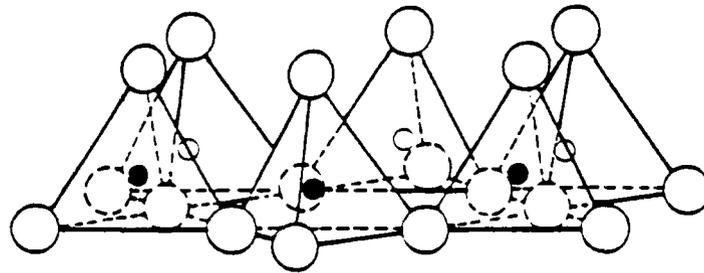
En microscopie électronique, les minéraux de kaolinite se présentent sous forme de plaquettes hexagonales correspondant à un empilement de 10^3 à 10^6 feuillets élémentaires parfois remarquablement bien développées ; cependant on constate certaines déformations et en particulier des élongations. D'autre part, les cristaux peuvent manifester des altérations plus ou moins marquées, se traduisant par une exfoliation des feuillets ou une corrosion du cristal.



● Silicium

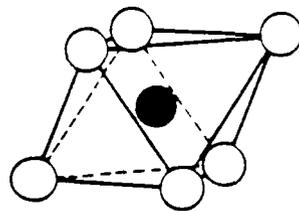
○ oxygène

Figure 1.1 Représentation du tétraèdre SiO_4^{4-}



○ et ○ oxygène ○ et ● silicium

Figure 1.2 Vue en perspective de la structure d'un feuillet tétraédrique arrangé selon un réseau hexagonal



○ hydroxyle ou oxygène ● aluminium

Figure 1.3 Structure d'alumine tétraédrique

1.1.2. Groupe des ILLITES

Les couches de ces minéraux sont constituées de deux feuillets de tétraèdres Si qui mettent en commun leur oxygène avec une couche d'octaèdres d'Al (au milieu, cf figure 1.5).

L'équilibre électrique est assuré par un nombre adéquat de $(OH)^-$ et $(O)^{2-}$. Quand Si^{4+} est remplacé par Al^{3+} , de gros ions K^+ viennent s'intercaler entre les couches pour assurer l'électroneutralité.

En microscopie électronique les illites sont caractérisées par de très fines particules de quelques centaines d'Angströms de diamètre, souvent équidimensionnelles mais pouvant s'allonger légèrement dans certains cas et prendre la forme de lattes.

1.1.3. Groupe des SMECTITES

La caractéristique essentielle de ce minéral (cf figure 1.6) est de posséder entre des couches de même constitution que l'illite un certain nombre de couches d'eau, si bien que la distance entre deux couches est très variable.

Cette capacité d'absorption d'eau est réversible, le matériau gonfle et peut atteindre plusieurs fois son volume sec. Plusieurs substitutions sont possibles, surtout dans la couche octaédrique, et peuvent créer un déficit de charge annihilé par l'adsorption d'ions extérieurs Na^+ ou Ca^{2+} .

En microscopie électronique, les smectites se présentent sous la forme de feuillets très étendus ayant souvent un aspect fripé ou des bords enroulés. La taille des particules est nettement inférieure au micromètre, et leur épaisseur est très faible, quelques dizaines d'Angströms, c'est à dire ici quelques feuillets.

Il arrive fréquemment que les argiles rencontrées dans la nature soient constituées d'un mélange de deux ou plusieurs minéraux argileux appartenant à différents groupes. On les appelle alors des interstratifiés.

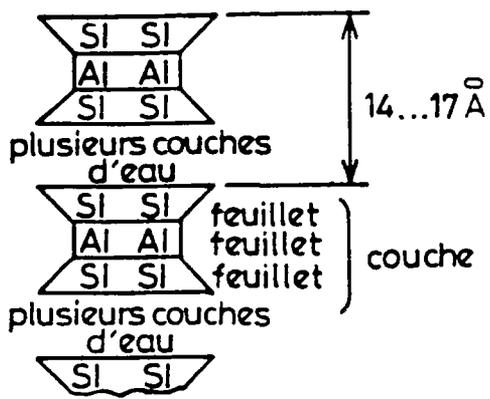
1.1.4. Evolution avec la température

L'étude de la diagénèse apporte des renseignements sur le comportement des argiles soumises à des conditions de température et de pression variables. Ces observations sont valables à température élevée pour des pressions très supérieures à celles que nous appliquerons dans nos expériences, mais elles peuvent malgré tout être retenues à titre d'indication.

— Ainsi à partir de 70 à 80°C (DUNOYER de SEGONZAC 1970) la destruction de la kaolinite peut déjà être déclenchée dans les sédiments argileux sous pression. Ce minéral persiste pourtant au delà de 200°C. La kaolinite se transforme probablement en chlorite vers 150 à 200°C. S'il y a beaucoup de potassium et un pH élevé, la kaolinite se transforme en illite (HENLEY 1959).

— Les minéraux argileux les plus sensibles à la température sont les argiles gonflantes (smectites) qui se transforment dès 40°C en interstratifiés illite-smectite. En effet, la couche de base de cette argile est identique à celle des illites (3 feuillets Si-Al-Si), mais le lien entre les couches successives est assuré par de l'eau en quantité variable. Les faibles liens retenant cette eau entre les couches favorisent la déshydratation sous des températures modérées. On assiste fréquemment à une transformation progressive en illite, pour autant que la teneur en K soit suffisante pour créer un lien intercouche typique de ce minéral. Cette transformation entraîne des changements de composition des eaux interstitielles et un effondrement de la texture. Ce dernier est contrarié par l'imperméabilité des argiles.

— Les substances organiques semblent elles aussi très sensibles aux températures supérieures à 60°C. La libération des gaz lors de l'échauffement est empêchée par l'imperméabilité de ces matériaux argileux.



Représentation schématique d'une smectite

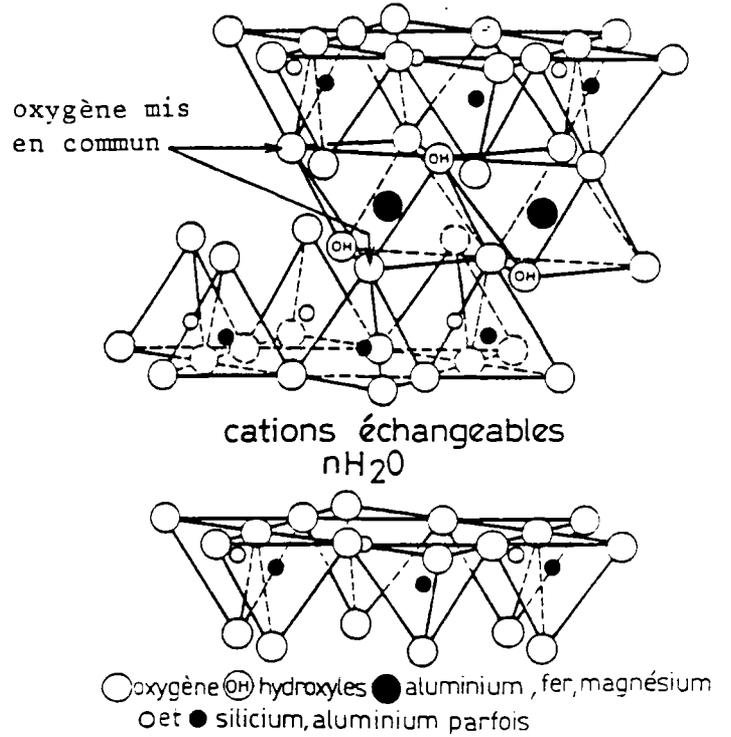


Figure 1.6 Représentation en perspective d'une structure de smectite

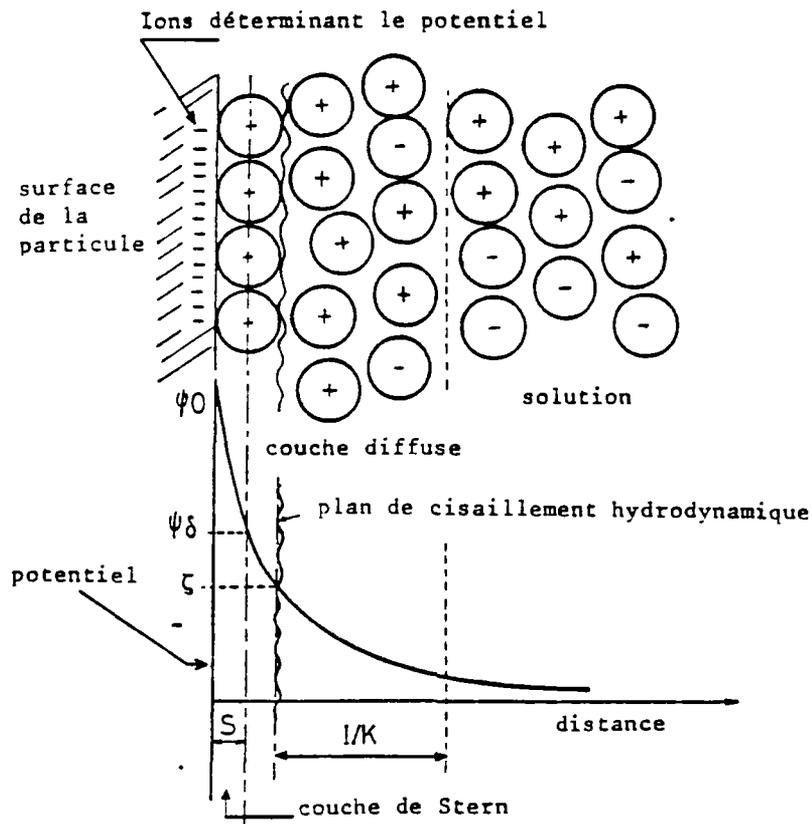


Figure 1.7 Structure de la double couche électronique (G. Baudet, 1981)

1.2. Les forces physico-chimiques entre particules

Les substitutions isomorphes de Si et Al par d'autres cations sont courantes dans les argiles et s'accompagnent de modifications de la charge électrique des particules vers des charges négatives. Ces déficits en charge peuvent aussi provenir de l'interruption du cristal. Ainsi les arêtes seront chargées négativement car il n'y a pas d'autres tétraèdres ou octaèdres à mettre en commun. Ce phénomène est plus marqué pour de petites particules et est à l'origine de l'attraction de cations divers et de la répulsion des anions. Les cations, plus ou moins hydratés selon leur nature, influenceront l'hydratation des particules argileuses.

Ceci montre l'existence de forces physico-chimiques qui régissent l'équilibre entre les particules. Les observations au microscope électronique à balayage sur les associations de particules témoignent de l'importance de ces forces. Celles-ci sont de deux types : attractives ou répulsives.

1.2.1. Les forces attractives

Elles proviennent des liaisons:

– **de covalence** : mise en commun d'un ou plusieurs électrons de deux atomes pour assurer la neutralité électrique ;

– **ionique** : les cations apportent l'électroneutralité.

Dans le cas de l'illite, les atomes de potassium sont piégés entre les groupes hydroxyles plus petits et l'eau ne peut pénétrer. Cette liaison est forte. Dans le cas des smectites, les cations Na^+ , Ca^{2+} sont attirés par la surface des feuillets. L'espace interfoliaire est suffisant pour laisser pénétrer les molécules d'eau, et l'hydratation libère une énergie supérieure aux forces d'attraction entre couches d'argile. Les liaisons deviennent faibles et l'espace interfoliaire augmente avec H_2O , d'où un gonflement important du minéral.

– **hydrogène** : liaison entre un groupement A-H et un atome B pour autant que l'électronégativité de B et la distance A...B soient adéquates.

Dans le cas de la kaolinite, une face d'une couche comporte des oxygènes considérés comme pôles négatifs, et l'autre face des groupes hydroxyles contenant H^+ . Cet ion de diamètre très faible forme une liaison hydrogène entre les deux couches successives et est à l'origine de leur empilement. L'eau ne peut donc y pénétrer. Ce lien est très fort perpendiculairement aux feuillets et faible tangentiellement. Ce type de lien puissant intervient entre la surface d'une particule chargée en O^- et la molécule H_2O , et donne à la première couche d'eau une structure particulière proche de la glace.

– **de Van Der Waals**: ce sont des liaisons électromagnétiques entre dipôles. A tout moment il y a plus d'électrons d'un côté du noyau d'un atome que de l'autre, d'où formation de dipôles qui se rattachent par leur côté opposé électriquement. Les forces mises en jeu sont faibles mais additives (d'où leur importance) et diminuent très lentement avec la distance. Elles sont suffisamment fortes pour déterminer l'arrangement final de certains solides et sont une source majeure de cohésion dans les sols fins (MITCHELL 1976). Les forces d'adhésion dans les sols argileux "humides" sont principalement du type Van Der Waals (ROSENQVIST 1959).

1.2.2. Les forces répulsives

L'hydratation des ions et particules argileuses oriente les molécules d'eau et génère des répulsions pour les particules proches jusqu'à une distance de 20 Å (HURET 1985).

1.2.3. Influence de la température sur ces forces

FLEUREAU (1979) énonce que l'augmentation de température accroît la tendance à la "floculation", du fait de l'accroissement des forces d'attraction entre particules. Il cite CITTANOVA (1970) qui a montré avec d'autres que ce type de structure correspond, à température constante, à une compressibilité et une perméabilité plus grandes du matériau. C'est pour la bentonite (famille des smectites) qu'il a obtenu les modifications de structure et les tassements les plus importants.

HURET (1985) en reprenant la théorie de LIFSCHITZ (1961) (cité par HURET 1985) sur la mesure de la force de Van Der Waals entre deux particules calcule cette force à différentes températures et montre qu'elle augmente de 5% entre 5° et 80°C. Cette augmentation peut provoquer un resserrement des liaisons entre particules.

Il s'est aussi intéressé à l'énergie d'activation. Les atomes, les molécules et les particules qui font partie du matériau qui se déforme, sont soumis à un mouvement relatif les uns par rapport aux autres. Cette interaction se traduit par l'existence de barrières d'énergie séparant deux positions d'équilibre. Dans le cas d'un sol, le mouvement d'une particule argileuse ou d'un atome jusqu'à une nouvelle position d'équilibre, nécessite un apport d'énergie d'activation F. MITCHELL (1964) définit dF comme l'énergie nécessaire à la rupture d'un contact au niveau atomique appelé lien.

La sollicitation thermique apporte une énergie qui permet de rompre des liens et permet au matériau d'atteindre un état final d'équilibre à énergie d'activation plus élevée.

2. CARACTERISTIQUES HYDRIQUES

Nous venons de voir, que par suite de substitutions atomiques, la maille cristalline peut avoir un certain déficit en charges positives. De même, dans chaque couche, certaines valences en bordure du feuillet ne sont pas saturées (O^{2-} , OH^-) puisque l'ordonnance normale des ions est interrompue, ce qui génère un déséquilibre électrique. Donc, globalement, chaque particule argileuse est chargée négativement sur sa surface, et les feuillets qui la composent sont plus ou moins fortement liés les uns aux autres. L'eau contenue dans le sol est donc soumise à un champ électrique près de la surface des particules. Les molécules d'eau sont alors orientées par rapport à la paroi des particules (cf figure 1.7) et n'ont plus les propriétés physiques de l'eau normale : il s'agit de "l'eau liée".

Chaque particule est ainsi enveloppée d'un film d'eau de nature spéciale, la "couche adsorbée".

L'eau contenue dans les argiles a un rôle essentiel dans le comportement de celles-ci du fait des liaisons qui l'unissent aux particules et lui confèrent des propriétés particulières, telles que la plasticité et la cohésion.

2.1. Les deux formes de l'eau

Les molécules d'eau orientées à la surface des particules forment une chaîne le long de laquelle les propriétés de l'eau varient graduellement : au voisinage du grain ce sont celles d'un solide, alors qu'à plus de 0,5 μm de la surface des particules on retrouve les caractéristiques de l'eau libre.

Il est donc nécessaire de distinguer deux types d'eau.

2.1.1. Eau liée

Elle est attachée à la surface des grains par le jeu de forces d'attraction moléculaire. Ces forces décroissent avec la distance de la molécule d'eau au grain.

– Une première couche adsorbée, dont l'épaisseur est de l'ordre de quelques dizaines de molécules (environ 50 Å), correspond à :

- l'eau des arrêtes et des cassures de la surface du réseau cristallin. Les molécules d'eau y sont retenues par des liaisons de coordination avec les éléments superficiels du réseau cristallin ;
- l'eau d'hydratation des cations échangeables ;
- l'eau de surface interfeuille, répartie entre les différents feuillets des minéraux argileux, reliés entre eux par des liens hydrogènes existant entre les groupes OH⁻ et O²⁻.

Dans cette couche adsorbée les propriétés de l'eau sont très fortement modifiées. L'eau a la structure de la glace. La viscosité peut être quelques dizaines de fois supérieure à celle de l'eau normale (ROSENQVIST 1959). La densité varie de 1,2 à 2,4 g/cm³ (YONG et WARKENTIN 1975, SERGEEV 1971). L'adsorption des molécules d'eau et des ions dépend en grande partie de la surface spécifique des argiles.

– Une zone de transition d'eau dite "diffuse", entre 0,005 et 0,5 µm contient des molécules d'eau fixes et qui supportent encore une attraction non négligeable.

L'eau d'hydratation des argiles gonflantes (type smectites) correspond à de l'eau adsorbée et de l'eau diffuse, ou de l'eau faiblement liée.

2.1.2. Eau libre

Au delà de 0,5 µm (de MARSILY 1981) l'eau n'est retenue dans l'argile que par les forces capillaires et est capable de se déplacer sous l'effet de la gravité ou d'un gradient hydraulique suffisant. C'est l'eau libre, appelée aussi eau interstitielle.

D'une façon générale, les forces mises en jeu sur l'eau par les particules d'argiles diminuent avec la distance (cf figure 1.7).

2.2. La double couche et la température

Cette zone d'influence électrique de particules argileuses sur les molécules d'eau est appelée double couche. L'épaisseur globale δ de la double couche est donnée (en première approximation) par l'équation suivante :

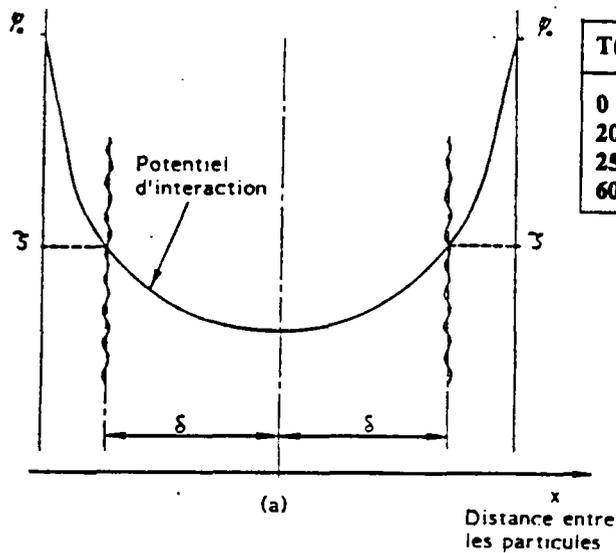
$$\delta = \sqrt{\frac{D k T}{8 \pi \eta_0 e^2 v^2}}$$

- T : température en °K
k : constante de Boltzmann = 1,38.10⁻²³ J/K
D : constante diélectrique de la solution en K⁻¹
e : charge de l'électron = 1,6.10⁻¹⁹ Cb
v : valence de l'ion
η₀ : concentration en ion dans la couche en mole/m³

L'épaisseur dépend uniquement des caractéristiques du liquide. Pour deux particules d'argile dont les surfaces sont parallèles et si les deux couches se superposent, il y a un phénomène de répulsion. La figure 1.8 montre la distribution du potentiel dans une telle configuration. Dans les sols argileux, ce phénomène représente l'essentiel des forces répulsives.

L'effet de la température sur la double couche varie suivant les auteurs.

– MITCHELL (1976) calcule qu'une augmentation de température entraîne une augmentation de δ et une diminution de la surface de potentiel pour une même charge surfacique des particules, tous les autres facteurs étant constants par ailleurs. Il faut cependant noter qu'une augmentation de température entraîne une diminution de D. Le tableau 1.1 tiré



T(°C)	T(°K)	Dielectric Constant (D)	DT
0	273	88	2.40×10^4
20	293	80	2.34×10^4
25	198	78.5	2.34×10^4
60	333	66	2.20×10^4

Tableau 1.1 Valeurs de la constante diélectrique à différentes températures
(J.K. Mitchell, 1976)

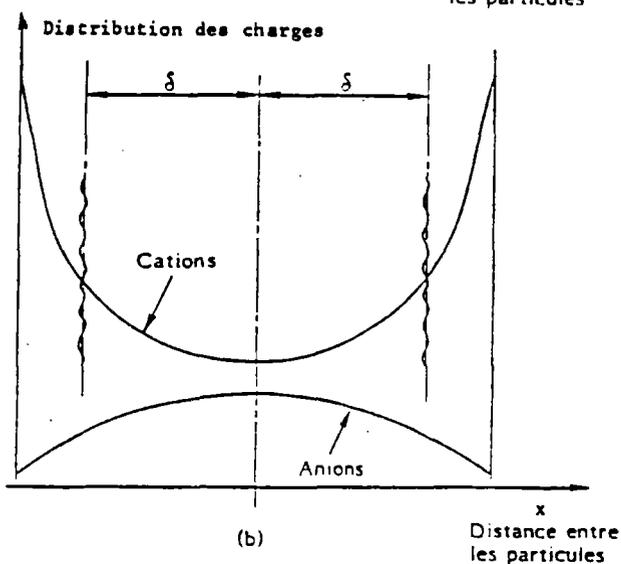


Figure 1.8 Distribution du potentiel entre deux particules plates parallèles
(Ch. Huret, 1985)

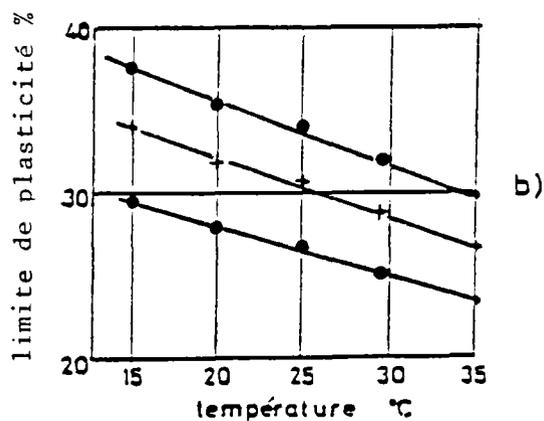
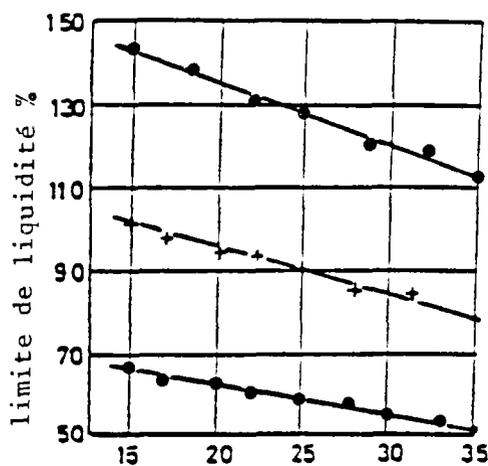


Figure 1.9 Evolution des limites d'Atterberg avec la température
(Helmi El Ramli et al, 1969 dans Fleureau, 1979)

de MITCHELL (1976), donne les valeurs de D entre 0 et 60°C. La faible variation de DT ne doit pas beaucoup influencer la valeur de δ , si l'on suppose que D n'est pas affecté par les forces de surface des particules et par la concentration ionique de la solution interstitielle.

— FLEUREAU (1979) a trouvé que les variations de D avec la température s'écartent peu d'une représentation linéaire d'équation :

$$D = 88 - 0,367 t$$

t : température en degré celsius

Il retrouve ainsi les mêmes valeurs de DT que MITCHELL plus une valeur supplémentaire à 98°C de $1,96 \cdot 10^4$. Cette dernière valeur marque bien une tendance à la diminution du paramètre DT et donc à une diminution de l'épaisseur δ pour un échauffement élevé.

Il calcule aussi la variation relative de volume correspondante pour différentes températures par rapport à une température de référence 20°C. Il suppose surtout dans son calcul qu'aucune modification ne se produit dans l'arrangement des particules d'argile.

Dans le cas d'une montmorillonite - Na dans une saumure, de concentration $\eta_0 = 8 \cdot 10^{-4}$ mole/l (la longueur d'une couche élémentaire δ_0 est de 300 Å et l'épaisseur ε_f est de 10 Å) il obtient pour un échantillon, h_0 initialement à 20°C, les valeurs suivantes :

T °C	$\Delta h/h_0$ (20°C)	
5	+ 0,01	gonflement
50	- 0,02	tassement
95	- 0,08	tassement

Dans le cas d'une kaolinite-Na ($\delta_0 = 400$ Å, $\varepsilon_f = 1000$ Å) plongée dans le même électrolyte, les résultats sont deux fois plus faibles.

Pour une illite-Na les résultats sont intermédiaires entre la kaolinite-Na et la montmorillonite-Na.

— HURET (1985) obtient en théorie un tassement lors d'un échauffement pour un loess contenant 20% d'illite. Il tient compte de la variation de la constante diélectrique D , tous les autres facteurs étant constants par ailleurs.

T °C	$\Delta V/V_0$ (20°C)	
20	- 0,003	tassement
40	- 0,007	tassement
60	- 0,011	tassement

— PLUM et ESRIG (1969) observent une diminution du volume suite à un chauffage. Ils pensent que celui-ci entraîne une expansion de la double couche, augmentant ainsi les forces de répulsion, ce qui diminue la contrainte effective et la résistance des liens entre particules, conduisant à une diminution de volume. Ils citent KENNEY qui a constaté un résultat analogue, c'est à dire une augmentation de la double couche et une diminution de volume.

Ainsi, suivant les auteurs un chauffage entraîne une diminution ou une augmentation de la double couche, mais ils expliquent dans chacun des cas la diminution de volume observée. De ces observations, il n'apparaît pas de relation directe entre la variation de la double couche et le tassement observé. Il semblerait que ce soit la modification de la structure interparticulaire et son réarrangement qui explique ce phénomène, soit par un resserrement de la texture dû à la diminution de la double couche, soit par un réarrangement textural sous l'effet de forces extérieures constantes sur une texture affaiblie par une expansion de la double couche.

3. CARACTERISTIQUES PHYSIQUES

3.1. Porosité

C'est le rapport entre le volume des vides et le volume total, à ne pas confondre avec l'indice des vides qui correspond au rapport du volume des vides sur le volume de la fraction solide. Ces valeurs sont reliées par la relation :

$$e = \frac{n}{1 - n} \quad \text{ou} \quad n = \frac{e}{1 + e}$$

Le volume des vides sera pour un échantillon saturé égal au volume d'eau.

Dans le cas des sols, qui nous concerne, nous préférons utiliser le paramètre "e" car le volume de la phase solide est constant, ce qui n'est pas le cas du volume total de l'échantillon.

3.2. Teneur en eau et saturation

On définit la teneur en eau "w" et le degré de saturation volumique "S_r" d'un échantillon par les rapports suivants :

$$w = \frac{\text{Poids de l'eau contenue}}{\text{Poids du sol sec}} \quad S_r = \frac{\text{Volume eau contenue}}{\text{Volume total des vides}}$$

Bien que considérée comme imperméable l'argile a une teneur en eau qui peut varier dans de larges proportions. Si les argiles sont prélevées sous le niveau supérieur de la nappe ou à proximité, elles sont considérées comme saturées.

Les sols naturels sont rarement saturés à 100%, mais des essais effectués sur une éprouvette de 2cm d'épaisseur pour deux degrés de saturation de 0,9 et une charge de 100 kPa, ont montré que ce paramètre avait une influence très réduite, pour un essai oedométrique (MAGNAN et al. 1979), ce qui justifie l'hypothèse couramment admise de la saturation des sols.

La teneur en eau joue un rôle primordial dans le comportement des argiles. Elle est à l'origine du comportement plastique de ce sol, en liaison avec la surface spécifique, qui est la surface des feuilletts accessibles à l'eau.

3.3. Limites d'Atterberg

Les argiles en présence d'eau forment des pâtes dans lesquelles chaque particule est reliée aux particules voisines par des forces de cohésion dues à la présence des couches adsorbées. La consistance qui en résulte dépend en grande partie de la teneur en eau. On distingue trois états : liquide, plastique et solide. La transition d'un état à l'autre est progressive. Néanmoins on utilise généralement les limites définies en 1911 par ATTERBERG et précisées ensuite par CASAGRANDE.

CTORI (1989) a montré que les limites de liquidité, de plasticité et l'indice de plasticité diminuent quand la température augmente de 6° à 35°C. HELMI EL RAMLI (1961) ont effectué des essais analogues sur trois argiles : molle, moyenne et raide. Ils arrivent aux mêmes conclusions entre 15° et 35°C. DESPAX (1976) (cf figure 1.9) explique cela par le fait que le sol est alors moins résistant en raison de la réduction des liaisons entre particules. YOSSED et al présentent des résultats similaires, qu'ils expliquent en se référant à la viscosité de l'eau qui diminue quand la température augmente. Ces deux phénomènes doivent se conjuguer.

Les particules constituant la fraction argileuse ont un diamètre le plus souvent inférieur à 2 µm. Etant donné la faible dimension de ces particules et leur grande surface spécifique,

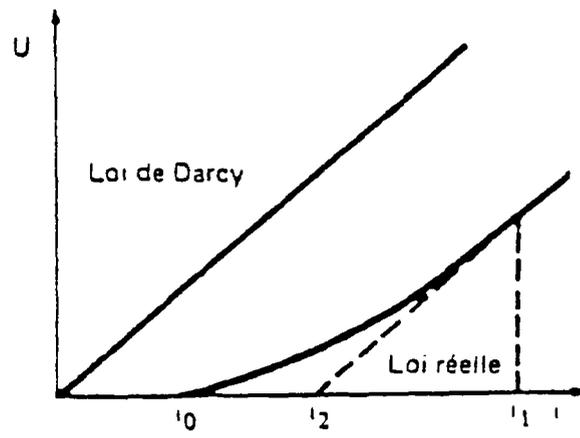


Figure 1.10 Loi des variations de la vitesse de filtration aux faibles gradients
(G. de Marsily, 1981)

les lois de la mécanique classique ne peuvent s'appliquer à leur comportement ; il faut donc prendre en compte les phénomènes de surface qui deviennent prépondérants.

3.4. Dilatation des composants du sol

Lors d'une variation de température, trois phénomènes de dilatation sont à distinguer :

(1) dilatation de l'eau interstitielle :

$$dV_w = \alpha_w V_w dT \quad [1]$$

α_w : coefficient de dilatation thermique = $3 \cdot 10^{-4} (\text{°C})^{-1}$
 V_w : volume de l'eau

(2) dilatation des grains du sol :

$$dV_s = \alpha_s V_s dT \quad [2]$$

α_s : coefficient de dilatation moyen des grains
 V_s : volume de la fraction solide des grains

Les valeurs de α_s varient relativement peu d'un minéral à l'autre; on peut considérer que l'ordre de grandeur est le même pour tous les minéraux avec une valeur moyenne de $5 \cdot 10^{-5} (\text{°C})^{-1}$ selon DUNCAN et CAMPANELLA (1965, cité par FLEUREAU 1979).

(3) dilatation du squelette granulaire :

Le changement de température pour une argile peut entraîner un changement des forces interparticulaires, de cohésion et/ou de résistance, qui implique des réorientations ou des mouvements relatifs des particules, permettant ainsi à la structure du sol d'atteindre un nouvel équilibre pour la même contrainte effective. La variation de volume due à cet effet est (dV_{sq}).

$$dV_{sq} = \beta(T) dT dV_{tot} \quad [3]$$

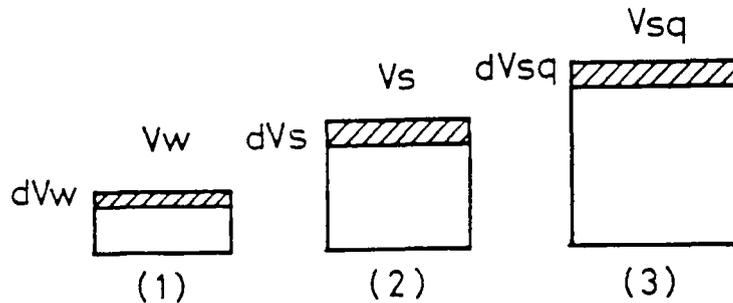


Schéma de dilatation des composants du sol :

(1) eau (2) solide (3) squelette solide

Le volume d'eau drainée est égale à :

$$dV_{dr} = dV_{sq} - dV_s - dV_w \quad [4]$$

la variation de volume étant comptée positivement dans le sens d'une augmentation.

Les termes prépondérants dans la variation de l'indice des vides lors d'un échauffement sont ceux de la double couche et du changement de structure, regroupés sous le terme " dV_{sq} ". Il existe d'ailleurs une relation entre ces deux phénomènes comme l'ont montré CITTANOVA (1970) et MITCHELL (1976): le réarrangement des particules d'argile

résulte d'une rupture d'équilibre entre les forces d'attraction de Van Der Waals, les forces de répulsion électrique des couches diffuses et les forces extérieures.

FLEUREAU (1979) a montré que la variation de l'indice des vides due à la double couche variait du simple au double suivant la minéralogie de l'argile considérée, quand on passe d'une argile de type kaolinitique à une montmorillonite. Ceci ne suffit pas à expliquer le tassement beaucoup plus élevé observé pour la bentonite, tassement qu'il faudrait attribuer selon lui à un changement de structure du matériau lors du chauffage. Cette conclusion recoupe celle de CAMPANELLA et MITCHELL (1977) qui notaient un décalage d'autant plus important que l'argile est compressible.

3.5. Perméabilité

Une argile est un milieu poreux dit "imperméable". Son coefficient de perméabilité K varie de 10^{-9} à 10^{-13} m/s, et peut être plus faible parfois.

Soit Q le débit d'eau s'écoulant à travers une éprouvette d'argile de section S . En divisant ce débit par S , on obtient la vitesse fictive de l'eau à la sortie du massif, comme si toute la section de l'échantillon était soumise à l'écoulement. Cette vitesse, notée U , est appelée vitesse de filtration :

$$U = Q/S$$

la loi de Darcy s'écrit :

$$\text{avec } \frac{\vec{U}}{I} = \kappa \frac{I}{\text{grad } h} \quad (\text{gradient hydraulique}) \quad [5]$$

h est la charge hydraulique et a pour expression :

$$h = \frac{P}{\gamma_w} + z \quad (\text{le terme } v^2/2g \text{ étant négligé})$$

- z : cote du point considéré par rapport à un plan horizontal de référence
- $\frac{dh}{L}$: perte de charge de l'eau entre les deux faces de l'échantillon
- γ_w : poids volumique de l'eau
- L : épaisseur de l'échantillon

On constate expérimentalement et en se basant sur les équations aux dimensions (de MARSILY 1981) que K varie en fonction inverse de la viscosité dynamique du fluide μ . Ce qui nous amène à définir la perméabilité intrinsèque d'un matériau (en m^2) qui ne dépend a priori que de la morphologie du squelette solide et pas des caractéristiques du fluide à la température considérée.

La loi de Darcy s'exprime par :

$$U = - \frac{k}{\mu} (\text{grad } P + \rho_w \ g \ \text{grad } z)$$

$$U = - \frac{k \ \rho_w \ g}{\mu} \text{grad } h \quad [6]$$

En comparant [5] et [6], on obtient :

$$\kappa = \frac{k \ \rho_w \ g}{\mu} \quad [7]$$

Nous ferons, lors de notre étude, des mesures expérimentales de la perméabilité K_T à différentes températures et nous en déduisons la perméabilité intrinsèque k par cette relation

[7]. Nous calculerons ensuite une perméabilité, notée $K_{T,20}$, qui est la perméabilité K_T ramenée à 20°C et obtenue par l'équation :

$$K_{T,20} = K_T \frac{\mu_T \rho_{w,20}}{\rho_{w,T} \mu_{20}} \quad [8]$$

Ce terme ne dépend pas des caractéristiques de l'eau à la température de la mesure, et tous les $K_{T,20}$ seront directement comparables entre eux pour estimer une éventuelle modification de la texture de l'échantillon.

Les variations de la masse volumique et de la viscosité de l'eau en fonction de la température sont données sur le tableau 1.1.

température en °C	en 10^3 kg.m ⁻³	en 10^{-3} Pa.s
0	0,9999	1,7921
5	0,9999	1,5188
10	0,9997	1,3077
15	0,9991	1,1404
20	0,9982	1,0050
25	0,9971	0,8937
30	0,9957	0,8007
40	0,9922	0,6560
50	0,9881	0,5494
60	0,9832	0,4688
70	0,9778	0,4061
80	0,9718	0,3565
90	0,9653	0,3165
100	0,9585	0,2838
*110	0,9509	0,2552

Valeurs à la pression atmosphérique
* extrapolées pour 110°C

Tableau 1.1 : Tableau des valeurs de la masse volumique et de la viscosité à différentes températures comprises entre 0 et 110°C.

La viscosité à une température T peut être calculée à partir de la relation suivante entre 20 et 100°C (Handbook of physical constants) :

$$\lg \frac{\eta_T}{\eta_{20}} = \frac{1,3272 (20 - T) - 0,001053 (T - 20)^2}{T + 105} \quad [9]$$

Nous constatons qu'elle varie beaucoup avec la température, puisqu'elle est divisée par un facteur 5 entre 20 et 110°C.

La viscosité varie très peu avec la pression quand celle-ci reste faible: la viscosité de l'eau à 100°C passe de 0,283 à environ 0,287 quand la pression passe de 0 MPa à 10 MPa (cf "Handbook of physical constants"). Donc entre 0 MPa et 0,3 MPa la différence est beaucoup plus faible, et en première approximation négligeable. A 110°C nous avons repris la relation [9] valable à la pression atmosphérique (ici 0 MPa en relatif), qui donne une valeur très proche de celle à 0,3 MPa.

La masse volumique peut être calculée par un développement polynomial complexe en fonction de la température. On observe une diminution faible de 5% entre 20 et 110°C.

Pour les faibles gradients hydrauliques, ou les faibles débits, il existe une distorsion par rapport à la loi de DARCY. Dans le cas d'argiles compactes, JACQUIN, cité par de MARSILY (1981), présente la loi de variation la plus générale aux faibles valeurs du gradient (cf figure 1.10).

Les valeurs des gradients i_0 , i_1 , i_2 varient pour différents types d'argile, i_2 pouvant atteindre plusieurs dizaines pour une montmorillonite. Il faudra donc faire attention à l'interprétation quand les débits sont très faibles. Il y a un risque de sous-estimation.

Dans sa thèse FLEUREAU (1979) dit qu'une augmentation de la température accroît la tendance à la "floculation", ce qui correspond suivant CITTANOVA (1970) à une perméabilité plus grande des matériaux argileux.

4. CONCLUSION

– La composition minéralogique des argiles a peu de chance d'être modifiée de façon notable entre 20 et 110°C, excepté dans le cas des smectites qui pourraient se transformer progressivement en interstratifiés illite-smectite dès 40°C.

– Les argiles contiennent de l'eau sous deux états :

- libre
- lié : cette eau liée est constituée d'eau adsorbée et diffuse d'où le nom donné de "double couche".

L'épaisseur de la double couche qui entoure les particules de sol varie avec la température, mais cette variation n'a pas été déterminée avec exactitude.

– Lorsqu'on chauffe un échantillon d'argile, celui-ci subit des modifications et ses caractéristiques physiques comme la porosité ou l'indice des vides, la teneur en eau, les limites d'Atterberg et la perméabilité évoluent. Nous analyserons l'évolution de ces paramètres avec la température plus en détail au paragraphe 4 du chapitre 2 intitulé "consolidation sous sollicitations thermiques variables".

Chapitre 2

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE DE LA DEFORMATION UNIDIMENSIONNELLE DES SOLS ARGILEUX



Ce mémoire a pour but l'étude de la variation de volume des argiles sous différentes sollicitations thermiques. Pour cela nous avons retenu l'essai oedométrique qui permet l'application d'une charge sur une éprouvette de sol cylindrique sertie par une bague empêchant toute déformation radiale.

Les principales caractéristiques du déroulement de l'essai sont les suivantes :

- la première charge appliquée correspond à la pression nécessaire pour empêcher le gonflement au moment de la saturation. Elle garantit de plus un bon contact entre l'éprouvette et le piston.
- à partir de la deuxième charge le taux d'accroissement de la charge $i (= d\sigma_i/\sigma_i)$ est égal à 0,5 jusqu'à la plage probable de surconsolidation. Puis, le taux d'accroissement de la charge peut être de 1.
- la durée des paliers de chargement est de 24 heures.

La pression de préconsolidation σ'_c est définie sur la figure 2.1. Elle est comprise entre deux valeurs extrêmes, $\sigma'_{c\min}$ et $\sigma'_{c\max}$, et correspond à la plus grande pression effective à laquelle a été soumis l'échantillon de sol au cours de son histoire. Si σ'_c correspond à la pression effective σ'_0 supportée par le sol en place, le sol est normalement consolidé. Un sol est surconsolidé si σ'_c est supérieur à σ'_0 . $\sigma'_{c\max}$ est la pression pour laquelle le comportement du sol devient linéaire dans un repère $(e-\lg\sigma')$ (cf figure 2.1).

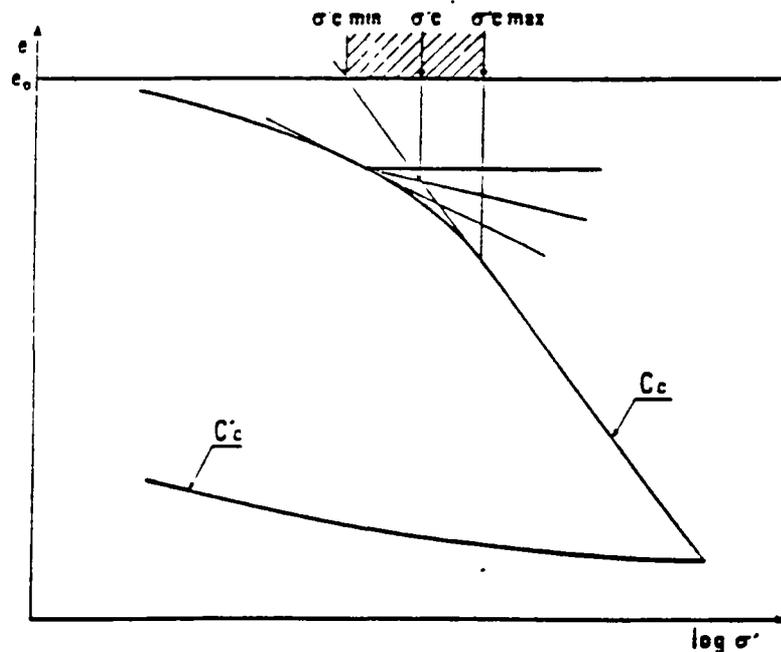


Figure 2.1 : Courbe de compressibilité et construction de σ'_c .

La pente de la partie linéaire soit $(d\lg\sigma'/de)_{\sigma' > \sigma'_{c\max}}$ est appelée indice de compressibilité et notée C_c .

Les conditions aux limites de cet essai sont les suivantes :

- la déformation latérale ε_h est nulle puisque l'échantillon est placé dans une bague métallique ;
- la déformation verticale ε_v est mesurée par un capteur et peut être enregistrée sur un ordinateur; elle indique la variation de hauteur de l'échantillon et permet de calculer ses variations de volume.
- la pression interstitielle "u" est maintenue à une valeur constante aux deux faces, supérieure et inférieure, de l'éprouvette.
 - $u = 0$pour un oedomètre classique
 - $u = \text{constante}$pour un oedomètre à contre pression

Vincent REBOUR a consacré son stage de DEA à l'étude du fluage de matériaux argileux étudiés à température ambiante. Une partie de l'analyse bibliographique a donc été menée en collaboration avec lui et a fait l'objet de son manuscrit de DEA dont certains passages ont été repris aux chapitres 2 et 3.

1. PRESENTATION DES DIFFERENTES CELLULES OEDOMETRIQUES

Historiquement l'appareil a été développé pour la réalisation d'essais de chargement par paliers. Par la suite des variantes ont été imaginées pour permettre l'exécution d'autres types d'essais :

- essai à vitesse de déformation contrôlée
- essai à gradient contrôlé
- essai accéléré par chauffage

Les oedomètres d'usage courant peuvent être classés en quatre catégories selon leur mode de chargement: par poids, pneumatique, hydraulique ou par presse.

- Dans la catégorie des oedomètres à poids : la cellule de TERZAGHI est couramment utilisée. Pour ces oedomètres, le bâti qui comprend essentiellement un levier pour la transmission des charges, doit être stable et rigide, et permettre l'application d'une force constante dans l'axe du piston.

- L'oedomètre à mise en charge pneumatique du Centre d'Etudes et de Construction de Prototypes (CECP) d'Angers est représenté sur la figure 2.2. L'ensemble de mise en charge doit comprendre une alimentation en gaz comprimé suffisamment stable, un détendeur régulateur à fuite et un filtre assurant la propreté du gaz. L'oedomètre à contre pression des L.P.C. (cf figure 2.3) permet d'appliquer une contre pression à la face supérieure de l'échantillon et de mesurer la pression interstitielle à la face inférieure (cf figure 2.4 également).

- Le chargement pneumatique des cellules peut être remplacé par un chargement hydraulique, réalisé aux moyens de rampes à pots de mercure.

- Le chargement par presse permet d'imposer une certaine déformation en vitesse de déformation. La cellule oedométrique est placée sur le plateau d'une presse asservie.

Dans le cas qui nous intéresse nous désirons imposer une pression de façon très précise, ainsi qu'une contre pression. Nous retiendrons pour cela la cellule à chargement pneumatique.

L'analyse de ces différents dispositifs expérimentaux a permis la conception et la mise au point d'un prototype au Centre de Géologie de l'Ingénieur (cf chap.4) pour réaliser des essais de consolidation et de fluage avec contre-pression entre 20° et 110°C. Cette cellule sera présentée en détails au chapitre 4.

2. DESCRIPTION D'UN CHARGEMENT A TEMPERATURE AMBIANTE

Lorsqu'un sol est soumis à des charges, il se déforme. Comme ces charges sont le plus souvent verticales, ces déformations sont particulièrement marquées dans la direction même des forces appliquées, forces qui s'ajoutent à celle de la pesanteur: les déformations verticales du sol prennent alors le nom de tassement.

L'essai oedométrique ou unidimensionnel présente deux avantages pour l'étude de la déformation volumique du sol :

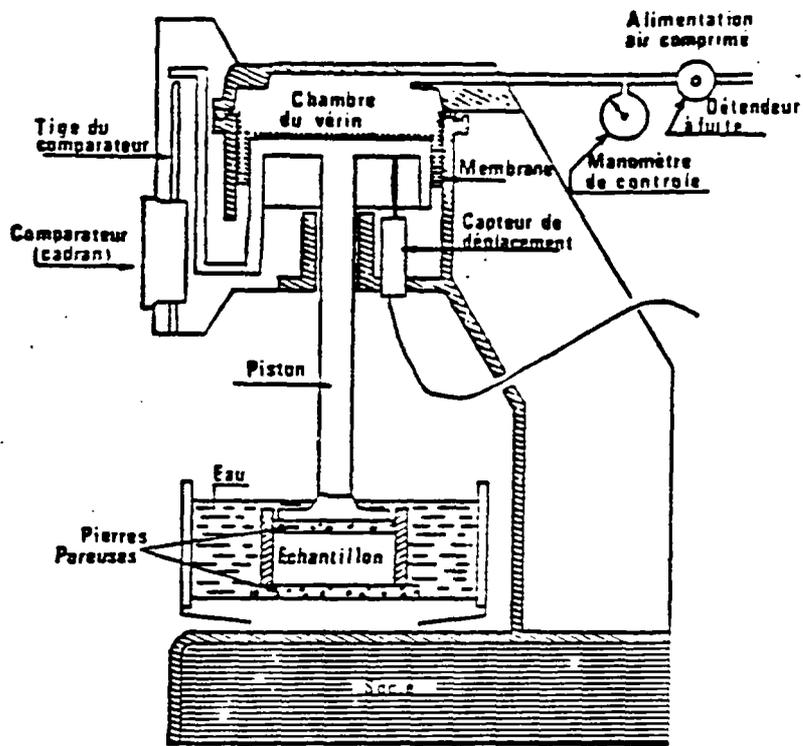


Figure 2.2 Schéma de l'oedomètre à chargement pneumatique du CECP d'Angers

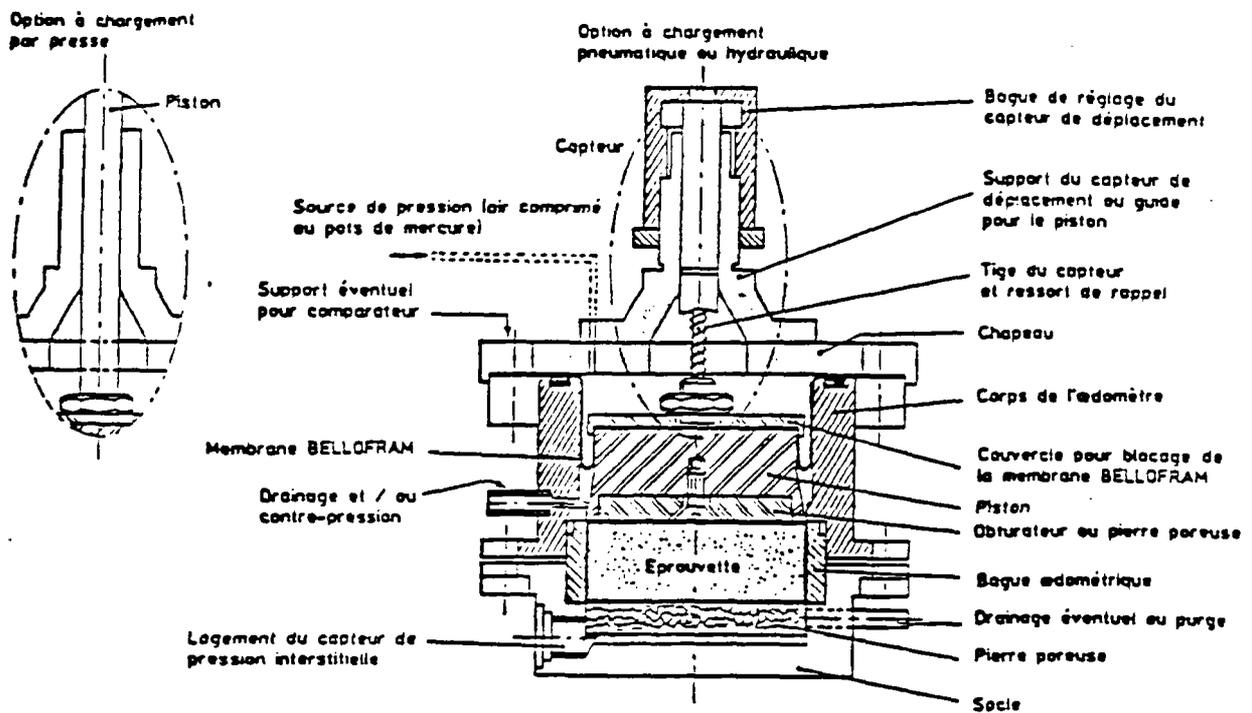


Figure 2.3 Schéma de l'oedomètre à contrepression du CECP d'Angers

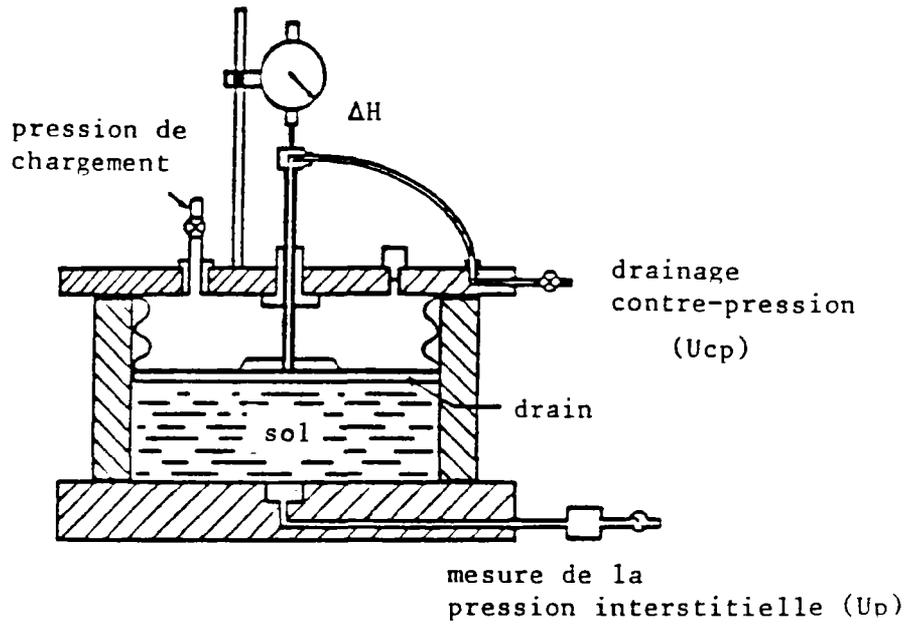


Figure 2.4 Cellule de Rowe : schéma de principe (Rowe, 1966)

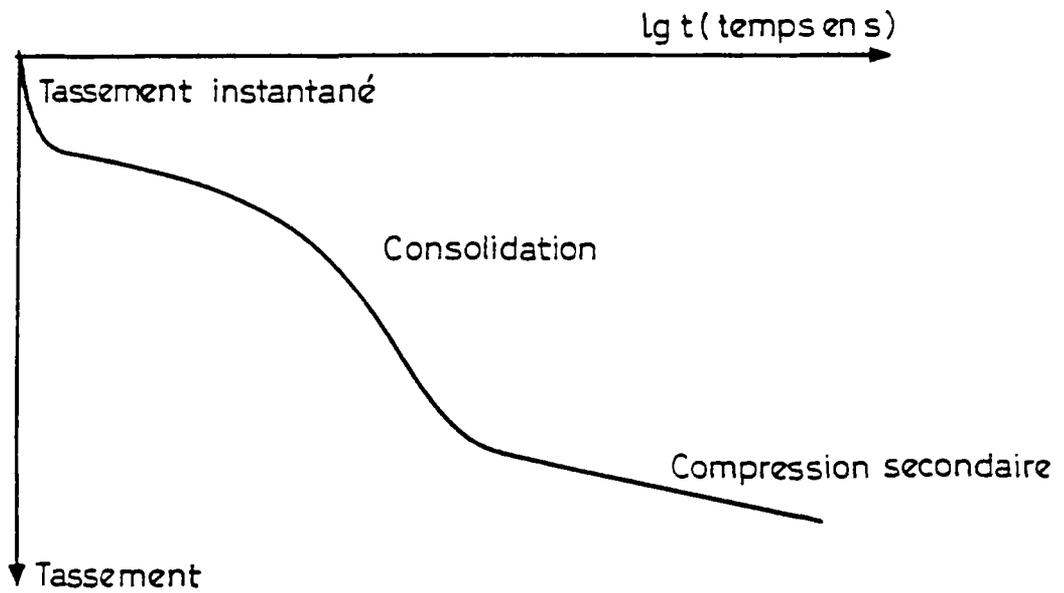


Figure 2.5 Courbe oedométrique

- l'état de contrainte subi par une éprouvette de sol est assimilable à celui auquel est soumis le matériau en place. En effet dans l'hypothèse d'une couche d'argile infinie, horizontale, soumise à la seule surcharge des terrains susjacentes, la déformation latérale est nulle et l'état des contraintes est défini par le poids des terres au repos. Dans l'essai oedométrique le frottement latéral de l'échantillon est assuré par le moule et l'état des contraintes est défini par l'application d'une charge sur la partie supérieure de l'éprouvette.
- l'essai permet la mesure directe de la variation de volume et permet de relier cette variation à une contrainte.

Par contre il ne permet pas un champ de contraintes isotropes du fait des conditions aux limites latérales (ε_h nul).

La déformation sous charge constante d'un échantillon d'argile se divise en trois phases successives (cf figure 2.5) :

- une phase de **tassement instantané**, tassement qui est complètement achevé au bout de quelques secondes ;
- une phase de **consolidation primaire** ;
- une phase de fluage appelée **consolidation secondaire**.

Nous présenterons chacune de ces phases en indiquant les paramètres physiques les caractérisant.

2.1. Tassement instantané

Il s'agit de la déformation qui se produit immédiatement après l'application d'une charge. On considère généralement que ce phénomène est achevé au bout de quelques secondes.

La consolidation se réduit à une compression non drainée. La pression du liquide interstitiel augmente tandis que son volume diminue, et elle reprend l'augmentation de contrainte totale.

Ce tassement est à attribuer à la compressibilité du mélange air-eau remplissant les vides du sol (FELIX 1981) et à la rigidité du bâti. Dans un premier temps l'écoulement du fluide interstitiel n'exerce aucune influence sur la déformation du sol.

La figure 2.6 représente en fonction du logarithme du temps la variation de la surpression interstitielle maximale rapportée à la charge appliquée, et ceci pour différentes charges. La valeur maximale est atteinte presque instantanément lorsque la charge appliquée est grande, et seulement au bout de quelques secondes pour une charge faible à cause de la viscosité plus grande du squelette sous de telles charges. Ceci montre aussi que la compressibilité apparente de la phase liquide entraîne un report incomplet de la charge appliquée sur la pression du fluide.

D'après des études expérimentales, on considère que la déformation instantanée obéit à la loi de HOOKE et qu'elle est linéaire et réversible en fonction de la charge appliquée. On définit donc un module d'élasticité :

$$E = \frac{d\sigma_v}{dh} \cdot H_0$$

$d\sigma_v$: incrément de pression appliqué
 dh : variation instantanée de hauteur de l'éprouvette
 H_0 : hauteur initiale de l'éprouvette

Ce coefficient est une fonction croissante de la surcharge appliquée (FELIX 1980).

2.2. Consolidation primaire

Sous l'action de la surcharge appliquée, le fluide interstitiel est mis en pression au cours de la phase du tassement instantané. Les conditions aux limites de l'éprouvette n'ayant

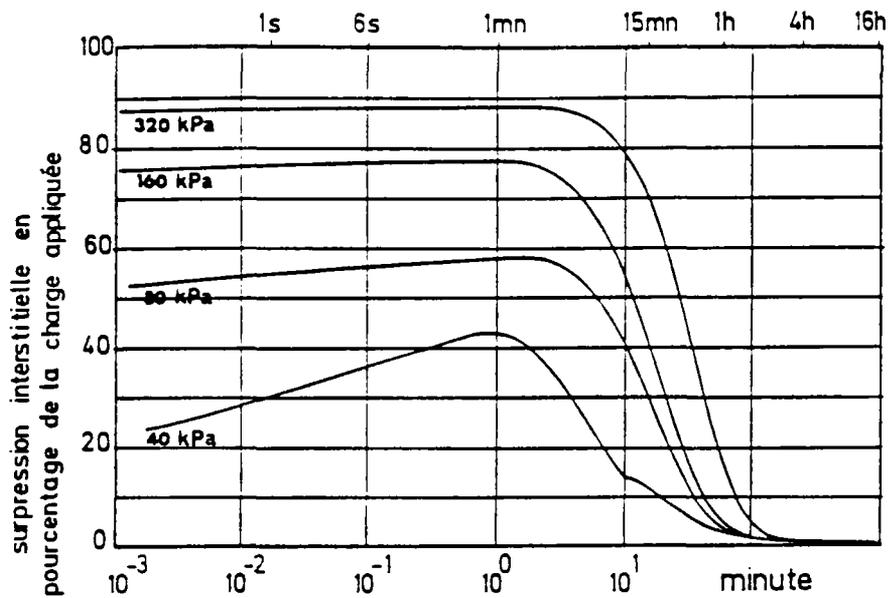


Figure 2.6 Représentation en fonction du temps des surpressions interstitielles rapportées à la charge appliquée (B. Félix, 1981)

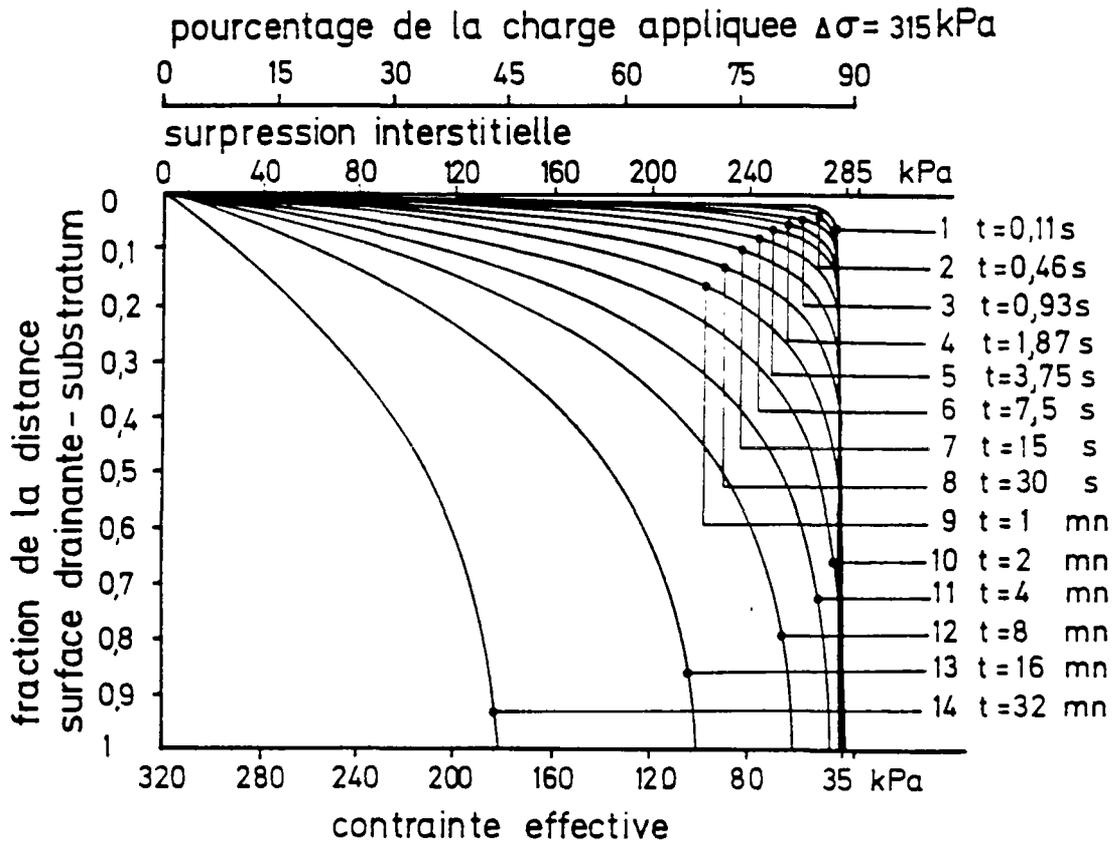


Figure 2.7 Isochrones caractéristiques de la consolidation de l'argile de Cubzac-les-Ponts sous une forte charge de 320 kPa (B. Félix, 1981)

pas changé, cette surpression crée un gradient hydraulique qui génère un écoulement du fluide vers les frontières drainantes. Cette phase est aussi appelée phase hydrodynamique : c'est la "filtration de l'eau interstitielle".

Il se produit simultanément un transfert des contraintes du fluide au squelette solide pendant le drainage de l'eau, et un réarrangement structural qui se traduit par un tassement.

Pendant la consolidation, les charges extérieures donc la contrainte totale restent constantes ; aussi on a :

$$\sigma = \sigma' + u = \text{constante} \quad \Rightarrow \quad d\sigma' + du = 0$$

Au début de la consolidation la surpression est entièrement reprise par le liquide interstitiel, et se transforme peu à peu en une augmentation de contrainte effective jusqu'à ce que la pression revienne à une répartition hydrostatique (absence d'écoulement). La figure 2.7 montre l'évolution (obtenue par le calcul) des isochrones des surpressions interstitielles et des contraintes effectives, lors d'un chargement. Le milieu d'un échantillon drainé par ses deux faces peut être assimilé au substratum imperméable.

La durée de cette phase est déterminée graphiquement grâce à la courbe $(dh - \lg(t))$ et dépend des caractéristiques physicomécaniques du sol, des conditions de chargement et de drainage, et des rapports qui existent entre ces facteurs internes et externes.

Sa durée est d'autant plus grande (FELIX 1980) que :

- la compressibilité du squelette est grande;
- la perméabilité du sol est faible. Lorsque la température augmente, la viscosité diminue rapidement et corrélativement la perméabilité des sols augmente; on a d'après SCHNEEBELI (1966) :

$$K_r = K_{r0} \frac{T + 20}{40}$$

- la viscosité du liquide interstitiel est grande;
- la résistance structurelle est grande. Cette résistance structurelle correspond à la pression critique de consolidation, c'est à dire la pression pour laquelle la compressibilité mesurée à l'oedomètre augmente brutalement.

La résolution de l'équation fondamentale de la consolidation conduit à une solution où le temps nécessaire pour atteindre un degré de consolidation déterminé (rapport du tassement enregistré au tassement final à l'équilibre) est proportionnel au carré de la longueur du chemin de drainage (FELIX 1980). Cette propriété a fourni à beaucoup d'expérimentateurs, la possibilité de vérifier dans quelles conditions et dans quelles limites "la filtration du liquide interstitiel" régissait seule la première phase de la consolidation.

YU ABELEV au MISI (cité par FELIX 1980) a comparé, sur deux argiles remaniées et sur deux silts intacts, la hauteur des échantillons à la racine carré du temps nécessaire pour atteindre un degré de consolidation quelconque. La linéarité entre H et \sqrt{t} est observée jusqu'à un degré de consolidation égale à 0,75-0,85. On peut conclure sur cet exemple que la filtration régit l'essentiel de la consolidation pendant une longue période qui correspond à une fraction importante du tassement final. FELIX montre à partir des résultats d'essais sur des éprouvettes de hauteurs différentes qui présentent la même pente de fluage que ce dernier n'est pas dû à l'écoulement différé du liquide interstitiel mais aux caractéristiques visqueuses du squelette.

Le coefficient de consolidation c_v est un facteur qui apparaît dans la théorie de la consolidation et qui permet de relier le temps de tassement à l'épaisseur de la couche de sol étudié. Il est défini par :

$$c_v = \frac{T_v \cdot L^2}{t}$$

- T_v : facteur temps, fonction du degré de consolidation U
 L : longueur du chemin de drainage: $h/2$ si drainage sur les deux faces (h étant l'épaisseur de l'échantillon)
 t : temps nécessaire pour obtenir un degré de consolidation U .

Deux méthodes graphiques sont couramment utilisées pour déterminer ce coefficient. La méthode de CASAGRANDE, fondée sur une représentation graphique (cf fig.2.8(b)) $dh = f(\lg(t))$ est la plus utilisée. La méthode de TAYLOR repose sur l'exploitation graphique (cf fig.2.8(a)) du diagramme $dh = f(\sqrt{t})$. Son interprétation s'appuie sur 60% de tassement de consolidation au lieu de 100% pour la méthode de CASAGRANDE et donne des valeurs de c_v sensiblement moins influencées par les effets de fluage (et par conséquent par les problèmes de similitude posés par l'essai oedométrique); mais sa mesure nécessite un alignement des points expérimentaux sur 60% du tassement, ce qui n'est pas toujours observable.

Le coefficient de consolidation obtenu pour une charge donnée par la méthode de CASAGRANDE est égal à :

$$c_v = \frac{0,197 \cdot L^2}{t_{50}}$$

- t_{50} : temps de demi-consolidation en secondes
 $T_v = 0,197$ pour 50% de consolidation

L'évaluation du temps t_{50} de demi-consolidation est tributaire de la détermination de t_0 , fin de la phase de tassement instantané. On utilise en pratique une approximation parabolique de la première partie de la courbe de consolidation. C'est pourquoi nous reporterons également les valeurs de t_{100} , temps en fin de consolidation primaire, qui mesure avec une plus grande exactitude la durée du phénomène d'élimination des surpressions interstitielles bien qu'il dépende aussi partiellement du fluage. Les valeurs semblent selon les auteurs (FLEUREAU 1979) moins dispersées que celles de t_{50} . De plus c'est un paramètre plus "parlant".

2.3. Consolidation secondaire et fluage

C'est la troisième phase de la déformation.

On observe l'existence d'une viscosité du squelette solide due aux couches d'eau adsorbées et notamment aux propriétés de la double couche. Ce mécanisme est le plus communément admis pour les argiles, et a permis le développement de l'étude cinétique des déformations (MITCHELL 1976). Quand on considère la nature des contacts interparticulaires dans un sol cohésif, les forces mises en jeu (cf chap.1) peuvent donner lieu à d'importantes contraintes. Dans de telles conditions, la représentation de dh en fonction de σ correspond plutôt à un comportement visqueux qu'élastique.

Le fluage est la déformation que subit le squelette intergranulaire dans le temps sous l'action combinée et antagoniste des charges extérieures et de la pression de l'eau libre interstitielle; les contraintes résultant de ces deux facteurs étant constantes dans le temps ou non. Le fluage est donc seul responsable de la consolidation secondaire, mais il débute dès le début de la consolidation pendant que les surcharges se reportent du fluide interstitiel sur le squelette solide. Pendant cette première phase il est souvent masqué par la dissipation des pressions interstitielles qui impose sa cinétique.

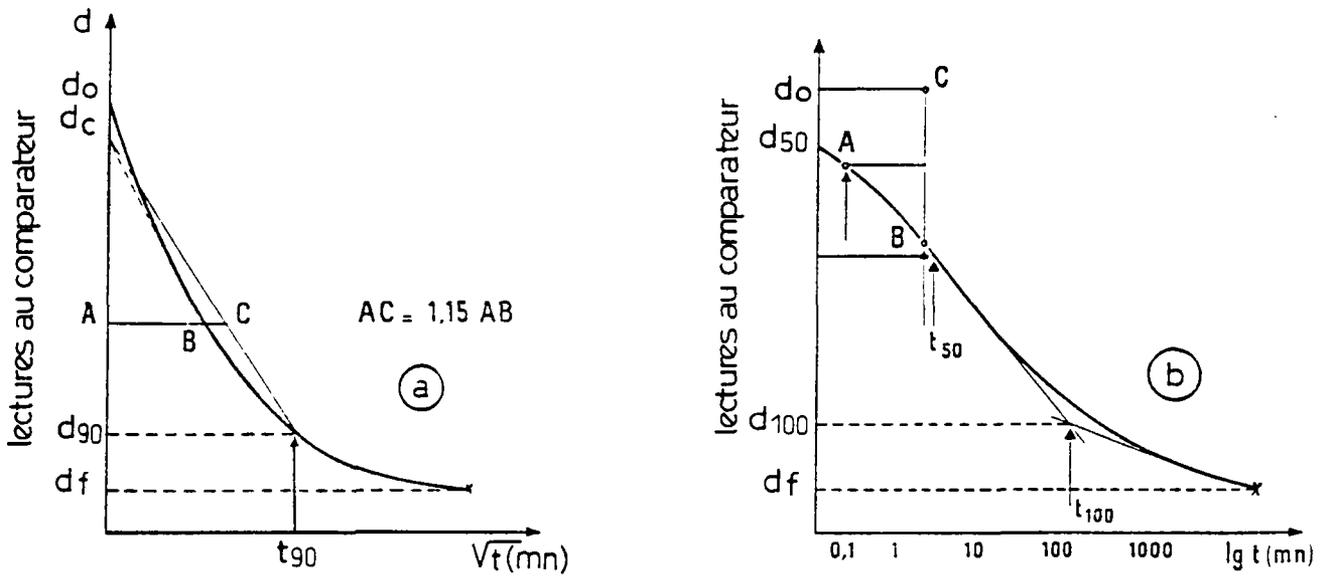


Figure 2.8 Méthodes de mesure du coefficient de consolidation C_v par la racine carrée (Taylor) (a), par le logarithme (Casagrande) (b)

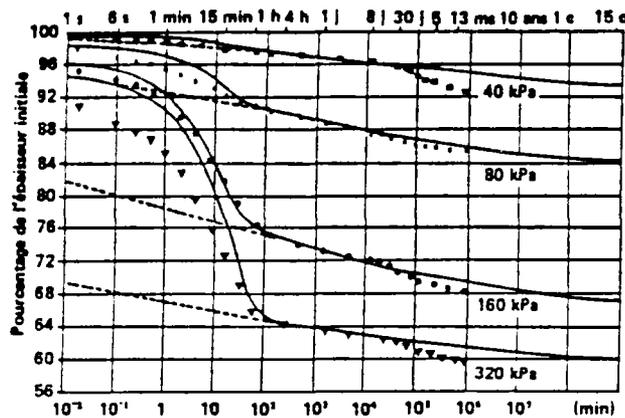


Figure 2.9 Déformations de consolidation calculées et mesurées pour différentes charges constantes (B. Félix, 1981)

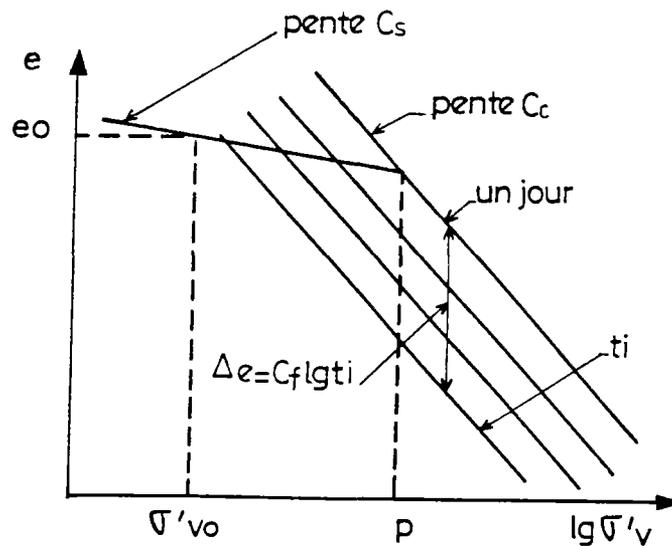


Figure 2.10 Courbe de compressibilité oedométrique

Un paramètre d'étude du fluage est le taux de compression secondaire, noté C_α . Il est défini dans l'hypothèse d'une évolution linéaire du tassement en fonction du logarithme du temps. Il est égal à la pente de cette droite soit :

$$C_\alpha = \frac{dh}{h_0} \cdot \frac{1}{d(\lg(\tau))}$$

L'indice de fluage $C_{\alpha e}$ est déterminé par :

$$C_{\alpha e} = C_\alpha (1 + e_0)$$

$C_{\alpha e}$ tient compte de la variation de e_0 d'un essai à l'autre pour les mêmes charges et permet ainsi une meilleure similitude.

Le tassement dû au fluage dépend des paramètres suivants :

- incrément de pression,
- degré de consolidation,
- teneur en eau,
- nature des argiles (minéralogie, plasticité...).

On constate, pour un sol déterminé, figure 2.9, que plus la charge appliquée est petite, plus l'écart entre la courbe de déformation moyenne et celle du fluage du squelette s'amenuise. A la limite, quand la charge appliquée tend vers zéro, la phase hydrodynamique tend à disparaître, et l'ensemble de la consolidation est régi par le fluage du squelette (voir $d\sigma = 40$ kPa). Les incréments de charge dont l'amplitude suit une progression géométrique sont susceptibles de rompre la résistance structurelle acquise sous l'effet de paliers antérieurs, provoquant ainsi des déformations plus importantes que des incréments de charge tous égaux qui après quelques paliers, s'avèrent incapables de provoquer une telle rupture.

Il retarde la dissipation des pressions interstitielles.

On remarque que le fluage a pour effet une surconsolidation de l'échantillon avec le temps. La figure 2.11 montre que si on laisse fluier longuement une argile normalement consolidée, elle devient surconsolidée. Ce phénomène se retrouve à plus petite échelle pour un essai oedométrique (cf figure 2.10) d'où l'importance du facteur temps (cf modélisation de LEROUEIL au paragraphe 2.4.1).

2.4. Modélisation du fluage unidimensionnel

La théorie classique de la consolidation suivant TERZAGHI (vers 1925) est une loi limite, dont le domaine de validité ne s'étend qu'à certaines argiles dont les liaisons intergranulaires sont faibles, et à un intervalle de temps restreint en effet; elle ne prend en compte qu'une déformation élastique du squelette.

Elle repose sur les hypothèses suivantes :

- la masse d'eau interstitielle est incompressible,
- la masse des grains du sol est invariante,
- le drainage et la consolidation sont unidimensionnels,
- la contrainte totale σ_{zz} est constante dans le temps et en tout point ($\sigma_{zz} = \gamma_z + \text{constante}$)
- la dérivée $de/d\sigma_{zz}'$ est une constante en tout point du sol, on pose $de/d\sigma_{zz}' = -a_v$,
- le coefficient de perméabilité k est une constante dans le temps et dans l'espace.

Ces hypothèses correspondent au cas d'une couche d'argile horizontale placée entre deux couches drainantes, et consolidée sous l'effet d'une pression uniforme P . Par ailleurs les déformations de la couche d'argile sont supposées petites d'où $d\sigma_{ij}/dt=0$, hypothèse déjà faite précédemment.

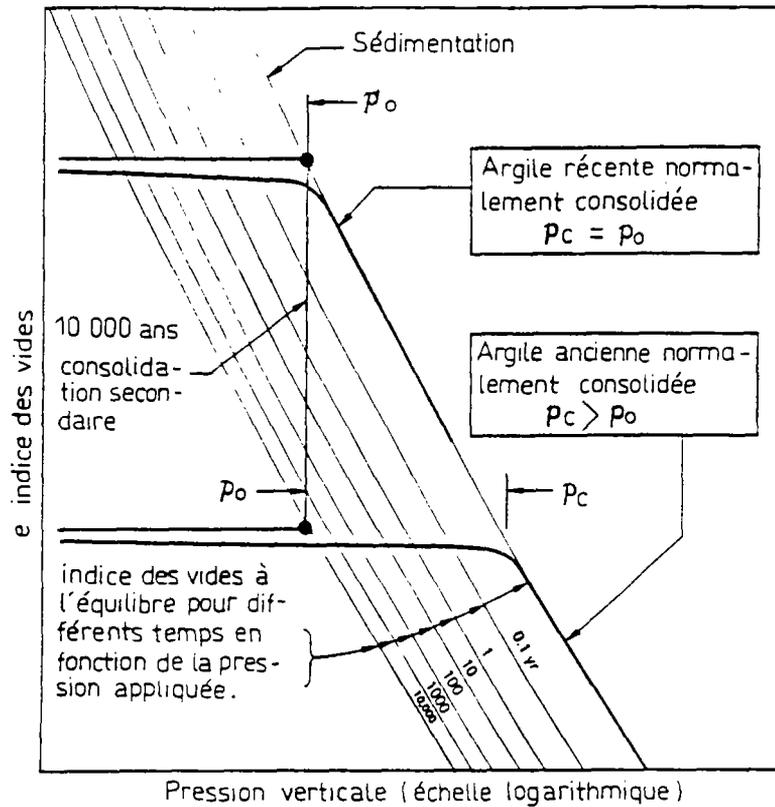


Figure 2.11 Histoire géologique et compressibilité d'une argile normalement consolidée (Mitchell, 1976, d'après Bjerrum, 1972)

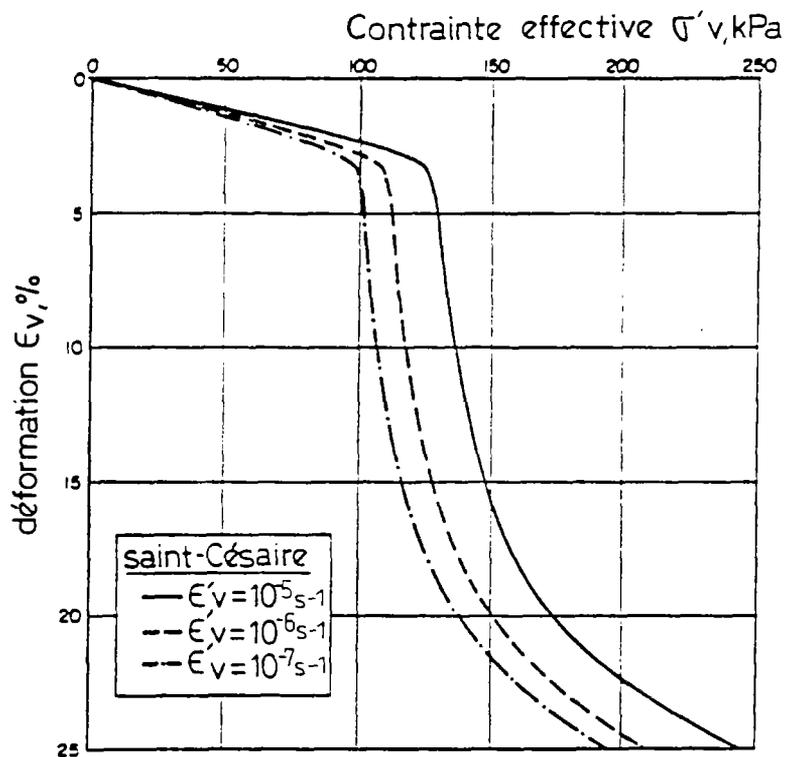


Figure 2.12 Courbes typiques de la relation contrainte-déformation-vitesse de déformation pour une argile (Leroueil, 1987)

L'équation simplifiée de la consolidation s'écrit alors :

$$c_v \cdot \frac{d^2 u}{dz^2} = \frac{du}{dt}$$

où c_v est appelé le coefficient de consolidation; qui est d'après les hypothèses faites constant.

Depuis, beaucoup d'efforts ont été consacrés à la formulation ou à la résolution des équations du comportement unidimensionnel des sols fins au cours du temps, visant à une meilleure prise en compte des lois de déformation des sols réels et des variations de leurs propriétés en cours de consolidation. Ces travaux ont généralement produit des modèles mathématiques inutilisables du fait de leur complexité, ou des programmes de calcul numériques peu diffusés.

2.4.1. Importance du temps

Dans la théorie de la consolidation de TERZAGHI, la réponse en déformation due aux contraintes effectives est unique, linéaire et indépendante du temps. Cependant en 1936 BUISMAN a reconnu que le temps pouvait être important depuis qu'une diminution de l'indice des vides sous pression effective constante ait été observée. Ceci a amené KOPPEJAN (1948) et BJERRUM (1967) à des approches à partir des équations rhéologiques du type :

$$R(\sigma'_v, e, t) = 0 \quad \text{ou} \quad R'(\sigma'_v, \varepsilon_v, t) \quad [10]$$

Le problème pour ces modèles est de définir une origine du temps. Ceci est particulièrement vrai quand le chargement varie au cours du temps (essai oedométrique par paliers de pression). Les modèles de BJERRUM montrent à la suite de multiples essais que plus le temps de chargement est court, plus la contrainte de préconsolidation est faible, ce qui a été observé par CRAWFOR (1964) et TAVENAS (1977) (cités par FELIX). La vitesse de déformation est donc un facteur important qui est pris en compte par les deux familles d'équations rhéologiques suivantes :

$$R(\sigma'_v, e, \dot{e}) = 0 \quad \text{ou} \quad R'(\sigma'_v, \varepsilon_v, \dot{\varepsilon}_v) \quad [11]$$

$$R(\sigma'_v, e, \dot{\sigma}'_v, \dot{e}) = 0 \quad \text{ou} \quad R'(\sigma'_v, \varepsilon_v, \dot{\sigma}'_v, \dot{\varepsilon}_v) \quad [12]$$

La relation [11] signifie qu'à une déformation ε_v donnée, il correspond une relation unique entre σ'_v et $\dot{\varepsilon}_v$. Ce comportement est décrit par les courbes, obtenues par LEROUEIL (1987), figure 2.12. La relation [12] indique aussi qu'à une contrainte donnée σ'_v il correspond une relation unique entre ε_v et $\dot{\varepsilon}_v$.

2.4.2. Théorie du fluage (lois semi-empiriques)

Elles sont fondées sur la constatation empirique de BUISMAN (1936) qui a remarqué que "le tassement relatif d'une couche de sol dû à la compression secondaire varie linéairement en fonction du logarithme du temps et ceci indépendamment de l'épaisseur de l'échantillon".

Compte tenu de la loi logarithmique établie entre contrainte et déformation par TERZAGHI, KOPPEJAN (1948) a proposé la loi de tassement globale suivante :

$$\varepsilon = 2,3 \left[\frac{1}{C_p} + \frac{1}{C_s} \lg(t) \right] \lg \frac{\sigma'_0 + d\sigma'}{\sigma'_0}$$

σ'_0 : contrainte effective initiale
 $d\sigma'$: incrément de pression
 C_p, C_s : coefficients caractérisant le sol

Dans la pratique (MIEUSSENS et al. 1985) on néglige l'influence du taux d'accroissement de la charge sur la compression secondaire. La fonction du tassement pour cette phase prend la forme :

$$dh = C_{\alpha} \lg(t)$$

C_{α} : taux de consolidation secondaire

Il convient de remarquer que théoriquement les lois du tassement en logarithme du temps ne sont qu'une approximation. Le phénomène de fluage est amorti donc la linéarité doit être abandonnée au profit d'une loi asymptotique lorsque t est grand. D'autre part certaines études expérimentales (FELIX 1980(b)) conduites pendant plusieurs années montrent des irrégularités par rapport à cette loi.

2.4.3. Théories fondées sur les corps idéaux

Ces théories tentent de simuler le comportement visqueux du squelette solide des argiles par analogie avec des modèles rhéologiques ou corps idéaux.

Ces modèles sont formés par l'assemblage en série et/ou en parallèle des trois éléments suivants :

- un ressort de module E
- un patin dont la limite de plasticité est σ_1
- un amortisseur de viscosité η

— En 1940 MERCHANT a proposé le modèle de la figure 2.13'(a). GIBSON ET LO (1961) ont repris ce schéma et proposé une solution analytique générale du problème de consolidation ainsi modélisé. TAYLOR (1942) a simplifié les hypothèses relatives au squelette intergranulaire en supprimant le ressort linéaire placé en tête. Ces modèles sont les plus simples qui tiennent compte de la viscosité des liaisons interparticulaires du sol.

La similitude entre le squelette intergranulaire d'un sol argileux et des corps idéaux linéaires à deux ou trois éléments est très approximative.

— Pour y remédier SCHIFFMAN (1969) a multiplié le nombre d'éléments en plaçant en série avec un corps de HOOKE (fig.2.13'.(b)) n corps de KELVIN-VOIGT (fig.2.13'.(c)). SCHIFFMAN a résolu numériquement l'équation de la déformation dans ce cas. Mais la résolution de ces équations nécessite la détermination expérimentale de $(2n+1)$ paramètres ce qui est un problème quasi insurmontable dès que n est grand.

— D'autres auteurs ont proposé de doter les éléments de caractéristiques variables, non linéaires (BARDEN 1965, MURAYAMA et SHIBATA 1965). Le nombre de paramètres de ces modèles est bien entendu plus grand que celui de leur version linéaire. Le problème de leur détermination expérimentale est difficile à résoudre.

2.4.4. Théorie du fluage héréditaire

Le principe de superposition des déformations employé en théorie de l'élasticité a été généralisé aux corps viscoplastiques par BOLTZMANN en 1876. Il constitue la base des théories du fluage héréditaire très développées par les chercheurs soviétiques. BOLTZMANN propose de considérer l'effet d'une charge $\sigma(\tau)$ appliquée à un instant τ donné et maintenue constante pendant un intervalle de temps $d\tau$ avant d'être retirée.

Pour $t > \tau$ la déformation visqueuse résiduelle est :

$$\varepsilon(t) = \int K(t-\tau) \sigma(\tau) d\tau$$

$K(t-\tau)$: fonction d'influence
 $\lim_{t \rightarrow \infty} K(t) = 0$ car la déformation est supposée réversible

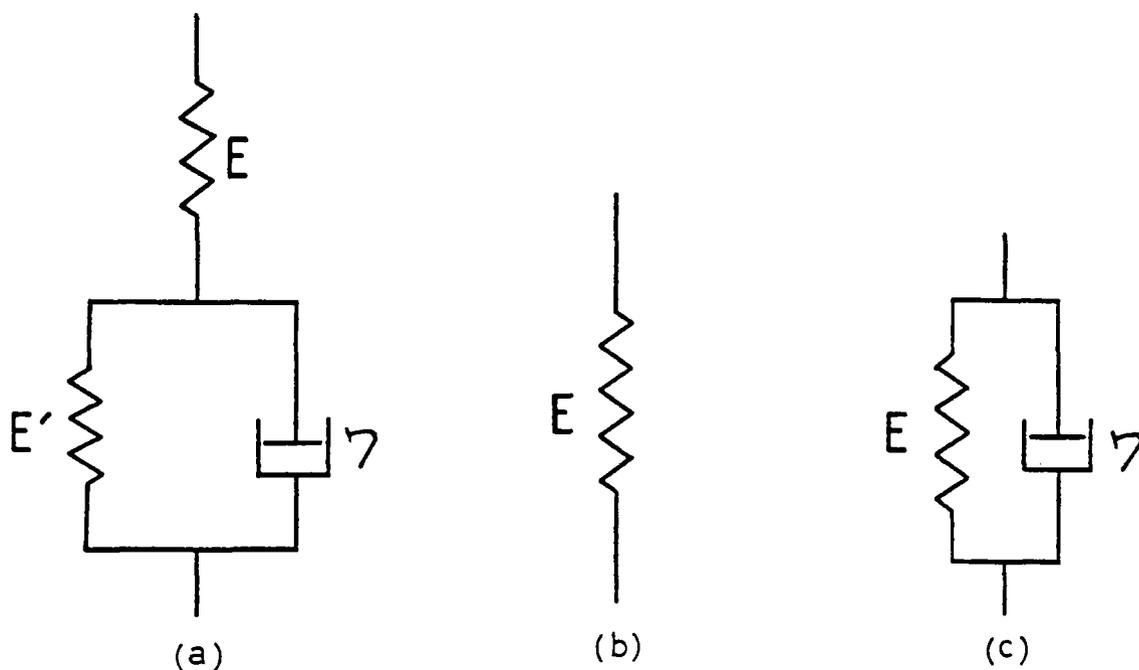


Figure 2.13 Modèles rhéologiques (a) utilisé par Merchant (Félix, 1981)
 (b) de Hooke
 (c) de Kelvin-Voigt

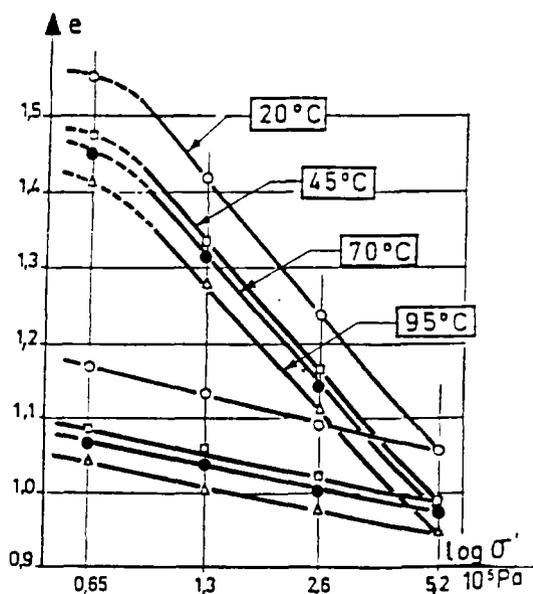


Figure 2.14 Essais de compressibilité à différentes températures sur l'argile noire
 (D. Despax, 1976)

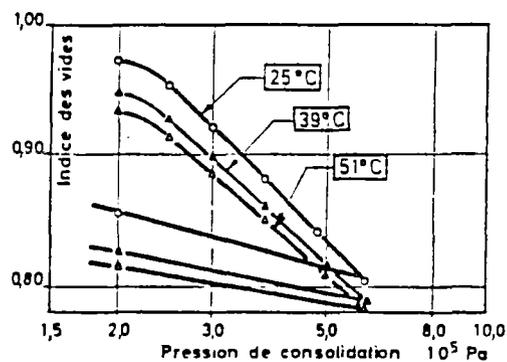


Figure 2.15 Consolidation isotrope d'une illite saturée
 (R.G. Campanella, J.K. Mitchell, 1968)

Si le régime de chargement est une succession de charges $\sigma(\tau_i)$ appliquées aux temps τ_i et retirées au bout de temps $d\tau_i$, la déformation totale est la somme des effets de chacune de ces charges élémentaires. Si au temps t une charge $\sigma(t)$ est appliquée, il faut y rajouter le terme de déformation élastique instantanée, soit :

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma(t)}{E_0} + \sum K(t-\tau_i) \sigma(\tau_i) d\tau_i$$

Lorsque la charge varie continuellement au cours du temps entre t égale à zéro jusqu'au temps t , l'équation se transforme en :

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma(t)}{E_0} + \int_0^t K(t-\tau) \sigma(\tau) d\tau$$

Cette équation constitue l'équation d'état de la théorie du fluage héréditaire de BOLTZMANN. Elle inclue en tant que cas particuliers toutes les théories du fluage basées sur les corps idéaux linéaires.

Si la charge est constante :

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma}{E_0} + \sigma c(t)$$

$c(t)$: "mesure du fluage" et sa dérivée $K(t)$ est la vitesse de fluage sous une charge unité.
 $c(t) = \sigma c(t)$ est la déformation de fluage.

Dans le cas d'une déformation sous charge constante, FELIX pose les hypothèses suivantes:

- La mesure du fluage pour les valeurs infinies du temps atteint une valeur finie car le volume des vides qui diminue est limité.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} c(t) = \varepsilon_f$$

- La vitesse de déformation au moment de l'application du palier de charge est infinie et sa variation est continue.

$$\lim_{t \rightarrow 0} dc(t) = \infty$$

- La déformation proprement instantanée du squelette intergranulaire est difficile à mesurer. Elle est supposée négligeable par rapport à la composante différée quelque soit la charge appliquée. De cette façon le module de déformation élastique instantanée est supposé infini et n'a pas besoin d'être déterminé.

$$c(0) = 0$$

La forme mathématique, déduite du fluage héréditaire non linéaire, retenue par FELIX et qui satisfait aux trois hypothèses précédentes est celle proposée par KOHLRAUSCH (1863) pour la laine de verre :

$$c(t) = \varepsilon_f (1 - \exp(-\alpha \cdot t^\beta)) \quad \text{avec } \beta < 1 \quad [13]$$

FELIX propose une méthode pour déterminer les trois paramètres α , β et ε_f présentée en annexe. ε_f est la déformation extrapolée à 100 ans. Il observe les comportements suivants :

- dans le cas de l'argile de Cubzac les Ponts, 35 chargements permettent de conclure que α et β sont reliés par une relation de la forme :

- $\lg(\alpha) = -a.\beta + b$ a, b : constantes positives
- pour un même état initial le coefficient β diminue quand la charge appliquée est plus grande, et corrélativement α augmente.
 - une petite valeur de β signifie une grande vitesse de déformation initiale, une valeur de α élevée et une croissance rapide vers les valeurs asymptotiques ϵ_f .

Il convient de rappeler que le principe de superposition n'est applicable qu'aux matériaux viscoélastiques dont la déformation totale est réversible. La validité pour le squelette intergranulaire des sols est donc approximative et ne peut correspondre qu'à certaines conditions de sollicitations.

3. DESCRIPTION DE CHARGEMENTS A TEMPERATURE CONSTANTE ET SUPERIEURE A 25°C

De nombreux auteurs ont effectués des essais de compressibilité à différentes températures. L'échantillon d'abord saturé à température ambiante est ensuite porté à une température T , puis consolidé sous une succession de charges croissantes.

L'enregistrement du tassement de l'échantillon avec le temps permet de tracer au fur et à mesure les courbes de consolidation ($dh - \lg(t)$) et les courbes oedométriques ($dh - \lg(\sigma'_v)$).

Ces expériences permettent d'apprécier l'influence de la température sur les paramètres suivants :

- le module d'élasticité E ,
- le temps de fin de consolidation t_{100} ou le coefficient de consolidation c_v ,
- le taux de compression secondaire C_α ,
- la compressibilité C_c et la pression de consolidation σ'_c .

3.1. Influence de la température sur la courbe de compressibilité

Certains résultats sont reproduits, sur la figure 2.14 pour une kaolinite, sur la figure 2.15 pour une illite, figure 2.16 pour une bentonite.

— PHILIPPONNAT (1977) a effectué des essais sur 25 échantillons à 20 et 70°C. Il déduit de ses résultats que l'écart entre les valeurs de l'indice de compression mesuré à 20 et 70°C varie de (- 17%) à (+ 15%), ce qui est inférieur à la dispersion des valeurs de C_c obtenues pour différents échantillons d'un même matériau. De plus, ces écarts se réduisent considérablement lorsqu'on considère une moyenne algébrique.

— PLUM et ESRIG trouvent pour 20 et 50°C des C_c semblables.

— DESPAX a effectué des essais sur une kaolinite à 20, 45, 70 et 95°C. Les résultats peuvent être traduits par la relation:

$$C_c = 0,256 - 1,6 \cdot 10^{-4} (T - 20)$$

T en degré celsius

— Par contre les résultats de FLEUREAU sur une illite (argile de Vallauris) amènent à la relation :

$$C_c = 0,145 + 3,6 \cdot 10^{-4} (T - 20)$$

Ces deux exemples montrent que l'indice de compression n'a pas un comportement unique avec la température et qu'il peut augmenter ou diminuer suivant la nature du sol, mais toujours dans de faibles proportions.

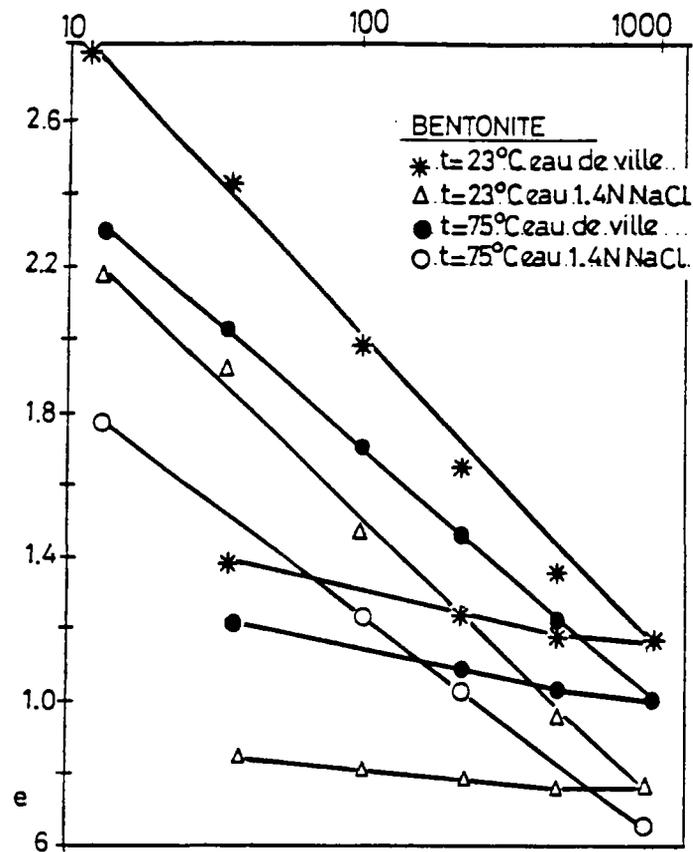


Figure 2.16 Essais de compressibilité à différentes températures sur une bentonite (J.M. Fleureau, 1979)

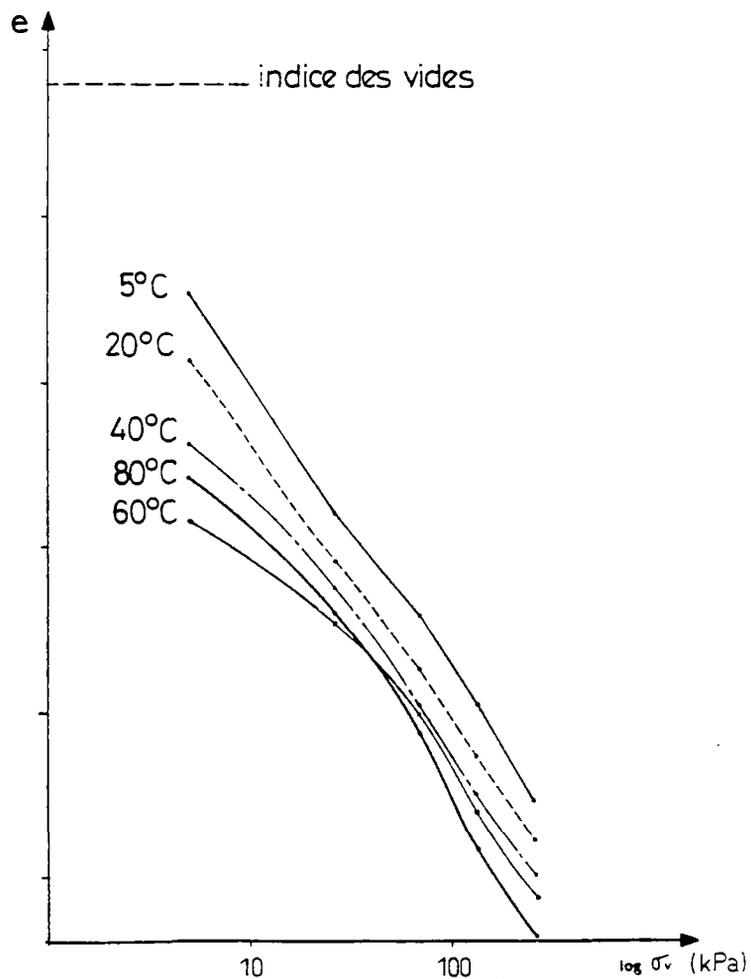


Figure 2.17 Courbes de compressibilité à différentes températures du loess de Rungis (Ch. Huret, 1985)

– Les courbes de compressibilité du loess de Rungis réalisées par HURET montrent à partir de 40°C une légère courbure (cf fig.2.17) identique à celle des courbes de compressibilité des matériaux surconsolidés. Cela voudrait dire que le chauffage entraîne une surconsolidation du sol. PHILIPPONNAT a observé des écarts moyens, inférieurs à 10%, sur la pression de consolidation mesurée à 20 et 70°C, écart qui n'est pas plus important que la dispersion inhérente à la dispersion naturelle des matériaux argileux.

3.2. Influence de la température sur le tassement instantané

Pour la phase de tassement instantané FELIX (1981) a assimilé le module d'élasticité du sol au module de compressibilité du mélange eau-air composant le liquide interstitiel :

$$E = \frac{u_0 + du + (2 \cdot q / r)}{1 - (1 - k_s) S_0}$$

u_0 : pression initiale
 S_0 : degré de saturation initial
 du : accroissement de pression
 q : coefficient de tension superficielle
 r : rayon moyen des bulles d'air
 k_s : solubilité de l'air dans l'eau

Dans ce terme interviennent le rayon moyen des bulles d'air qui augmente avec la température, la solubilité de l'air dans l'eau qui diminue avec la température, le degré de saturation du sol qui diminue avec la température pour un sol non parfaitement saturé dont une partie de l'eau interstitielle passe à l'état de vapeur. Quand on passe d'une température T_1 à une température plus élevée, ces paramètres évoluent de façon antagoniste d'où une prévision difficile du module E ou du tassement instantané dh.

– HURET (1985) observe une diminution du module d'élasticité E avec la température, évolution qui est surtout marquée entre 40° et 80°C et pour des paliers de pression suffisamment élevés. Cette variation est subordonnée à la lecture du tassement immédiatement après l'application de la charge, mesure délicate.

HURET utilise une cellule oedométrique sans contrepression, et par conséquent ses échantillons sont imparfaitement saturés, d'où l'existence d'un mélange eau-air. Il attribue le comportement de E à une baisse du degré de saturation du sol.

– DESPAX (1976) arrive dans le cas d'une argile noire kaolinitique à la relation suivante pour le module oedométrique :

$$\frac{E}{\sigma'} = 9,66 - 7 \cdot 10^{-3} (T - 20)$$

σ' en bars
 T en degré celsius

Cette égalité montre que E est assez peu affecté par la température et évolue dans le même sens que l'indique HURET.

3.3. Influence de la température sur la vitesse de consolidation

Nous avons choisi d'utiliser le paramètre t_{100} comme paramètre significatif de la cinétique de la consolidation (cf paragraphe 2.2 chap.2).

PHILIPPONNAT (1977) a effectué des essais oedométriques à 20 et 70°C sur 25 échantillons allant des sables limoneux aux argiles molles. Il constate que la vitesse de consolidation est en moyenne multipliée par un facteur de l'ordre de 3 sous l'effet de la température (cf fig.2.18). Il conclut qu'un palier de chargement de 8 heures à 70°C est équivalent à un palier de 24 heures à 20°C. Ce rapport moyen de 3 est à rapprocher de la diminution de viscosité de l'eau. En effet cette viscosité est divisée par 2,6 entre 20 et 70°C. L'accélération de la consolidation avec la température semble donc dépendre en grande partie de la diminution de la viscosité de l'eau interstitielle.

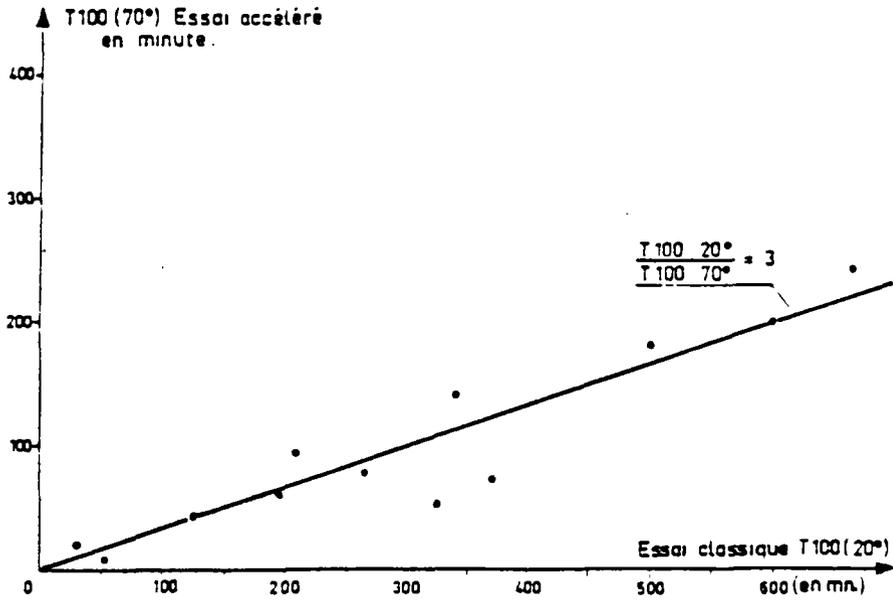


Figure 2.18 Comparaison des valeurs de t_{100} pour les deux types d'essais à 20°C (classique) et à 70°C (accéléré) (G. Philipponnat, 1977)

Figure 2.19 Essais oedométriques sur l'argile de Vallauris à différentes températures ($\sigma-t_{100}$) (J.M. Fleureau, 1979)

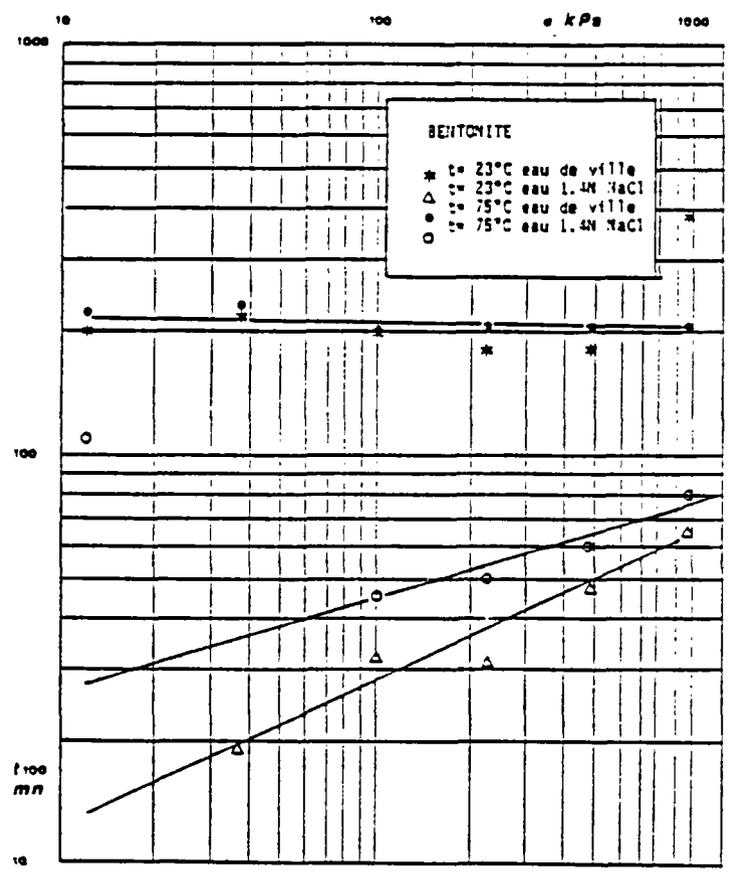
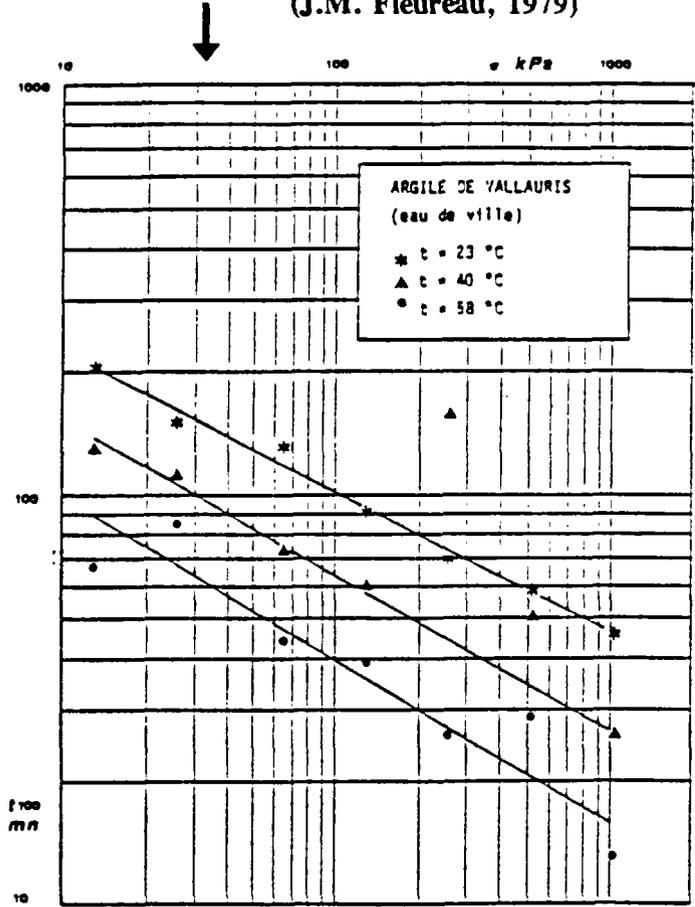


Figure 2.20 Essais oedométriques sur la bentonite à différentes températures ($\sigma-t_{100}$) (J.M. Fleureau, 1979)

Mais la dispersion des valeurs du rapport $(t_{100})_{20} / (t_{100})_{70}$ met en évidence que la viscosité n'est pas le seul paramètre sensible à la température et contrôlant l'élimination des surpressions. La nature du matériau et la contrainte de consolidation interviennent également (DESPAX 1976).

Pour étudier le rôle de la minéralogie, FLEUREAU (1979) a réalisé des expériences sur une bentonite et sur une argile contenant essentiellement de l'illite (argile de Vallauris). Il a étudié les résultats de DESPAX sur une kaolinite (argile noire). Pour comparer l'effet de la température sur des argiles de minéralogie identique mais de structure différente, il a préparé des échantillons de bentonite dans de l'eau de ville, et dans de l'eau salée (1,4 N NaCl) qui a pour effet de resserrer la structure. Les résultats sont reproduits sur les figures 2.19 et fig. 2.20. Ils montrent que le rapport $(t_{100})_T / (t_{100})_{20}$ dépend non seulement de la température, mais aussi de la structure et de la contrainte de consolidation. Il faut ajouter que suivant la minéralogie ce rapport diminue ou non avec la contrainte appliquée: dans le cas de l'illite ce rapport est constant, alors que pour la bentonite le rapport diminue.

HURET, à partir d'essais sur du loess de Rungis constate de façon analogue une accélération de la consolidation, qui est cinq fois plus rapide à 80°C qu'à 20°C. Il note que les valeurs de t_{100} à 80°C pour différentes contraintes sont regroupées, alors qu'elles sont dispersées à 20°C.

FINN rappelle la formule simplifiée du coefficient de consolidation c_v :

$$c_{v(T, e)} = \frac{K(T, e) (1 + e)}{a_w \cdot \gamma_w}$$

- $K(T, e)$: coefficient de perméabilité supposé constant au cours de chaque chargement et égal à sa valeur moyenne pendant le tassement.
- e : indice des vides qui varie faiblement lors de l'application d'une charge et on peut considérer que $(1+e) \approx (1+e_0)$.
- a_w : coefficient de compressibilité supposé indépendant de la température.
- γ_w : poids volumique de l'eau supposé indépendant de la température en première approximation.

Sachant que K est inversement proportionnel à la viscosité $\mu(T)$, on obtient :

$$\frac{c_{v(T_1, e)}}{c_{v(T_2, e)}} = \frac{K(T_1, e)}{K(T_2, e)} = \frac{\mu(T_2)}{\mu(T_1)}$$

(*) : si k (m^2) est indépendant de T , ce qui suppose que la texture est identique

Cette formule simplifiée expose clairement l'influence d'une augmentation de la température (qui se traduit par une diminution de la viscosité sur c_v) et les limites de cette interprétation dues aux hypothèses effectuées.

Dans le cas d'une roche, la perméabilité est inversement proportionnelle à la viscosité du fluide qui la traverse. Pour les sols, le problème est plus complexe puisque la consolidation induit un changement continu de perméabilité du milieu.

Nous conclurons en disant que la diminution du temps de consolidation résulte en majeure partie de la diminution de la viscosité de l'eau, mais que l'augmentation de la perméabilité "structurale" de l'argile (FLEUREAU 1979) est un facteur non négligeable. Ce dernier dépendra essentiellement de la minéralogie, de la contrainte appliquée, et de la nature de l'électrolyte constitué par l'eau interstitielle.

3.4. Influence de la température sur la compression secondaire

FLEUREAU a étudié le tassement relatif secondaire entre 1 000 et 10 000 minutes à différentes températures pour une bentonite et une illite. Il effectue une extrapolation linéaire (après avoir effectué une régression linéaire) à partir des points de la consolidation secondaire. Il pense que la dispersion des résultats est due essentiellement à la durée des essais insuffisante (1 500 à 3 000 minutes) et aux erreurs de détermination graphique.

Il constate qu'il est difficile de conclure sur l'influence de la température sur la vitesse de consolidation secondaire aux faibles contraintes de consolidation. En revanche pour des contraintes supérieures à 100 kPa il semble qu'il y ait une légère augmentation de cette vitesse avec la température. Au regard des courbes, on remarque que le tassement dû à la consolidation secondaire augmente pour l'argile de Vallauris entre les courbes à 23 et 40°C, et par contre qu'il diminue entre 40 et 75°C. Pour la bentonite il augmente de plus de 100% entre 23 et 75°C. Ces résultats sont cependant trop ponctuels pour conclure catégoriquement.

HURET a effectué des essais à 5, 20, 40, 60, et 80°C pour un loess de Rungis; il obtient pour les températures supérieures à 20°C une croissance régulière du taux de compression secondaire C_α (cf fig.2.21).

4. CONSOLIDATION SOUS SOLLICITATIONS THERMIQUES VARIABLES

Après saturation à température ambiante, le matériau est porté à un état de contrainte donné, caractérisé par une contrainte verticale σ_v' , on lui applique ensuite un incrément de température suivi quelques fois d'un refroidissement, et on observe les variations de volume consécutives.

L'application d'un saut de température sur un échantillon provoque un tassement. Ce tassement est différé, et l'essentiel du tassement pour les essais de HURET sur des loess dure entre 10 et 30 minutes. Il compare cette durée au temps d'établissement de la température à l'intérieur de l'éprouvette, ce qui lui permet de dire que la cinétique de tassement est largement influencée par la propagation de la chaleur dans l'éprouvette.

CAMPANELLA et MITCHELL (1968) ont réalisé des essais sur une illite remaniée consolidée dont ils ont élevé la température par palier d'un jour. Les résultats sont donnés sur la fig.2.22, la variation de volume total dV_{tot} est reliée au volume d'eau drainée par la relation [4], cf chapitre 1. On y distingue les éléments principaux suivants :

- la présence de deux phases lors du chauffage :
 - une phase **primaire** : quand la montée en température est rapide, la pression interstitielle augmente consécutivement à l'expansion thermique de l'eau. La dissipation de cette surpression dépend de la perméabilité et sa durée est d'autant plus longue que l'échauffement est élevé et l'argile peu perméable.
 - phase **secondaire** : une augmentation de température entraîne une diminution de la résistance des liaisons entre particules. La conséquence en est un affaissement de la structure du sol, et une diminution de l'indice des vides d'où une expulsion d'eau.

- un comportement en partie irréversible :

Quand la température diminue, il existe une tension dans l'eau interstitielle qui pousse le sol à absorber de l'eau, mais dans une mesure largement inférieure à celle expulsée par le phénomène inverse. On n'observe plus de phase secondaire, car le refroidissement provoque un renforcement de la texture du sol, et il n'y a pas de réajustement

MITCHELL trace les courbes du volume d'eau drainée au cours du temps et les courbes de variation de volume de l'échantillon (dV_{tot}) et de variation de volume du squelette argileux (dV_{sq}) en fonction de la température (cf fig.2.23 et 2.24).

Reprenons les points caractéristiques des courbes ($dV_{dr} - \lg(t)$) suite à un échauffement :

- (A) Existence d'une phase primaire :

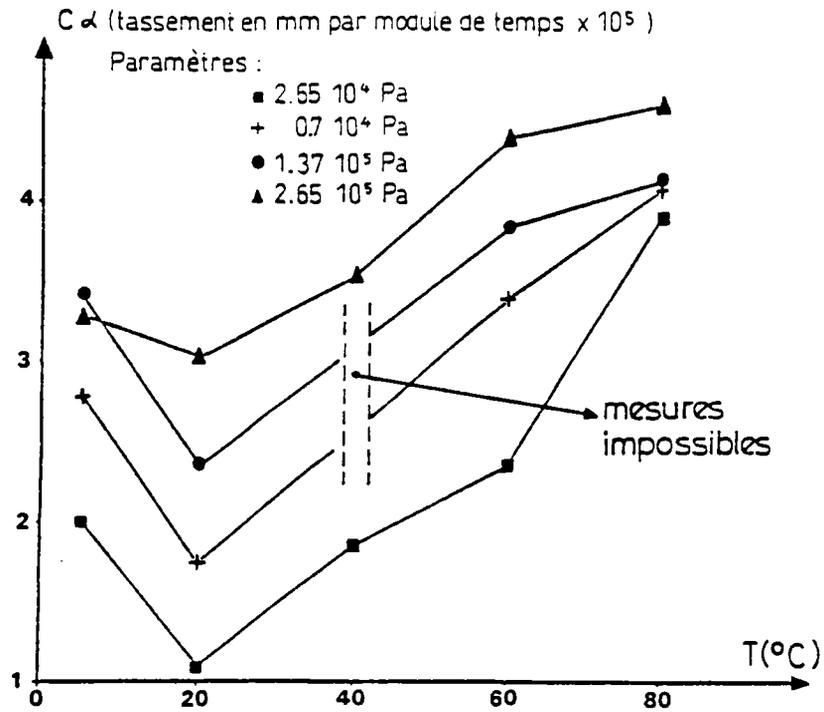


Figure 2.21 Coefficient de consolidation secondaire en fonction de la température pour le loess de Rungis (Ch. Huret, 1985)

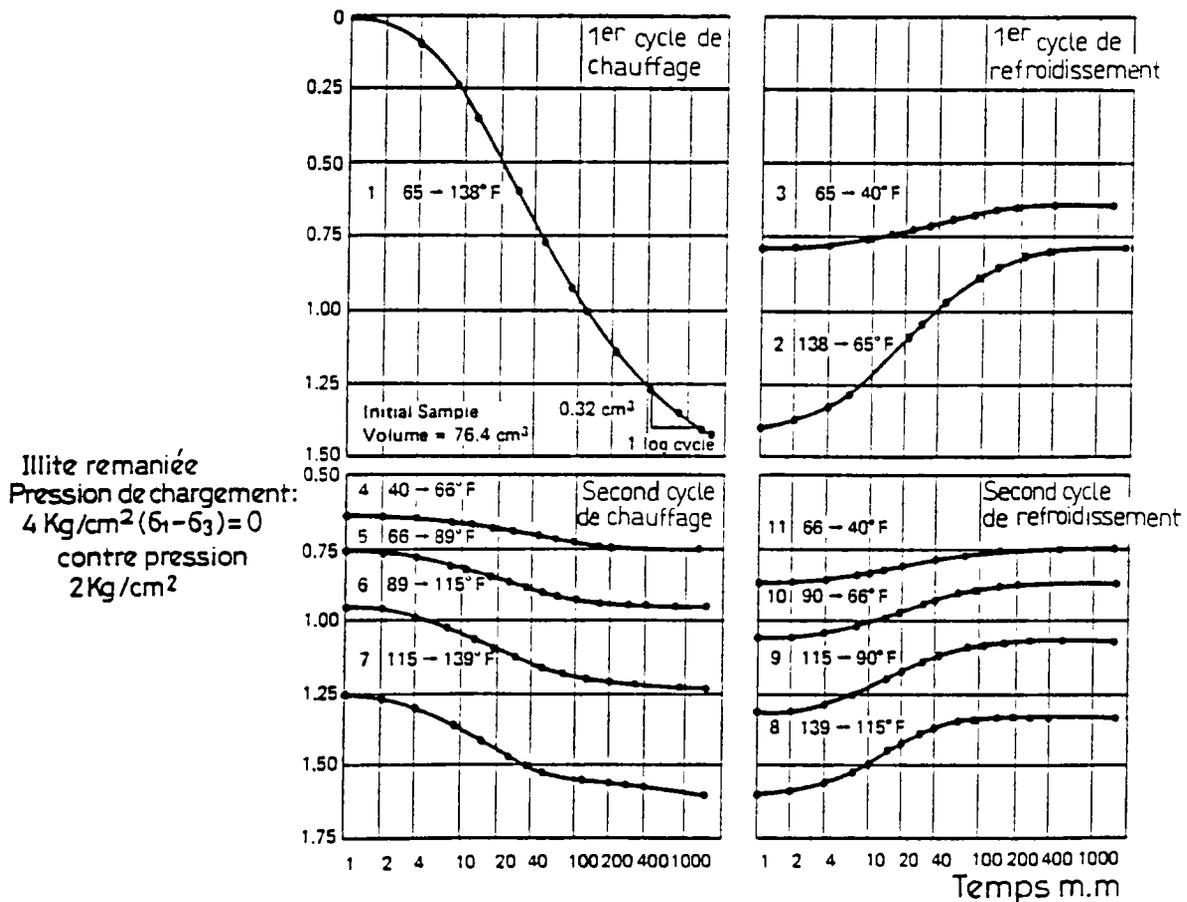


Figure 2.22 Courbe (volume d'eau drainé - logarithme du temps) suite à un changement de température à pression constante (Campanella et Mitchell, 1968)

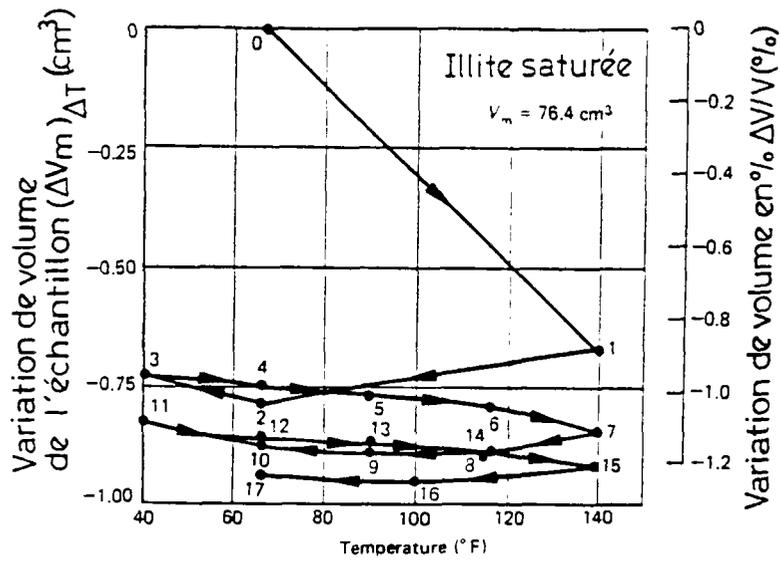


Figure 2.23 Variation de volume total $(dV_{tot})_{dt}$ due à un changement de température (Campanella et Mitchell, 1968)

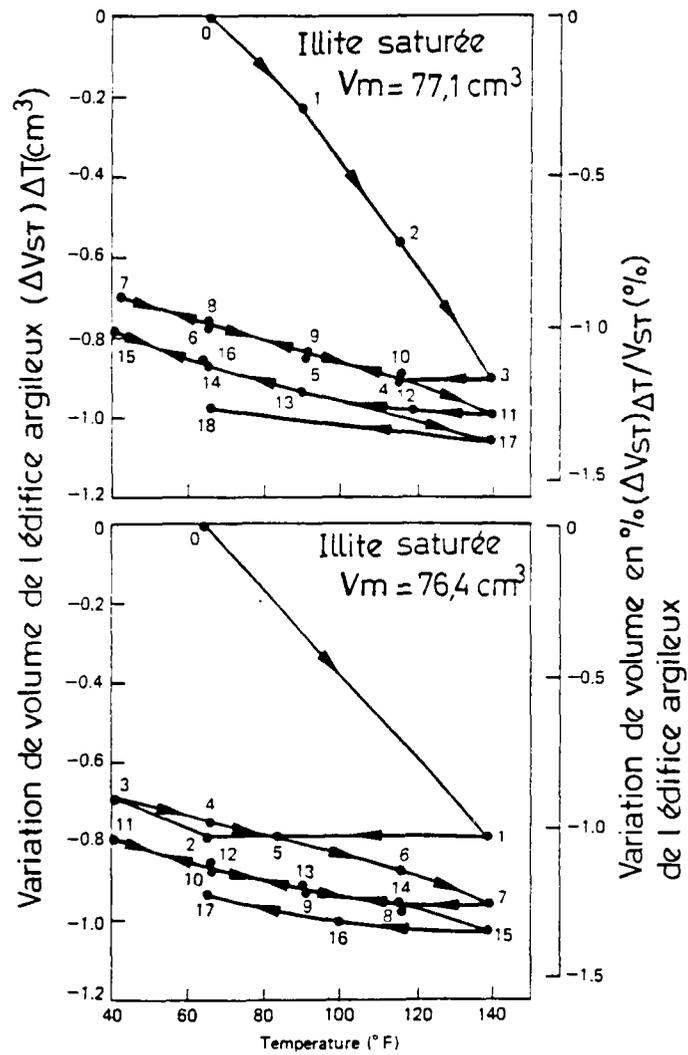


Figure 2.24 Variation de volume structural $(dV_s)_{dt}$ due à des phénomènes physico-chimiques (Campanella et Mitchell, 1968)

Nous ajouterons à ce qui a été dit précédemment qu'entre l'état initial et l'état final, il n'y a pas de modification de la contrainte effective. Celle-ci passe seulement par un minimum et le réarrangement qui se produit alors permet à la structure de s'établir à un indice des vides plus faible comme un cycle de déchargement puis de chargement classique (cf fig.2.25).

PLUM et ESRIG (1972) consolident un échantillon d'illite à 24°C et élèvent sa température à 50°C. Ils observent sur la courbe (dh - lg(t)) un fort tassement initial correspondant à toute la durée de drainage de l'eau. Les deux termes prépondérants dans cette variation de l'indice des vides sont la double couche et le changement de texture, soit le fluage du squelette. Le fluage débute dès la montée en température et son amplitude peut être non négligeable à la fin de cette première phase. FLEUREAU rappelle que, pour un indice des vides donné, la variation (de_{dc}) due à la double couche passe du simple au double entre une argile de type kaolinite et une montmorillonite, les valeurs pour l'illite étant intermédiaires. Il faut donc attribuer la plus grande partie du tassement de la bentonite à un changement de structure du matériau lors du chauffage. Ce changement de structure résulte d'une part de la variation de σ' qui passe par un minimum avant de revenir à sa valeur initiale, d'autre part de l'apport d'énergie calorifique extérieure permettant de rompre des liaisons et de passer ainsi des barrières d'énergie pour arriver à un nouvel état d'équilibre.

(B) Existence d'une phase secondaire :

La deuxième partie de la courbe apparaît linéaire en première approximation; elle traduit l'influence de la température sur la résistance structurale du squelette solide. Or une augmentation de température engendre une diminution de la résistance au cisaillement des contacts interparticulaires individuels. DESPAX présente le paramètre M de résistance maximale de la théorie de CAMBRIDGE. Les valeurs de "M" diminuent avec la température et se distribuent pour l'argile noire, sur une droite d'équation:

$$M = 1,01 - 8 \cdot 10^{-3} (T - 20)$$

Entre 20 et 80°C ce paramètre diminue de moitié. La diminution de la résistance des liaisons interparticulaires peut résulter de l'augmentation d'énergie thermique, qui agit avec les forces de cisaillement aux contacts interparticulaires, pour augmenter la probabilité de rupture des liaisons et le glissement (le lien se reforme un peu plus loin); ce qui entrainerait une accélération du fluage. Plusieurs expérimentateurs ont rapporté ce phénomène d'accentuation du taux de consolidation secondaire avec la température. Ainsi lors de l'essai de PLUM et ESRIG décrit précédemment, le chauffage à 50°C a engendré un tassement qui a mis environ un jour à se stabiliser. La nouvelle pente de la courbe de consolidation secondaire (cf fig.2.26), est égale à 0,0053 (sans effectuer de changement d'origine), à comparer à une valeur de 0,0048 observée avant le chauffage; soit une augmentation de 10%. Ce changement n'est observable que si on laisse l'échantillon se consolider suffisamment longtemps après la sollicitation thermique. Il est possible, selon PLUM et ESRIG, que le changement observé par de nombreux auteurs dans le taux de compression secondaire après une élévation de température, ait été confondu avec la déformation volumique associée immédiatement au chauffage.

D'autre part CAMPANELLA et MITCHELL pour leur essai de montée en température de 18 à 59°C par palier de 14°C ont effectué un changement d'origine en remettant le temps à 0 pour chaque début de montée en température et cela pour la courbe ($V_{dr} - lg(t)$). Ils mettent ainsi en évidence une phase secondaire nettement linéaire

Nous effectuerons lors de l'exploitation de nos résultats (chap.5) un tel changement d'origine systématique pour chaque changement de température pour les courbes (dh - lg(t)) de façon à faire l'analogie: sollicitation thermique, chargement mécanique.

Le comportement de C_α en fonction de la température n'a pas la même signification pour les 3 essais suivants fondamentalement différents :

- saturation à 24°C environ, montée en température; après stabilisation thermique, mise sous charge qui correspond au début d'enregistrement de l'essai (cf paragraphe 2 chapitre 2) ;
- saturation à 24°C environ, puis consolidation à cette température qui correspond au début de l'essai, et par la suite montée en température par paliers ;
- saturation à 24°C environ, puis consolidation à cette température qui correspond au début de l'essai, puis montée en température par paliers. A chaque palier on adopte une nouvelle origine des temps.

(C) Phase secondaire réduite après un refroidissement :

Au début de cette phase, si le refroidissement est rapide, la pression interstitielle diminue et par suite logique la pression effective augmente. Si cette augmentation est importante, elle peut avoir pour conséquence une diminution de l'indice des vides de l'échantillon, ce qui renforce d'autant la structure du sol.

(D) Caractère irréversible d'un cycle :

Les figures.2.23 et 2.24 montrent que les courbes ($dh - T(\text{en } ^\circ\text{F})$) dues à une succession de paliers de température sont semblables aux courbes ($dh - \lg(\sigma')$) dues à une succession de chargements.

CAMPANELLA et MITCHELL ont appliqué plusieurs cycles de température sur des argiles et arrivent à la conclusion que l'effet de l'"histoire" thermique d'un échantillon sur son changement de volume est similaire à l'effet d'une "histoire" cyclique des chargements lors d'une consolidation. Ainsi ils émettent l'hypothèse que soumettre un sol à un cycle de chauffage-refroidissement est équivalent à le soumettre à une surconsolidation.

DEMARS et CHARLES (1981) consolident le sol à 25°C et attendent que la compression secondaire soit déjà avancée pour monter à 50°C pendant une demi journée, durée au bout de laquelle ils redescendent la température à 25°C. La fig.2.26 illustre le changement de volume total dû au chauffage, qui se décompose en une partie réversible ($dV_{\text{rév}}$) et une partie irréversible (dV_{st}) en utilisant la notation de CAMPANELLA et MITCHELL. La partie réversible provient du fait que le coefficient d'expansion thermique de l'eau est supérieur à celui des particules du sol et donc du squelette. la partie irréversible est attribuée à une altération permanente de la microstructure du sol qui induit une réduction de l'indice des vides (de_{st}).

PLUM et ESRIG calculent après un cycle de température de 24 à 50°C puis de 50 à 24°C, la pente du tassement observé sur cinq jours. Cette pente en fonction du logarithme du temps est égale à 0,001, soit un cinquième de la pente observée avant le chauffage, qui était de 0,005 pour un échantillon normalement consolidé. Cela suggère une fois de plus que le chauffage est à l'origine d'un comportement surconsolidé de l'échantillon. Pour conforter ce résultat, la fig.2.27 montre les résultats d'un essai de compressibilité par paliers interrompus par des cycles de température. On constate que ces derniers sont bien la cause du comportement surconsolidé de l'échantillon.

Nous avons vu jusqu'ici des cas typiques de la réponse d'un échantillon à un changement de température, mais de nombreux paramètres interviennent et peuvent modifier ces résultats, étudions-les séparément.

4.1. Rôle de la température

HOUSTON a montré que plus la température initiale à laquelle a lieu la consolidation est élevée, plus l'échantillon devient rigide.

CAMPANELLA et MITCHELL ont conclu, suite à leurs essais, que plus l'incrément de température appliqué est élevé plus la vitesse de fluage, ou C_α , est importante :

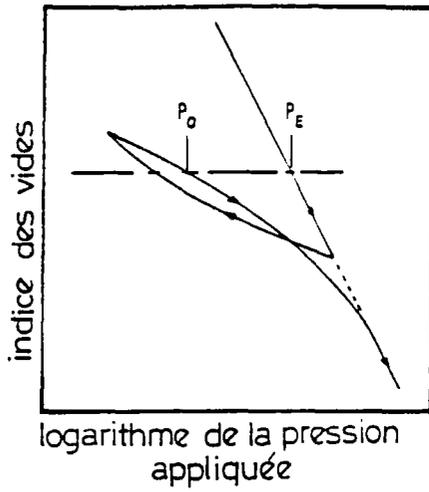


Figure 2.25 Détail d'une courbe oedométrique classique avec un cycle déchargement-chargeement (R.L. Plum, M.I. Esrig, 1969)

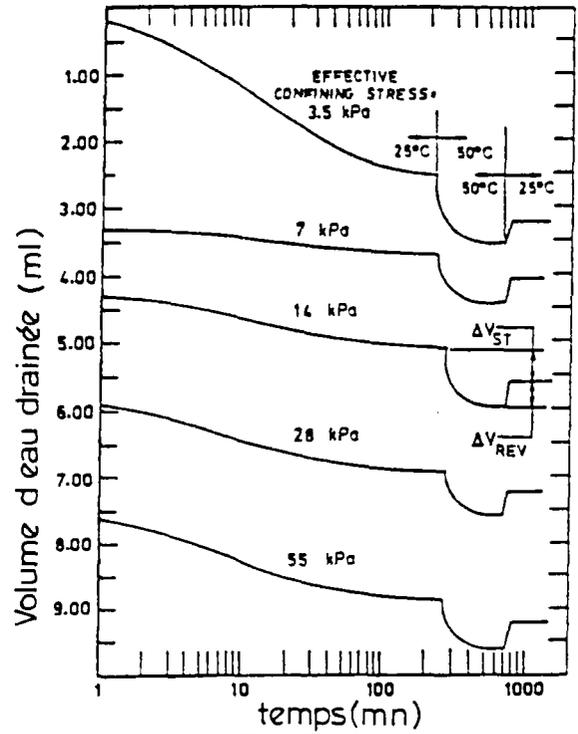


Figure 2.26 Courbe ($V_{\text{eau drainée}} - \log t$) à chaque palier de pressions au cours duquel un cycle 25-50-25°C est appliqué (K.R. Demars et R.D. Charles, 1982)

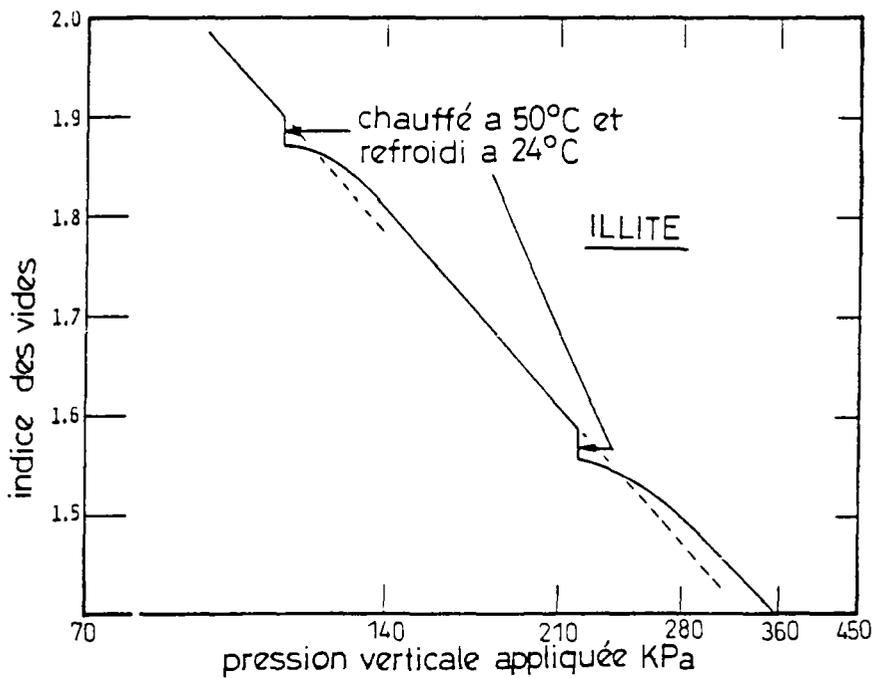


Figure 2.27 Effet de cycles 25-50-25°C sur la courbe compressibilité (R.L. Plum, M.I. Esrig, 1969)

$$C_\alpha = 0,42 \cdot 10^{-2} \text{ quand l'échantillon passe de } 18 \text{ à } 59^\circ\text{C}$$

$$C_\alpha = 0,18 \cdot 10^{-2} \text{ quand l'échantillon passe de } 18 \text{ à } 32^\circ\text{C, ou de } 32 \text{ à } 46^\circ\text{C, ou de } 46 \text{ à } 60^\circ\text{C}$$

Cette vitesse dépend donc beaucoup plus de l'augmentation de température que de la température finale.

Cet incrément de température influe directement sur l'augmentation de la pression interstitielle. Différentes expressions ont été établies pour calculer celle-ci, notée u , dans le cas d'un essai non drainé. Reprenons celle de CAMPANELLA et MITCHELL :

$$du = \frac{n \, dT \, (\alpha_s - \alpha_v) + \alpha_{st} \, dT}{m_v} \quad [15]$$

m_v : compressibilité du squelette solide
 α_{st} : coefficient physico-chimique de dilatation du squelette solide
 n : porosité

PLUM et ESRIG ont comparé pour une argile et pour une montée de 14 à 38°C, la pression des pores dans le cas d'un essai non drainé et d'un essai drainé. Leurs résultats reproduits sur la figure 2.28 et montrent une bonne concordance. Par conséquent l'expression donnée par la relation [15] peut donner une bonne approximation de l'augmentation maximale de la pression interstitielle même dans le cas d'un essai drainé, car le drainage est fortement limité par la faible perméabilité du matériau.

Lors du chauffage, plus l'incrément de température est élevé plus l'énergie calorifique apportée à l'échantillon et lui permettant de rompre des liaisons est grande. D'autre part σ' diminue, ce qui relâche la structure et lui permet de se réarranger différemment.

Une montée de 20 à 80°C soit par paliers de 5°C soit directement n'aura sûrement pas le même effet sur le changement de volume de l'échantillon ; celui ci dépend donc de la vitesse de montée en température.

Nous verrons au paragraphe 4.2 (fig.2.33) que la déformation thermique pour une argile normalement consolidée augmente avec la température finale. Dans le cas d'une argile faiblement consolidée la température finale sera déterminante vis à vis du comportement du sol : dilatant aux faibles températures, compactif aux fortes température.

4.2. Rôle du degré de surconsolidation

PLUM et ESRIG montrent la relation entre la déformation volumique et le taux de surconsolidation pour une illite (cf fig.2.29). Le taux de surconsolidation, appelé aussi OCR ("over consolidated ratio"), est égal au rapport de la pression de préconsolidation σ'_c sur la pression appliquée σ' . Il apparaît que le tassement associé à une élévation de température diminue rapidement quand le sol est surconsolidé et vaut 0 pour un OCR de 1,7. Bien que cette courbe n'ait pas été prolongée, FLEUREAU extrapole en disant que le chauffage donne lieu à un gonflement pour un OCR supérieur à 1,8 dans le cas de cette argile. Mais cette limite est sans doute intrinsèque au matériau considéré.

PIUM et ESRIG effectuent un essai de consolidation par paliers avec deux cycles de déchargement-chargeement. Pour chaque palier de pression ils effectuent un cycle de 25 à 50°C puis de 50 à 25°C. Les résultats sont reproduits sur la fig.2.25. Ils montrent que, dans le domaine consolidé, la variation d'indice des vides ($e_{v,t}$) est indépendante de la pression effective appliquée. Par contre, quand le sol est à l'état surconsolidé, celle-ci varie en fonction de l'OCR et en sens inverse de ce terme.

Enfin, plus récemment, BALDI a effectué une étude très complète sur ce sujet.

Il a voulu vérifier par un premier type d'essais les deux hypothèses suivantes sur le comportement thermomécanique des argiles :

- le comportement des argiles dans un état surconsolidé est thermoélastique, et les déformations sont réversibles.

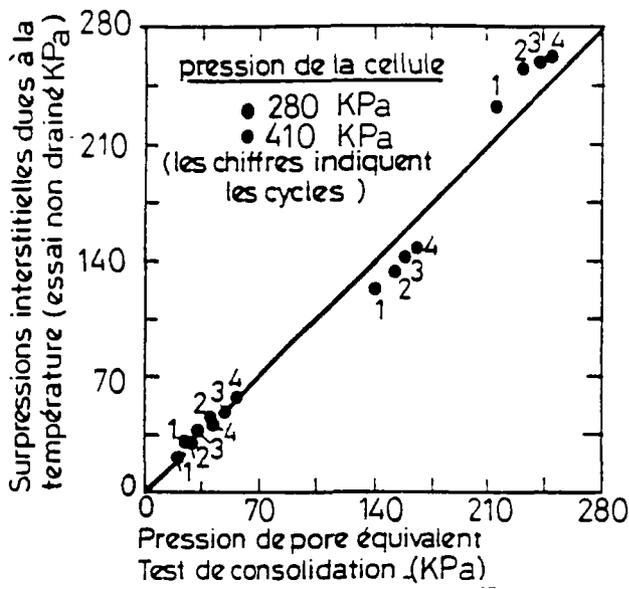


Figure 2.28 Relation U_{max} (essai non drainé) et u (essai drainé) (R.L. Plum, M.I. Esrig, 1969)

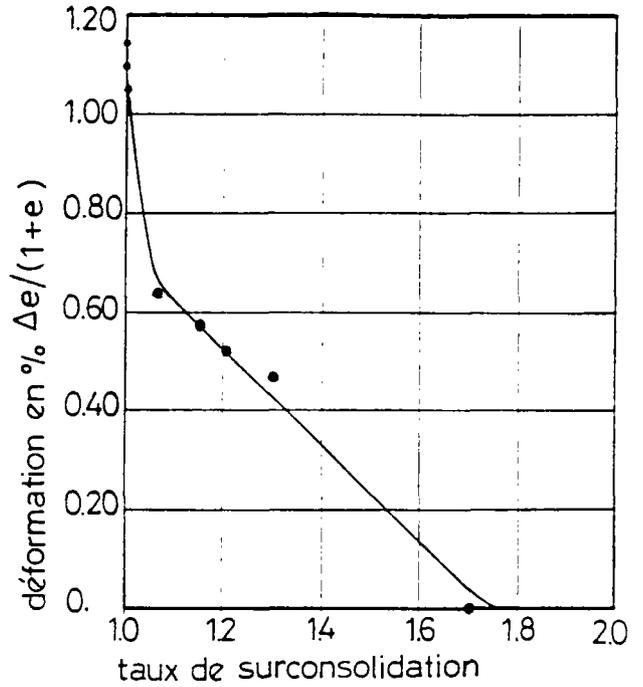


Figure 2.29 Effet du taux de surconsolidation sur le changement de volume d'une illite dû au chauffage de 24° à 50° (R.L. Plum, M.I. Esrig, 1969)

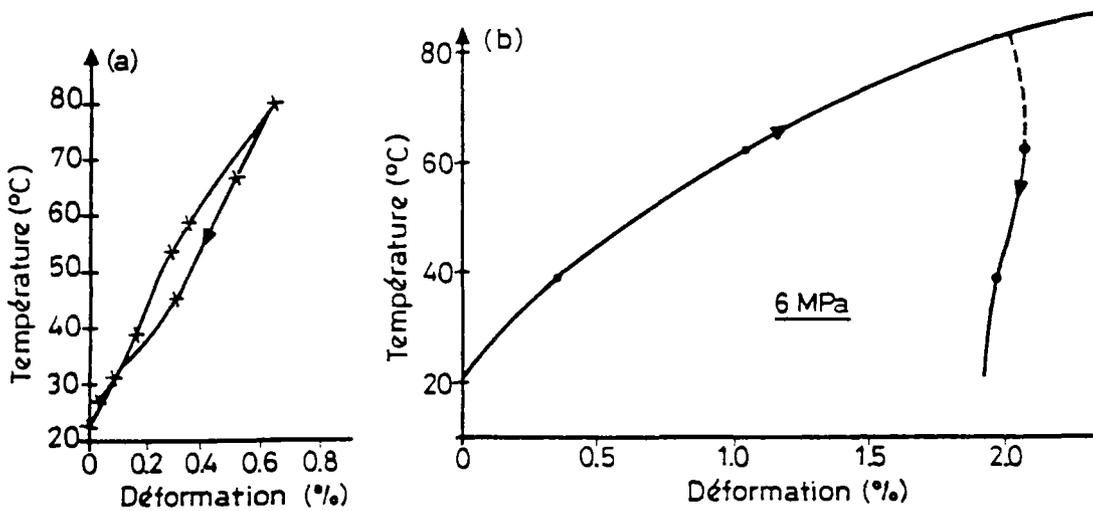


Figure 2.30 Courbes de déformation volumique avec la température pour un cycle de chauffage-refroidissement (a) hystérésis de la courbe pour l'argile silteuse de Pontilda chargée à 0,5 MPa et OCR = 2 ; (b) argile de Boom normalement consolidée (Baldi)

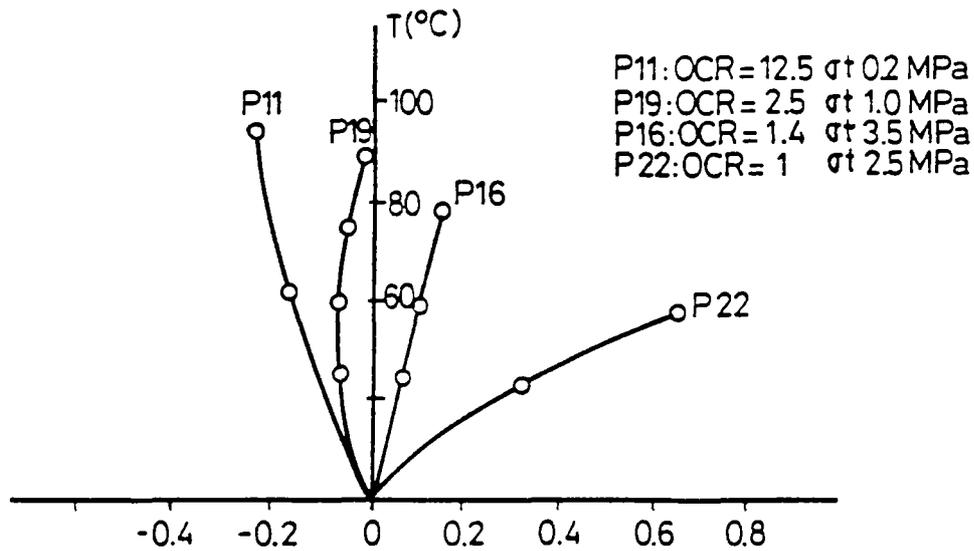


Figure 2.31 Courbes de déformation verticale au cours du chauffage sous pression effective isotrope constante pour l'argile silteuse de Pontilda

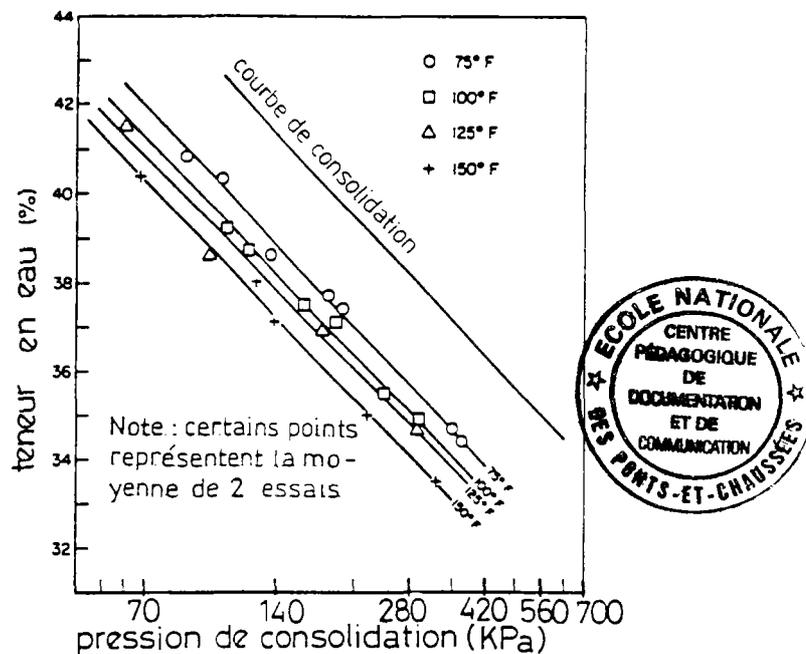


Figure 2.32 Droites des points de rupture à la compression en fonction de la teneur en eau pour différentes températures (Sherif et Burrous, 1969)

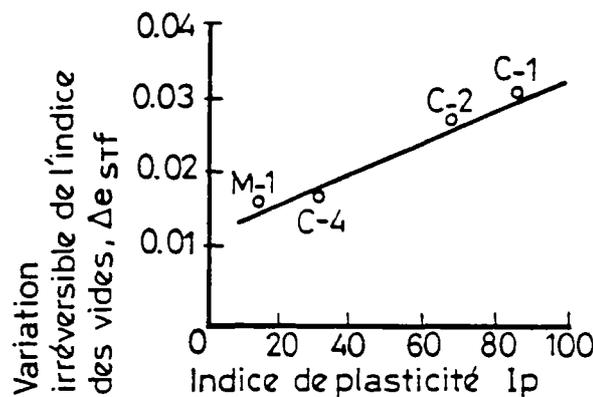


Figure 2.33 Courbe $(I_p - (de_s)_{STF})$ pour un cycle de température 25-50-25°C (K.R. Demars et R.D. Charles, 1982)

- le comportement des argiles dans un état normalement consolidé est inélastique, et une partie des déformations est irréversible.

Un simple cycle de chauffage de 22 à 80°C suivi par un refroidissement à 22°C à pression effective constante, effectué sur l'argile silteuse de Pontilda (fig.2.30(a)) à l'état surconsolidé, OCR égal 2, montre un cycle de déformation réversible. Les essais sur l'argile de Boom (fig.2.30(b)) normalement consolidée confirment l'hypothèse d'un comportement inélastique au cours du chauffage.

Le deuxième type d'essai effectué sur l'argile de Pontilda permet d'étudier, pour différentes pressions effectives constantes, l'évolution de la déformation quand on chauffe par paliers entre 20 et 90°C. La fig.2.31 montre les résultats obtenus. On constate que les déformations thermiques dépendent de la pression (soit de l'OCR) mais aussi de la température. Cette déformation est dilatante pour de faibles valeurs de la pression appliquée, soit OCR supérieur à 2, et compactive pour les fortes valeurs, soit OCR inférieur à 2. Il faut ajouter que les fortes températures augmentent la tendance à la compaction, et que pour un échantillon faiblement surconsolidé, le comportement sera donc dilatant à faible température, et compactif à forte température.

4.3. Rôle de la teneur en eau

SHERIF et BURROUS (1972) ont effectué des essais sur une argile reconstituée pour étudier l'évolution de la résistance au cisaillement. Ces résultats sont regroupés sur la fig.2.32. Cette figure indique qu'un échantillon de sol à faible teneur en eau subira une plus grande réduction absolue de sa résistance au cisaillement pour une même température, qu'un échantillon ayant une forte teneur en eau. Ainsi, pour un même type de sol, et en passant de 24 à 65°C, on constate une diminution de la contrainte de rupture de :

- 30 kPa (≈ 30 %) pour $w_i = 41$ %
- 130 kPa (≈ 29 %) pour $w_i = 34$ %

Deux équations différentes peuvent décrire la résistance à la compression σ_T de cette argile :

$$\sigma_T = \exp (A - B w - C dT) = \sigma_0 \exp (- C dT)$$

$$\sigma_T = \frac{T_0}{T} \exp (A - B (\frac{\delta_{w_0}}{\delta_w}) w)$$

- T_0, T : température de référence et de l'essai (en °F)
 σ_0 : résistance à la compression à T_0 (psi)
 δ_{w_0}, δ_w : densité de l'eau à T_0 et T (%)
 A, B : constantes dépendant du matériau
 C : caractéristique des changements induits par la température, et déterminée expérimentalement.

4.4. Rôle de la minéralogie

Les déformations de l'argile au cours de la consolidation dépendent de façon importante des interactions entre feuillets ou groupes de feuillets, c'est à dire de la minéralogie et de la texture du matériau.

FLEUREAU montre que la limite en degré de surconsolidation pour un échantillon, entre le comportement dilatant et compactif, varie suivant le sol et sa minéralogie: 1,8 pour l'illite (PLUM et ESRIG), 5 à 6 pour l'argile de Vallauris et plus pour une bentonite.

BALDI fait la remarque suivante pour les essais *in situ* à long terme, la transformation de smectite en illite peut commencer vers 100°C en présence de cations K dans l'électrolyte, et peut conduire à la libération d'eau de l'espace interfoliaire, conduisant à un tassement. Il est actuellement difficile de juger de l'importance de ce phénomène dans les essais de laboratoire.

La kaolinite devrait être stable entre 20 et 110°C.

4.5. Rôle de la granulométrie et de la plasticité

Ces deux paramètres sont traités ensemble du fait de leur interdépendance. En effet, un sol aura d'autant plus de chance d'être plastique qu'il est fin.

DEMARS et CHARLES ont observé après un cycle 20-50-20°C que la déformation irréversible relevée varie suivant les sols. Ainsi une argile silteuse (51% silt) présente une déformation égale à la moitié de celles de deux argiles (34 et 31% silt). De plus il n'apparaît pas de phénomène de consolidation secondaire pour l'argile silteuse. Il faut noter que ce sol a une plasticité de 14,4%, bien inférieure à celle des deux autres argiles, de 85% et 67%. Or la plasticité est un facteur prédominant dans le comportement des matériaux argileux.

NOBLE et DEMIREL évaluent les volumes concernés par les liaisons interparticulaires, et trouvent que pour les argiles (par exemple la montmorillonite) le volume est de l'ordre de la particule ; alors que pour les silts, il est beaucoup plus faible, ce qui signifie que les liaisons se font sur les aspérités de surface. Les silts contrairement aux argiles ne présentent pas d'effet significatif de la température sur la consolidation. Ceci suggère une influence plus faible de l'énergie de surface des particules dans le cas des silts; mais aussi que l'effet d'une variation de la teneur en eau est plus important sur un silt que sur une argile très plastique, du fait de la grande différence de surface spécifique de ces matériaux. L'énergie d'activation (dG) obtenue pour les silts est égale à 40% de celle obtenue pour les argiles.

DEMARS et CHARLES ont constaté sur quatre sols normalement consolidés que la variation de volume irréversible due à un cycle de température augmente avec la plasticité de ces sols. Ils ont relié graphiquement la variation de volume avec la plasticité sur la fig.2.33, et observent un alignement des points sur une droite d'équation:

$$(de_{st}) = 0,012 + 0,00221 I_p$$

I_p : indice de plasticité en %
équation pour un cycle de 25°C

En normalisant cette relation avec dT, on arrive à une formule plus générale:

$$(de_{st}) = (0,00048 + 0,0000088 I_p) dT$$

dT : amplitude du cycle de température en (°C)

Pour les échantillons à l'état surconsolidé, (de_{st}) dépend donc du type de sol mais aussi de sa plasticité.

4.6. Rôle de la pression appliquée

PLUM et ESRIG obtiennent après un cycle 25-50-25°C un changement de volume irréversible presque identique pour chaque palier de pression appliquée: 3,5 - 7 - 14 - 28 - 55 kPa.

CAMPANELLA et MITCHELL constatent dans le cas des argiles de Vicksburg Buckshot que plus la pression effective est élevée plus la variation de la pression interstitielle sera forte pour un même changement de température. Par contre le paramètre $F (= (du/dT) / \sigma')$ n'est pas affecté par σ' et peut être un bon indicateur de l'influence de la température sur u.

4.7. Rôle du temps

HURET pense que la cinétique du tassement lors d'un changement de température est largement influencée par la propagation de la chaleur dans l'éprouvette. L'application d'une température n'est pas un phénomène immédiat.

D'autre part, les matériaux argileux ayant la propriété de fluer, le tassement final dépendra du temps de l'essai ou du temps choisi pour effectuer la mesure.

5. CONCLUSION

L'essai oedométrique permet de suivre la consolidation au cours du temps et de déterminer les relations entre les charges et les déformations obtenues sous ces charges, après consolidation. Il permet également de mesurer directement ou indirectement le coefficient de perméabilité verticale pour une compacité donnée.

Nous remplacerons dans notre étude le rôle de la contrainte par celui de la température, que l'on fera varier pendant que la contrainte sera maintenue à une valeur constante. Ainsi, on espère déterminer des relations entre la température et les déformations observées.

L'étude bibliographique présentée dans ce chapitre a fait ressortir l'importance dans le cas de sollicitation thermique de l'influence de la variation de certains paramètres sur la déformation. Ainsi, la déformation thermique (tassement) est d'autant plus élevée que :

- l'on est en présence d'argile gonflante de type smectitique,
- la granulométrie du sol est fine, signe de la présence d'un pourcentage important d'argile (au sens minéralogique),
- la plasticité est élevée,
- le degré de surconsolidation est faible (à noter qu'en deçà d'un certain degré on observe un gonflement et non plus un tassement),
- l'incrément de température est élevé,
- la durée de l'essai est longue,
- l'indice des vides initial est élevé.

Il faut ajouter que ces facteurs n'agissent pas de façon indépendante, mais au contraire qu'ils interfèrent.

Ces différents paramètres seront testés, tant lors de la sélection de sols pour l'étude (minéralogie, granulométrie, plasticité, degré de surconsolidation, indice des vides) que lors de la réalisation des essais (incrément de température, temps).

Chapitre 3

CARACTERISATION MINERALOGIQUE, GEOTECHNIQUE ET TEXTURALE DES MATERIAUX SELECTIONNES POUR L'ETUDE

1. INTRODUCTION, OBJECTIF DE LA SELECTION

Les critères de choix des matériaux retenus pour l'étude expérimentale du thermofluage sont essentiellement :

– La MINERALOGIE : le pôle smectitique a été écarté car le gonflement structural potentiel risque de cacher une diminution de volume par réarrangement textural. Il reste donc, parmi les grands types d'argiles, l'illite et la kaolinite dont il serait intéressant d'étudier et de comparer les comportements respectifs. Cependant un sol argileux est rarement constitué d'une seule argile, au sens minéralogique. Les analyses ont montré en fait dans les matériaux sélectionnés la présence plus ou moins faible, mais très fréquente de smectites.

– La GRANULOMETRIE et la PLASTICITE : le fuseau granulométrique retenu pour l'étude est celui des silt-argiles. La classification utilisée est celle des géotechniciens qui met la limite limon-argile (soit silt-argile) à $2\mu\text{m}$. La définition des sites de prélèvement a donc privilégié la nécessité d'avoir deux argiles au sens strict (plus de 90% pondéral $< 2\mu\text{m}$) mais de plasticité différente, ainsi qu'une argile plus silteuse.

– Le DEGRE DE SURCONSOLIDATION : nous avons vu précédemment (chapitre 2) qu'il est possible que la réponse à long terme des argiles à une sollicitation thermique soit fonction de leur degré de surconsolidation. C'est pourquoi différents degrés de surconsolidation naturels ont été recherchés.

Les échantillons de sol ont été prélevés en prenant les précautions d'usage nécessaires pour éviter le remaniement et la surconsolidation due à la dessiccation de surface. Ils ont été recueillis à proximité de la surface du sol afin d'éviter les difficultés techniques dues à un prélèvement en profondeur d'un volume important de matériau et dans des zones fraîchement excavées.

2. PRESENTATION DES SITES DE PRELEVEMENT

Une étude bibliographique et de nombreux contacts avec des exploitants de carrières d'argile ont permis de constater que les critères granulométriques et plus encore mécaniques étaient généralement méconnus, la description des argiles se faisant le plus souvent dans le cadre d'une utilisation industrielle.

Des échantillons ont été prélevés sur 8 sites distincts puis caractérisés. Trois ont été retenus *in fine*.

2.1. VEXIN

L'argile est exploitée près de LIMAY dans le Val d'Oise par une entreprise locale pour le compte des "ciments Lafarge".

C'est une argile litée et bariolée du Sparnacien, couleur lie de vin et blanche. Elle est constituée essentiellement de kaolinite fine. Elle a été prélevée sur un gros bloc débité par une pelle hydraulique et a été retenue en raison de sa plasticité potentielle.

2.2. PLATEAU DE BRIE

L'argile a été prélevée à 4 km au Sud Est de LAGNY par un sondage effectué par la société SOLETANCHE pour le compte de la RATP (prolongement de la ligne A du RER vers Eurodysneyland). Ce sont des argiles vertes du Stampien inférieur (Sannoisien). Les argiles sannoisiennes, caractérisées par une coloration verte intense, constituent un niveau repère remarquable. L'élément argileux domine très nettement sous forme d'illite et de smectite, alors que la kaolinite y est accessoire. Des concrétions marno-calcaires sont disséminées dans la masse. L'analyse par calcimétrie et diffractométrie de rayons X révèle

un fort pourcentage de calcite et quelques traces de quartz. Sèches, les argiles vertes se débitent en petits blocs; humides, elles sont plastiques. La puissance de ce niveau est de l'ordre de 6 à 7 m. Les carottes fraîches ont été prélevées entre 8 et 12m de profondeur.

Cette argile a été retenue en raison de sa composition minéralogique (illite essentiellement).

2.3. PROVINS

Cette argile a été prélevée par abattage dans deux exploitations à ciel ouvert de la société DAMREC, dont une seule a été retenue. Cette exploitation se situe dans la région de Provins en Seine et Marne. Les blocs prélevés avaient été fraîchement débités.

Ce sont des argiles grises très fines de l'Yprésien inférieur (Sparnacien). Généralement présentes sous la forme d'un niveau régulier, elles peuvent localement avoir une disposition lenticulaire insérée dans une masse détritique sableuse ou gréseuse. Elles ont été retenues pour leur composition minéralogique essentiellement kaolinique et aussi leur granulométrie très fine. Les blocs proviennent du site de ST GENEST à 4km au Sud Est de Provins où l'argile est plus fine et plus plastique.

Chaque argile prélevée a fait l'objet d'une identification minéralogique, géotechnique et texturale complète.

3. MINERALOGIE

La nature minéralogique des matériaux a été déterminée par diffraction X sur trois lames d'argile (particules inférieures à 2µm) par type de sol prélevé: une lame dite "naturelle", une chauffée à 490°C et une glycolée. Tous les échantillons ont été préalablement décarbonatés par une attaque à l'acide chlorhydrique.

Les résultats synthétiques de l'interprétation des diffractogrammes obtenus sont présentés dans le tableau 3.1. Le réglage du diffractomètre utilisé favorise la précision des mesures des valeurs angulaires au détriment de la discrimination des intensités relatives. Il n'est donc possible de donner qu'une proportion relative des différents minéraux.

La détermination de la teneur en carbonate a été réalisée au calcimètre DIETRICH-FRUHING. Seule l'argile de LAGNY présente une teneur non négligeable, sa valeur est de 25% (en masse).

Sites	Kaolinite	Illite	Smectite	Interst.	Goethite	Quartz
St Genest	* * *	-	-	-	-	*
Limay	* * *	-	-	* *	*	*
Lagny	-	* * *	* * *	-	-	*

* * * : forte proportion
 * * : faible proportion
 * : traces
 - : absence
 Interst. : interstratifié illite-smectite.

Tableau 3.1 : Composition minéralogique

4. GRANULOMETRIE

L'étude de la granularité des matériaux a été réalisée par deux méthodes complémentaires :

- granulométrie par tamisage, qui permet de déterminer la distribution pondérale des particules d'un matériau suivant leur dimension, en se limitant aux particules dont le diamètre est supérieur à 40 μ m;

- sédimentométrie (au Sédigraph) qui permet de déterminer la distribution des particules fines (d'un diamètre inférieur à 40 μ m) d'un matériau suivant leurs dimensions.

Les courbes granulométriques sont présentées sur la figure 3.1. La répartition en classes granulométriques des matériaux est quant à elle donnée dans le tableau 3.2.

La classification utilisée est celle des géotechniciens.

Site	Sable fin (%) 200 - 20 μ m	Silt (%) 20 - 2 μ m	Argile (%) < 2 μ m
St Genest	1	3	96
Limay	1	6	93
Lagny	5	17	78

Tableau 3.2 : Répartition en classes granulométriques.

Les trois matériaux appartiennent donc à la classe des argiles. Les argiles de LIMAY et ST GENEST sont plus fines que celle de LAGNY.

5. CARACTERISTIQUES GEOTECHNIQUES

Les essais d'identification géotechnique ont été réalisés suivant les modes opératoires définis par le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.

5.1. Caractéristiques d'identification géotechnique

Les caractéristiques d'identification géotechniques des trois sols sont présentées dans le tableau suivant.

Site	γ_h g/cm ³	γ_d g/cm ³	w ₀ %	S _r %	e ₀	w _L %	I _P %	VB g/100g	Ssp m ² /g
St Genest	1.88	1.44	31	0.98	0.82	91	49	5.4	118
Limay	1.89	1.43	32	0.98	0.87	130	84	14.1	316
Lagny	1.91	1.45	32	1	0.86	78	35	10.0	255

(VB: valeur de bleu; Ssp: surface spécifique d'après valeur de bleu)
ces coefficients sont définis dans la table des notations

Tableau 3.3 : Caractéristiques géotechniques

Les indices des vides (e₀) et les teneurs en eau (w₀) indiquent des argiles peu compactes, saturées mais en dessous de leur limite de plasticité w_p.

L'indice de plasticité est déduit des valeurs des limites d'ATTERBERG. En plaçant ces valeurs dans le diagramme de CASAGRANDE utilisé pour la classification des sols fins du L.C.P.C. (SCHON, 1965), on notera que ces trois argiles sont très plastiques (cf fig.3.2) et proches de la ligne A séparant les argiles des limons.

L'essai au bleu relié à la surface spécifique du sol permet d'apprécier globalement la quantité et la qualité de la fraction argileuse présente dans le sol. Le principe de l'essai consiste à mesurer la capacité d'adsorption d'une couche monomoléculaire de bleu de méthylène par les surfaces des particules fines d'une quantité donnée de sol immergé. Cette mesure est donc fonction de la capacité d'une argile à fixer des molécules polaires, et est

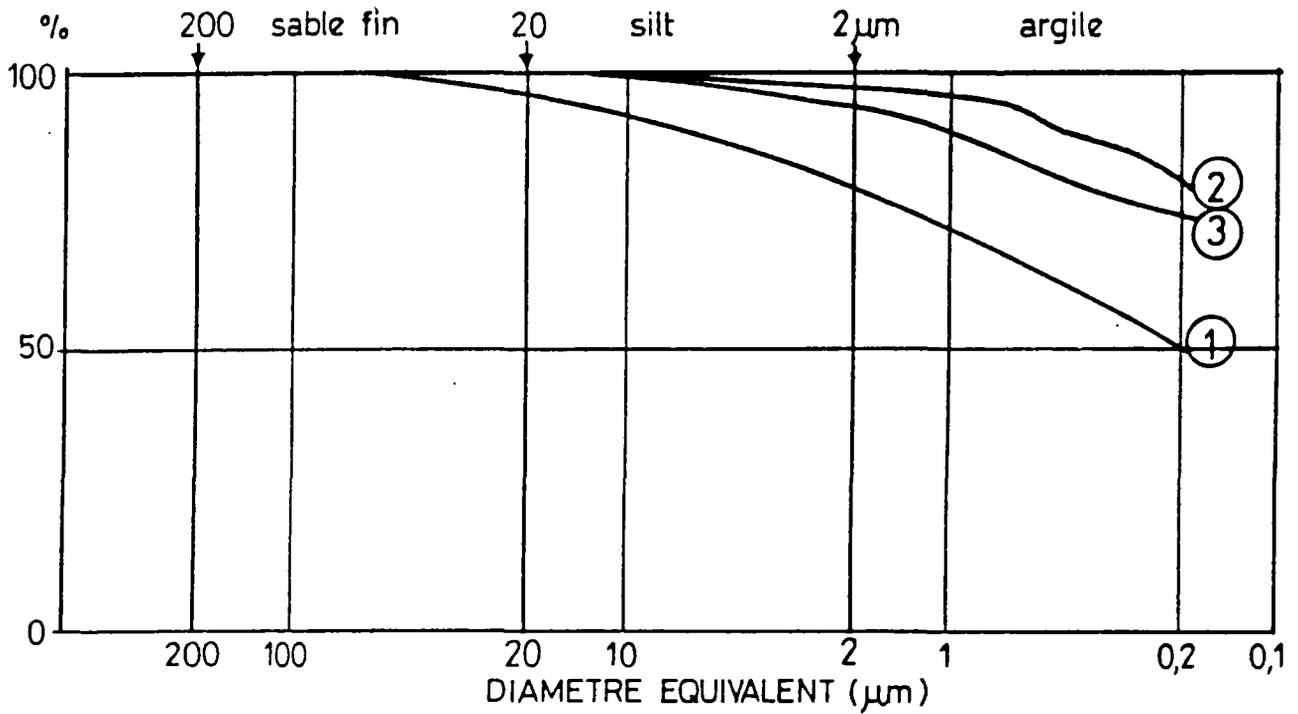


Figure 3.1 Courbe granulométrique des argiles de (1) LAGNY, (2) SAINT-GENEST, (3) LIMAY

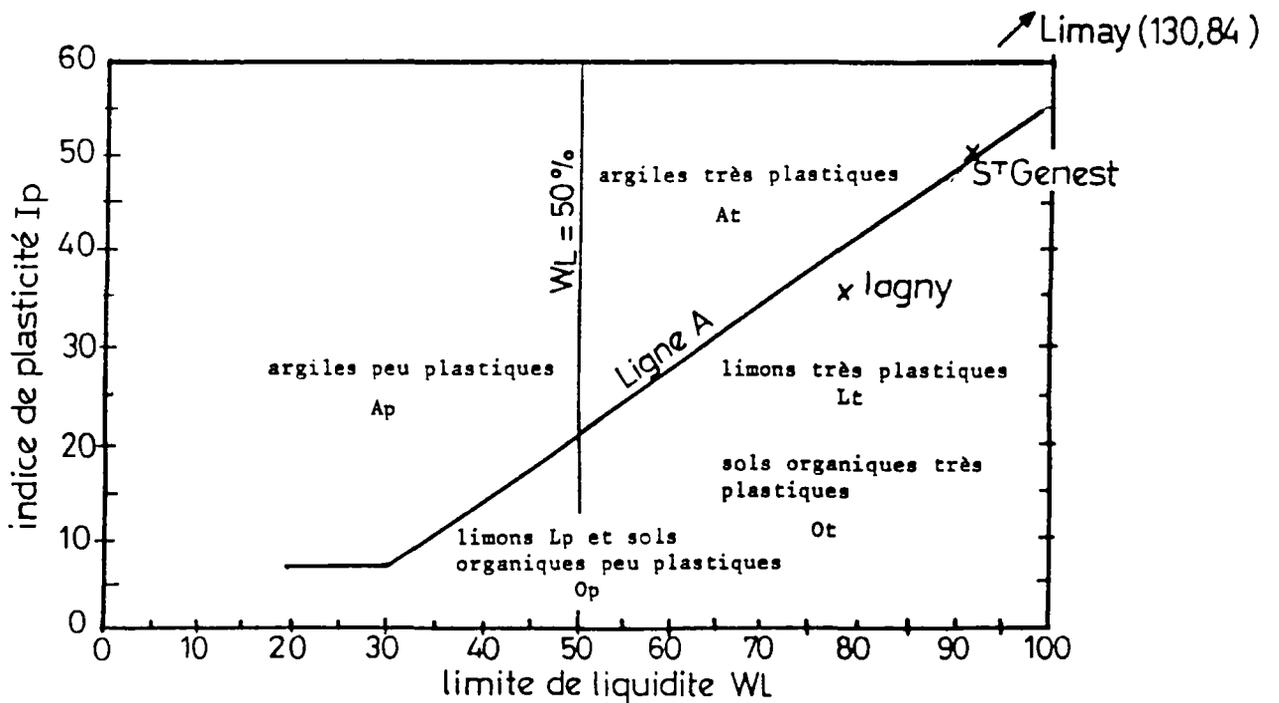


Figure 3.2 Classification de laboratoire des sols fins, diagramme de plasticité LCPC 1965

donc proportionnelle à la surface spécifique totale du sol (surface externe + surface interne des minéraux argileux).

La surface spécifique est très grande pour les argiles de type montmorillonite et vermiculite (plusieurs centaines de m^2/g) et relativement faible pour l'illite et la kaolinite (inférieur à $100 m^2/g$). Les minéraux non argileux courants ont des surfaces spécifiques négligeables devant celles des argiles.

Les fortes valeurs de bleu obtenues pour les argiles de LIMAY et de LAGNY sont attribuables aux smectites et aux interstratifiés. L'argile de ST GENEST présente une surface spécifique assez importante pour une kaolinite, due probablement à sa finesse.

5.2. Caractérisation mécanique

L'étude des caractéristiques mécaniques a été réalisée à partir d'essais oedométriques classiques qui permettent de déterminer les pressions de gonflement et de préconsolidation, le degré de surconsolidation ainsi que l'indice de compression d'un sol.

5.2.1. Modalité des essais oedométriques

Le mode opératoire adopté est celui mis au point par le L.C.P.C. (édité en 1970). Cependant quelques modifications ont été apportées.

Pendant la phase de saturation des éprouvettes, le système de goupille s'est révélé insuffisant pour empêcher le gonflement des argiles, c'est pourquoi nous avons appliqué des charges telles qu'il n'y ait pratiquement ni tassement ni gonflement.

Les essais ont été réalisés en un seul cycle de chargement par paliers. L'accroissement des charges est régulier. La durée des paliers fixée à 24 heures par le L.C.P.C., a parfois été modifiée afin qu'elle soit suffisante pour que la consolidation secondaire apparaisse. Le traitement des résultats simultanément au déroulement des essais a permis de faire varier la durée des paliers, de prendre en compte ce phénomène, et de le quantifier.

5.2.2. Résultats et interprétation des essais

A partir des courbes de tassement en fonction du logarithme du temps établies pour chaque charge, on détermine l'amplitude du tassement à la fin de la consolidation, et la durée de cette phase (t_{100}) ainsi que le coefficient de consolidation primaire c_v .

La méthode de TAYLOR qui repose sur les courbes de tassement en fonction de la racine du temps et qui est préconisée par le L.C.P.C. (MIEUSSENS et al. 1985) s'est révélée très imprécise pour la plupart des matériaux étudiés. En effet il n'a pas toujours été possible de linéariser correctement les courbes sur 60% de la consolidation. Cette méthode préférable pour de fortes valeurs de c_v ($c_v > 10^{-7}$ à $10^{-6} m^2/s$) ne peut être appliquée à nos échantillons dont le c_v varie autour de $5.10^{-8} m^2/s$ pour LAGNY et ST GENEST et $5.10^{-9} m^2/s$ pour LIMAY.

Les résultats des essais ont permis d'établir les courbes de compressibilité par paliers pour chaque argile. Ces courbes sont reproduites sur la figure 3.3. Leur interprétation permet de calculer les valeurs de la pression de gonflement, de la contrainte de préconsolidation σ'_c (suivant la construction de CASAGRANDE) et de l'indice de compression ($C_c = de/d(\lg(\sigma'))$) pour $\sigma' > \sigma'_{cmax}$).

Le degré de surconsolidation OCR de l'argile en place est défini par la valeur du quotient σ' / σ'_0 , σ'_0 étant la contrainte effective à laquelle est soumise l'argile en place. Pour les matériaux étudiés cette contrainte correspond au poids des terres susjacent. Les argiles de ST GENEST et LIMAY sont surconsolidés alors que celle de LAGNY est normalement consolidée.

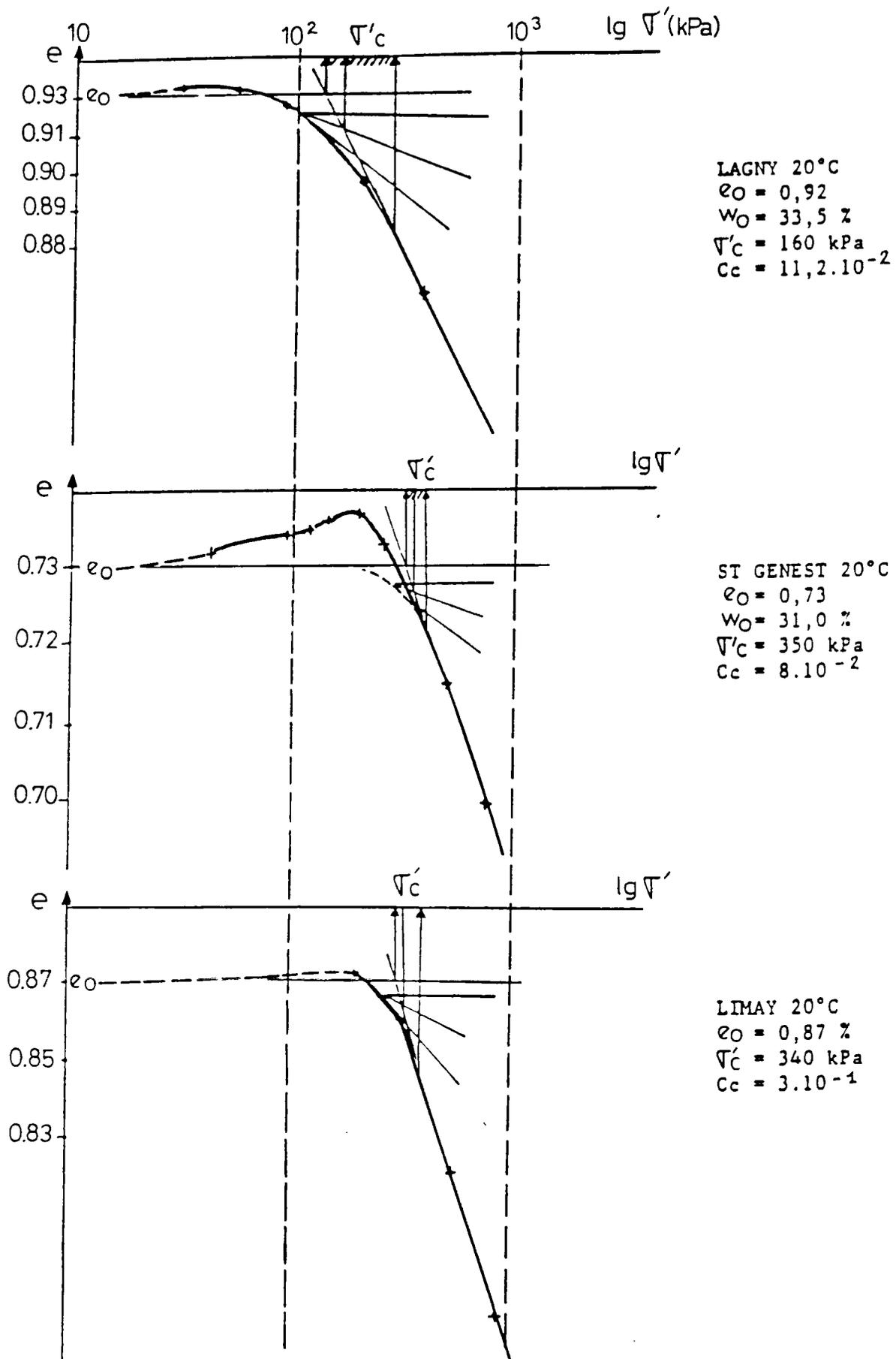


Figure 3.3 Courbe de consolidation en fonction de la contrainte effective à 20°C pour les argiles de LAGNY, SAINT-GENEST et LIMAY

6. PERMEABILITE

La perméabilité des argiles a été mesurée à la fin de chaque essai oedométrique, sous une contrainte effective d'environ 1 MPa, selon le principe du perméamètre à charge variable. Le perméamètre utilisé était à sa limite de précision, ceci explique la nature approximative de certains résultats qui ne peuvent être considérés que comme des ordres de grandeur des coefficients de perméabilité réels des matériaux étudiés.

On a donc refait des essais à la pression de préconsolidation σ_c' avec un autre dispositif à charge constante exposé plus loin et qui nous a donné les résultats suivants :

- LAGNY $\approx 1.10^{-11}$ m/s
- ST GENEST $\approx 1.10^{-11}$ m/s
- LIMAY $\approx 1.10^{-12}$ m/s

7. TEXTURE DES ARGILES A L'ETAT INITIAL

Un des buts de notre étude est de voir si le fluage entraîne une variation sensible de la texture. Pour cela, on étudie les textures initiales et finales (après essai oedométrique de fluage) des matériaux choisis.

On procède d'abord à une lyophilisation d'une partie de l'échantillon étudié pour éliminer l'eau interstitielle de façon à s'affranchir des tensions interfaciales dans les pores et par là même de conserver la texture intacte en évitant le phénomène de retrait. L'opération consiste à évacuer l'eau du matériau en passant de l'état liquide à l'état gazeux par l'intermédiaire de l'état solide (la glace). L'échantillon est donc au préalable congelé puis soumis au vide pour sublimer la glace. On étudie ensuite cet échantillon au porosimètre au mercure et au microscope électronique à balayage (M.E.B.).

- La **POROSIMETRIE AU MERCURE** permet de mesurer la distribution du volume poreux d'un matériau en fonction des rayons d'accès de pores.
- L'**OBSERVATION AU M.E.B.** permet de visualiser la texture d'un matériau et la répartition de la phase poreuse par rapport à la phase solide.

Les courbes de porosimétrie cumulées et dérivées sont données sur la figure 3.4. La texture initiale des argiles étudiées a été décrite par Vincent REBOUR (1988). Nous en reprenons ici les résultats.

7.1. Terminologie

Les termes utilisés pour décrire la texture des sols sont ceux proposés par GRABOWSKA-OLSZEWSKA et al. (1984).

Ces auteurs distinguent trois niveaux de constitution dans la structure des argiles:

- la **particule élémentaire** est la plus petite unité visible au M.E.B., elle se présente en général comme une plaquette de quelques dixièmes de micromètres de longueur et dont l'épaisseur est de quelques dizaines de nanomètres. Elle est stable vis à vis des interactions mécaniques et physico-chimiques;

- le **microagrégat** est un assemblage de particules élémentaires, il est stable en l'absence d'agent défloculant ou d'agitation physique;

- l'**agrégat**, constitué de microagrégats, est de forme variable; il est parfois difficile à observer au M.E.B. du fait de sa taille relativement grande.

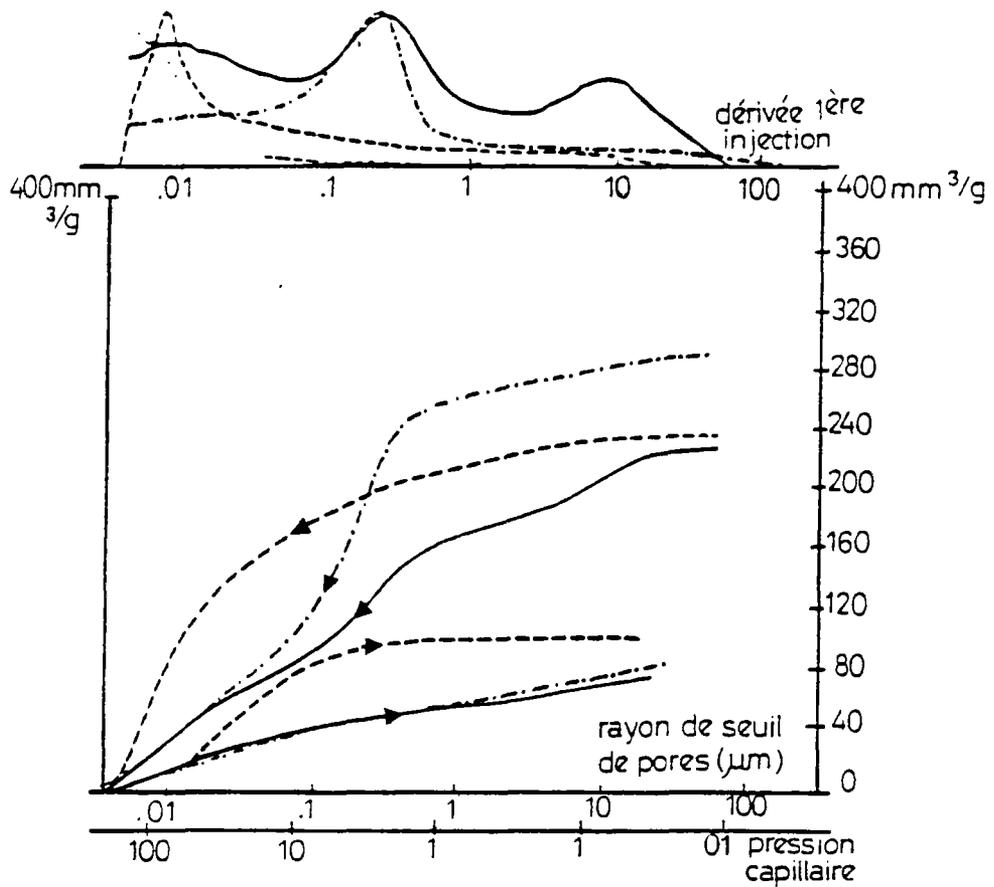


Figure 3.4 Courbes porosimétriques par injection de mercure pour les argiles à l'état intact de :

LAGNY (·····)
 SAINT-GENEST (- - - -)
 LIMAY (———)

modèles des principales textures des argiles sédimentaires:

- a- nid d'abeille
- b- en squelette
- c- matricielle
- d- turbulente
- e- laminaire

d'après SERGEEV et al (1978)

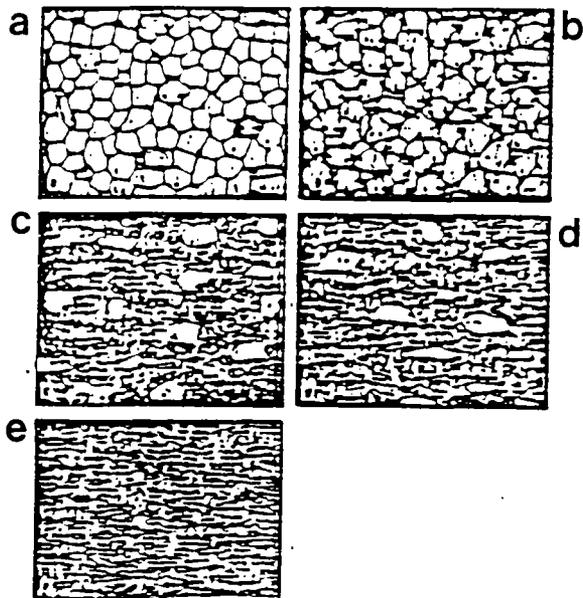


Figure 3.5 Modèles des principales textures des argiles sédimentaires

Les textures (prises au sens géologique du terme) des argiles sédimentaires s'apparentent à cinq types présentés sur la fig.3.5.

La porosimétrie au mercure permet de mesurer le volume poreux accessible par des pores de dimensions données (rayon d'accès ou de seuil)

La classification des classes de pores a été faite suite à l'observation au M.E.B. des quatre sols étudiés dans le but d'avoir des coupures identiques pour chacun. Ainsi on définit trois classes par rapport à la dimension de leur rayon moyen de seuil:

- ultraporosité: rayon moyen inférieur à 0,1 μm
- microporosité: " " compris entre 0,1 et 1 μm
- macroporosité: " " supérieur à 1 μm

Les résultats des courbes de porosimétrie cumulées et dérivées sont donnés dans le tableau suivant en utilisant comme coupures celles proposées ci-dessus :

Echant.	vol. poreux mm ³ /g	Volume ultraporosité			Volume microporosité			Volume macroporosité		
		r.m.	v.p.	v. %	r.m.	v.p.	v. %	r.m.	v.p.	v. %
LAGNY N	288,2	—	123	42,7	0,21	165	48,2	—	26,2	9,1
ST GENEST N	234,8	0,0070	180	76,7	—	35	14,9	—	19,8	8,4
ST GENEST G	330,2	0,0072	200	60,6	0,4	100	30,3	—	30,2	9,1
LIMAY N	225,7	0,0075	96	42,5	0,23	85	35,9	8	48,7	21,6

N : naturel ; G : gonflé
 r.m. : rayon d'accès le plus fréquent en μm
 v.p. : volume poreux (en mm³/g) de matériau lyophilisé
 v.% : pourcentage du volume poreux total

Tableau 3.4 : Résultats de la porosimétrie

7.2. Argile verte de LAGNY

Elle présente un aspect macroscopique homogène.

La microscopie met en évidence une texture peu compacte et désordonnée qui s'apparente aux types en nid d'abeille ou matriciel (photo.1, planche.1). Les microagrégats sont en forme de feuillets fins (épaisseur inférieure à 0,1 μm) d'étendue de l'ordre de quelques micromètres et fréquemment recourbés (caractéristique de l'illite); certains présentent un aspect enrubanné et flou caractéristique des smectites. Ces feuillets sont séparés par des pores bidimensionnels d'épaisseur inférieure au micromètre. Des pores plus trapus et irréguliers, dont l'ouverture est de plusieurs micromètres, séparent les agrégats. Ils sont parfois traversés par des ponts argileux, tels que ceux visibles sur la photo 2 de la planche.1.

La porosimétrie indique une microporosité relativement développée, 48,2 % du volume poreux injecté. La courbe dérivée met en évidence une famille de rayons d'accès dont le plus représenté est de 0,21 μm .

7.3. Argile de ST GENEST

7.3.1. A l'état intact

Elle présente un aspect macroscopique homogène.

En microscopie (photos 5-6 de la planche.2), sa texture apparaît relativement compacte, proche du type turbulent. L'observation de plans d'orientation différents met en évidence une anisotropie. Les dimensions des microagrégats sont difficiles à estimer et semblent pouvoir atteindre plusieurs dizaines de micromètres.

La porosité observable est bidimensionnelle, et se situe entre les microagrégats et les agrégats. L'épaisseur de ces pores est inférieure au micromètre.

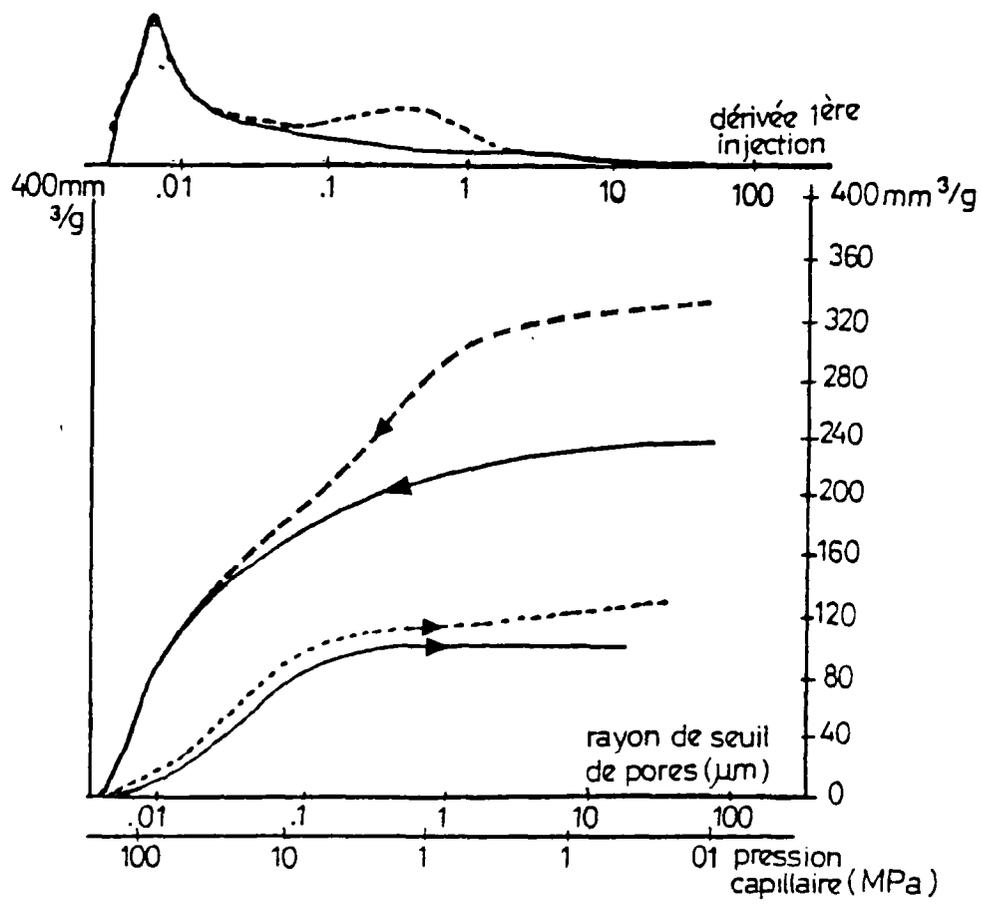


Figure 3.6 Courbes porosimétriques par injection de mercure pour l'argile de SAINT-GENEST
à l'état intact (———)
après gonflement libre (- - -)



10 μm

1



1 μm

2



10 μm

3



10 μm

4

Planche 1 Observations au MEB sur les argiles intactes de LAGNY (photos 1-2) et de LIMAY (photos 3-4)



10 μ m

Photo 5 - argile intacte -



10 μ m

Photo 6 - argile intacte



10 μ m

Photo 7 - argile après gonflement-

Planche 2 Observations au MEB de l'argile de SAINT-GENEST

La porosimétrie au mercure indique une porosité très fine. Le rayon de seuil le plus représenté est de $0.0075 \mu\text{m}$, et 77% de la porosité injectée correspond à l'ultraporosité. D'après la forme de la courbe cumulée, il est même probable qu'il existe de nombreux pores plus fins que ceux mesurés, mais qui ne sont pas accessibles par cette technique.

7.3.2. Après gonflement libre

Le gonflement fait évoluer la texture vers des agrégats nettement séparés par des pores bidimensionnels. La taille des agrégats diminue et l'épaisseur des pores augmente. L'observation au microscope (photo 7 de la planche.2) met en évidence des fissures séparant les agrégats qui sont relativement plus ouvertes que dans les échantillons intacts. L'épaisseur de ces pores est de quelques micromètres.

La porosimétrie au mercure (cf fig.3.6) indique l'existence d'une famille de pores vers $0,007 \mu\text{m}$, porosité intraagrégats ($<0,05 \mu\text{m}$), pour ST GENEST à l'état intact. En fin de gonflement cette famille n'a pas bougé, par contre une deuxième famille apparaît aux alentours de $0,4 \mu\text{m}$, porosité interagrégats ($>0,05 \mu\text{m}$), est responsable de l'augmentation de la porosité totale.

Ces constatations sont en accord avec les travaux de PARCEVAUX (1980).

7.4. Argile de LIMAY

Elle est bariolée, formée de lits irréguliers et souvent interrompus d'argiles de couleurs variées. Elle présente donc un aspect macroscopique hétérogène et anisotrope.

On observe au M.E.B. (photos.3-4 de la planche.1) une texture relativement moins compacte et moins ordonnée que celle de l'argile de ST GENEST, texture qui évoque le type turbulent. Son aspect est variable d'un échantillon à un autre ce qui traduit sans doute son hétérogénéité. Dans certaines zones on distingue des microagrégats qui sont probablement constitués essentiellement de kaolinite; l'aspect relativement flou d'autres zones et les structures enrubannées caractérisent des agrégats constitués de smectites et d'interstratifiés.

Deux familles de porosité sont visibles. La plus fine correspond à des pores bidimensionnels situés entre les microagrégats; leur épaisseur est de l'ordre de quelques dixièmes de micromètres. La plus large, également bidimensionnelle, a une ouverture moyenne de plusieurs micromètres et correspond sans doute à l'espace interagrégats ou inter zones homogènes.

Les résultats de la porosimétrie correspondent à ces observations, ils font apparaître trois familles de pores. Leurs rayons d'accès moyen se situent à 0.007 , 0.23 et $8 \mu\text{m}$. Les volumes poreux correspondent respectivement à 42, 36 et 21% du volume poreux total injecté.

Cette étude texturale met en évidence des différences relativement nettes entre les textures des matériaux étudiés, notamment au niveau de la distribution de la porosité.

8. CONCLUSION, SELECTION DES MATERIAUX

Des échantillons d'argile ont été prélevés sur 8 sites différents, ils ont été analysés et caractérisés. On a constaté que les huit matériaux qui ont été caractérisés, sont tous surconsolidés à des degrés différents. Les échantillons très surconsolidés ont été écartés, en espérant observer sur les autres, un phénomène de fluage plus important. Sur la base des premiers résultats, trois sites ont été sélectionnés, pour les raisons suivantes :

– l'argile de ST GENEST présente un pôle kaolinitique très pur et une granulométrie très fine. De plus son indice des vides et sa forte plasticité nous permettent a priori d'espérer observer un fluage notable;

- l'argile de LAGNY représente l'autre pôle minéralogique, illitique. Son indice des vides élevé et sa forte plasticité laissent présager encore une fois un fluage plus marqué que pour d'autres argiles de même composition minéralogique;
- L'argile plastique bariolée de LIMAY est quant à elle l'argile la plus plastique mais présente l'inconvénient d'une relative hétérogénéité.

Nous avons retenu pour effectuer les essais de thermofluage l'argile de ST GENEST à l'état intact et à l'état remanié par gonflement libre. L'intérêt de ce remaniement est double :

- Les éprouvettes taillées dans des blocs proches mais non identiques présentent des teneurs en eau et des indices des vides légèrement différents. Le gonflement, variant lui-même, atténue ces différences. Après une semaine de gonflement libre, on constate que les indices des vides sont proches et par conséquent les textures aussi. Cette identité des éprouvettes initiales permet de rendre compte plus exactement, sous charge constante, du rôle de la température, la variation de texture d'un échantillon à l'autre étant alors faible.
- Les essais sur un même sol intact et remanié permettent aussi d'estimer l'influence du remaniement sur le comportement du matériau.

Chapitre 4

DISPOSITIF EXPERIMENTAL ET CONDUITE DES ESSAIS



1. LA CELLULE OEDOMETRIQUE ET SON ENVIRONNEMENT

1.1. Introduction, principe de l'étude

La recherche entreprise a pour objet l'étude des effets à long terme de variations de température sur le volume et la texture de sols argileux en fonction, notamment, de leurs caractéristiques pétrographiques et pétrophysiques initiales et de leur état de consolidation. Cette étude repose d'un point de vue expérimental sur le suivi de la déformation volumique d'échantillons placés dans une cellule oedométrique et soumis à une charge constante, et à des sollicitations thermiques dans la gamme de température 20-110°C.

La cellule oedométrique permet d'appliquer une contrainte uniforme de direction axiale en interdisant tout déplacement perpendiculaire à cette contrainte. Elle ne permet donc pas de créer un champ de contraintes isotropes dans l'échantillon. Elle présente par contre l'avantage de permettre une mesure directe de la variation relative de volume de l'échantillon; cette dernière est égale à la variation relative de hauteur de l'échantillon. Cet essai semble bien approprié pour représenter le cas d'une couche située entre deux couches drainantes, se prolongeant à l'infini ou du moins à une distance grande devant son épaisseur.

Les exigences imposées par la durée des essais, leur thermostatisation par immersion dans un bain d'huile et la gamme de température retenue (20-110°C) nous ont conduits, après avoir rejeté la possibilité d'utiliser des cellules oedométriques commercialisées, à concevoir et mettre au point une cellule spécifique. Un prototype a donc été élaboré et testé au laboratoire, puis reproduit en seize exemplaires par la société R.O.P..

1.2. Spécificités de la cellule

Le prototype a donc été conçu au Centre de Géologie de l'Ingénieur par J.BILLIOTTE et D.LABERTHONNIERE: il s'agit d'une cellule oedométrique à contre pression de conception générale classique avec les aménagements particuliers suivants :

- la présence d'une MEMBRANE "BELLOFRAM" qui assure l'étanchéité au niveau du passage piston-cellule, permet au piston de coulisser sans frottement latéral;

- l'utilisation de l'INVAR, qui ne se dilate pratiquement pas avec la température, pour la fabrication des pièces en contact avec l'échantillon ou intervenant dans le dispositif de mesure; ceci pour s'affranchir au maximum de l'impact d'une variation de la température sur tout ce qui influence la mesure de la dimension du matériau argileux.

1.3. Description de l'oedomètre

Les principaux composants sont représentés sur les figures intitulées :

- CELLULE OEDOMETRIQUE (fig.4.1)
- VERIN POUR OEDOMETRE (fig.4.2)
- BATI DE PRESSE POUR OEDOMETRE (fig.4.3)

1.3.1. Description de la cellule oedométrique

Elle comprend :

- une embase (1) percée d'un orifice relié au circuit hydraulique;
- une bague (2) dans laquelle est maintenu l'échantillon de 24 mm d'épaisseur et de 70 mm de diamètre. Le drainage de celui-ci est assuré par deux pierres poreuses situées sur ses faces inférieure et supérieure. Un papier filtre est intercalé pour éviter la fuite des particules fines de l'échantillon vers les pierres poreuses;

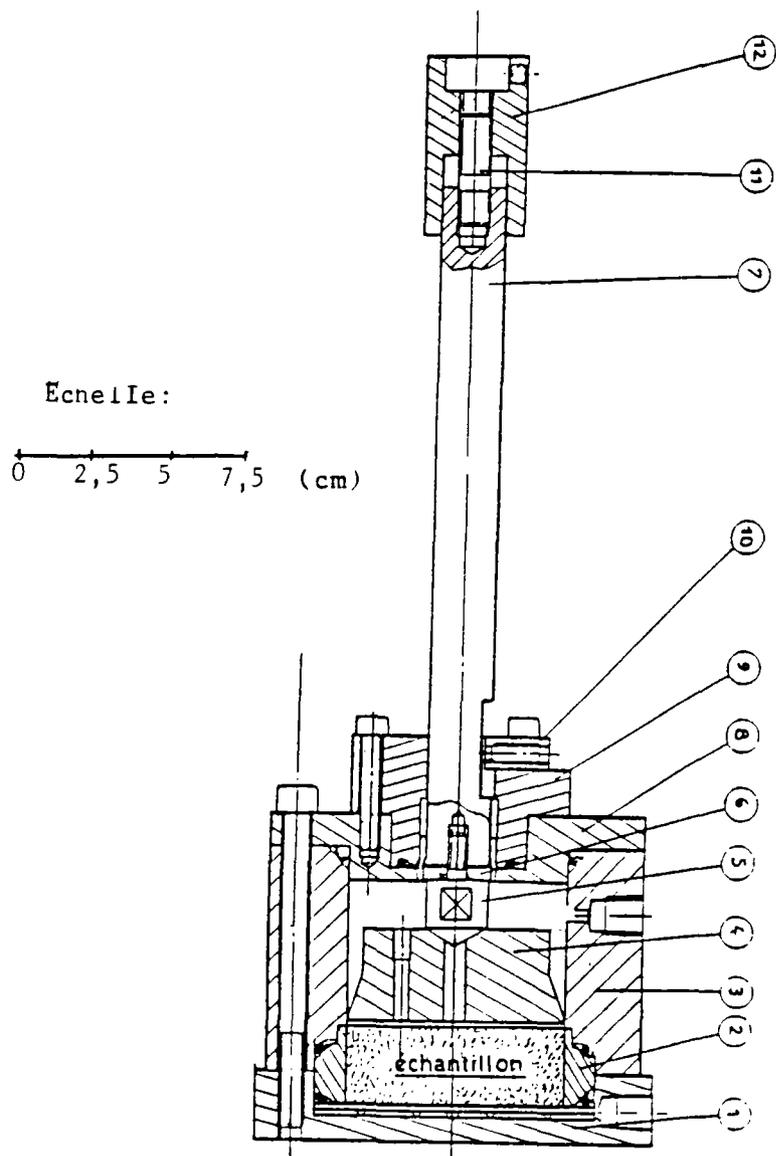


Figure 4.1 Plan de la cellule oedométrique

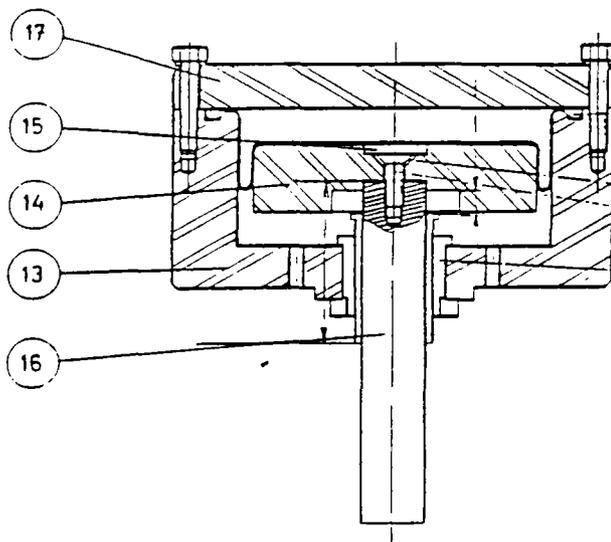


Figure 4.2 Plan du verin pour oedomètre

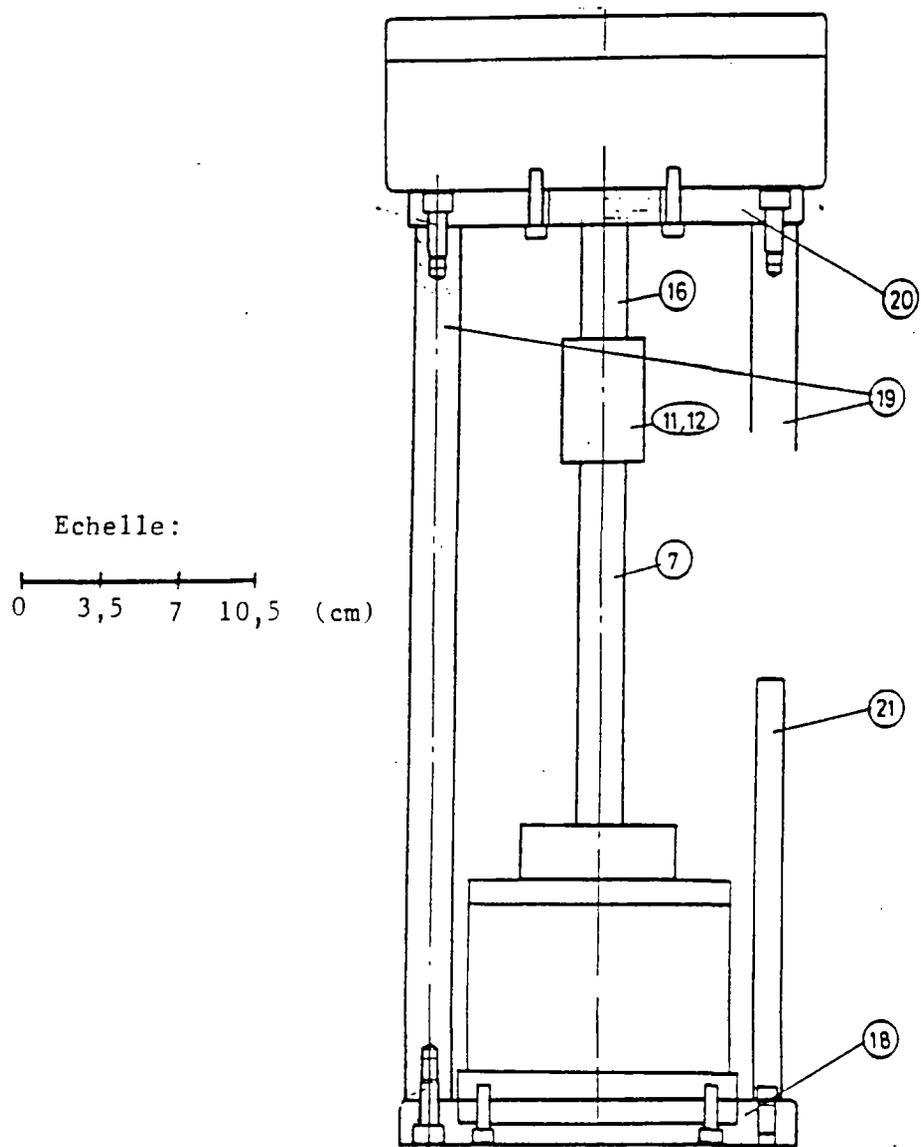


Figure 4.3 Plan du bâti de presse pour oedomètre

- une membrane "Bellofram" permettant de réaliser l'étanchéité au niveau du piston, pièces (5) et (7), entre l'eau sous pression à l'intérieur de la cellule et l'huile à l'extérieur constituant le bain thermostaté. Elle a pour but d'éliminer tout frottement latéral du piston;
- la contrainte est appliquée par l'intermédiaire d'un piston composé de deux parties principales: les pièces (7), (6) et (5) d'une part transmettent l'effort du vérin, qui est réparti ensuite de façon uniforme sur la section de l'éprouvette par la pièce (4); cette dernière est percée d'un orifice vertical pour assurer un bon drainage de l'eau;
- l'oedomètre se termine par un cylindre vertical (3) surmonté d'un couvercle (8). Le cylindre (3) est percé de deux orifices horizontaux destinés à assurer d'une part l'application d'une contre pression ou d'une différence de pression entre les deux faces de l'éprouvette en vue d'un essai de perméabilité, d'autre part une purge;
- la pièce (10) sert de butée au piston et limite son déplacement afin que celui-ci ne déchire pas la membrane.

1.3.2. Description du vérin de l'oedomètre

Le vérin transforme une pression d'air comprimée à l'entrée en une force qui s'applique sur le piston. Cette transformation se fait par l'intermédiaire d'une membrane "Bellofram", classe A. Une face de cette membrane est en contact avec l'air comprimé qui impose une pression. L'autre face s'applique sur une pièce métallique (14) solidaire du piston (16). La force transmise de la pièce (14) à la pièce (16) puis aux pièces (12), (7), (6), et enfin à la pièce (5) a été étalonnée à l'aide d'un anneau dynamométrique et s'exerce sur toute la surface de l'échantillon. La relation $P = F / S$ permet de calculer la contrainte théorique s'exerçant alors sur l'échantillon.

Les argiles retenues nécessitent pour les essais de fluage des pressions différentes, fonction de leur pression de consolidation. Pour cela, trois tailles de vérins correspondants à des diamètres différents de membranes "Bellofram" sont réalisées: Ø 65,95,135 mm

Le tableau 4.1 donne les pressions théoriques s'exerçant sur l'échantillon (en kPa) suivant la taille du vérin et pour différentes valeurs de la pression de l'air comprimé; le poids des deux pistons (4) et (7) a été pris en compte dans le calcul.

P air comprimé (kPa)	100	200	300	400
vérin ϕ 65	92	180	266	355
vérin ϕ 95	189	376	562	748
vérin ϕ 135	355	702	1049	1396

Tableau 4.1 : Contraintes théoriques (en kPa) exercées sur la face supérieure de l'échantillon.

1.3.3. Description du bâti de presse

Il est constitué d'un socle (18) fixé à l'oedomètre et d'une partie supérieure (20) fixée au vérin. Ces deux éléments sont solidarités par l'intermédiaire de deux colonnes (19). La partie (21) est constituée d'un cylindre fin sur lequel repose le comparateur. Ce dernier est fixé latéralement au piston dont il est solidaire.

1.3.4. Nature des matériaux

Les matériaux constitutifs de l'oedomètre doivent présenter une résistance suffisante à l'usage, notamment aux fortes températures et aux phénomènes d'usure, de corrosion ou d'oxydation. Deux types de matériaux ont donc été retenus: l'acier inoxydable et l'Invar.

— Comme le prouvent les essais de dilatation thermique effectués au dilatomètre sur l'Invar, une élévation de température entraîne une légère contraction de ce matériau en dessous de 100°C, et une légère dilatation au dessus de 100°C.

$$\begin{aligned} m_i &: \text{coefficient de dilatation linéaire entre } 20^\circ \text{ et } X^\circ\text{C} \\ \text{quand } X = 100^\circ\text{C} \quad m_i &= -0,8 \cdot 10^{-6} \text{ par } ^\circ\text{C} \\ \text{quand } X = 200^\circ\text{C} \quad m_i &= +0,7 \cdot 10^{-6} \text{ par } ^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Ce matériau sera employé pour les éléments plongés dans le bain thermostaté et intervenant dans la mesure du déplacement du piston ((2)-(4)-(7) sur la figure 4.1, (2)-(4) sur la figure 4.3).

— Les autres éléments du dispositif seront en acier inoxydable du type Z2CN 1810. Le coefficient de dilatation linéaire de cet acier, noté m_{ai} , est tabulé entre 20°C et X°C

$$\begin{aligned} \text{pour } X = 100^\circ\text{C} \quad m_{ai} &= 16 \cdot 10^{-6} \text{ par } ^\circ\text{C} \\ \text{pour } X = 200^\circ\text{C} \quad m_{ai} &= 17 \cdot 10^{-6} \text{ par } ^\circ\text{C} \end{aligned}$$

— Les pierres poreuses sont taillées dans des plaques de "PORAL inox C" de faible épaisseur. Ce matériau métallique poreux réalisé par frittage de poudre, contient très peu de carbone, ce qui lui assure une excellente résistance intercrystalline. Son coefficient de dilatation linéaire est de :

$$m_{pp} = 17,5 \cdot 10^{-6} \text{ par } ^\circ\text{C} \text{ entre } 20^\circ\text{C} \text{ et } 100 \text{ ou } 200^\circ\text{C}.$$

— Les jonctions entre différentes pièces seront étanchéifiées par des joints toriques, ou par du téflon pour les filetages.

1.4. Description de l'environnement de la cellule

Le schéma de principe du fonctionnement de la cellule et de son banc de mesure est présenté sur la figure 4.4.

La cellule est immergée dans un bain thermostaté. L'eau se vaporisant au dessus de 100°C, il a fallu utiliser un autre fluide restant liquide jusqu'à des températures au moins égales à 120°C. L'huile de silicone 47V20 a été retenue, après plusieurs essais sur différentes variétés d'huiles, en raison de sa fluidité, de son inertie chimique et de l'absence d'émissions désagréables (vapeurs, odeurs, etc). Afin d'éviter l'ébullition de l'eau de l'échantillon, une pression de 0,3 MPa est imposée à l'intérieur de la cellule, elle correspond à la pression de vapeur saturante pour une température proche de 140°C. Cette contre-pression sera appliquée en permanence par un contrôleur pneumatique de pression d'eau (cylindre air-eau) permettant de passer d'une pression d'air comprimé à une pression d'eau.

Un contrôleur pression-volume GDS MARK III 200 cc/2000 kPa permet d'une part de contrôler la saturation de l'échantillon si nécessaire, et d'autre part d'effectuer des mesures du coefficient de perméabilité (essais à charge constante). Il peut créer dans l'échantillon un gradient hydraulique par application d'une légère surpression de l'eau sur la face inférieure de l'échantillon et par conséquent un écoulement de l'eau ascendant vers la face supérieure.

Un comparateur de déplacement électronique ID-M 543-411 MITUTOYO, solidaire du piston, repose sur une pièce fixe en Invar (fig.4.3, pièce (21)). Il mesure l'évolution dans le temps de la distance entre deux points: un point fixe (pièce (21), fig.4.3) qu'on assimilera

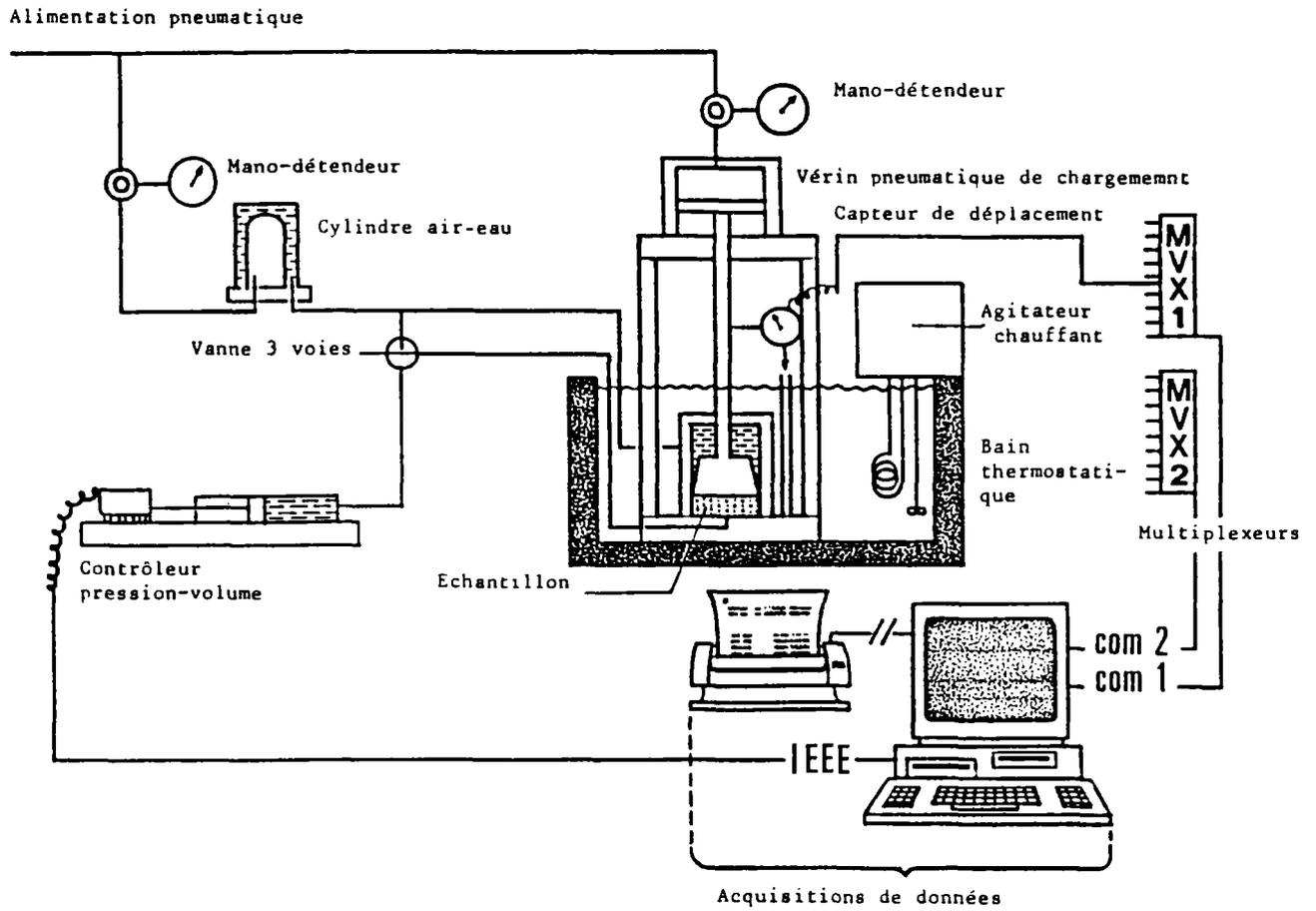


Figure 4.4 Schéma de principe du banc de mesure

après corrections à la surface inférieure de l'échantillon, et un point mobile (pièce (7), fig.4.1) que l'on assimilera après corrections à la surface supérieure de l'échantillon. Ce capteur est sensible à des déplacements de 1 micromètre. Le capteur est relié à un ordinateur AMSTRAD PC 1512DD, ce qui permet l'enregistrement automatique des déplacements et la gestion des données. Il en résulte :

- une meilleure concomitance des mesures temps/tassement;
- une multiplication des mesures en début d'essai;
- la possibilité de mesures en continu, notamment pendant les absences (nuit, week-end, etc).

Une arrivée d'air comprimé équipée d'un manodétendeur débite une pression déterminée variant de 0 à 0,4 MPa.

1.5. Essais de qualification

Plusieurs tests ont été effectués avant de commencer l'exécution des essais pour qualifier le système.

1.5.1. Etanchéité de la cellule

L'étanchéité a été assurée d'une façon générale par la mise en place de films de Téflon autour des raccords hydrauliques, de joints toriques en nitrile aux jonctions de différentes pièces et de la membrane Bellofram. Malgré la présence de cette dernière, il a été constaté l'apparition de gouttes d'eau autour du piston. Cette fuite de la cellule a été mesurée par l'appareil GDS en maintenant une pression constante dans la cellule pour différentes températures échelonnées de 20 à 110°C. Pour une température donnée, le débit de fuite est constant. Il est localisé autour du piston et semble dû à une mauvaise étanchéité au niveau de la membrane. Différents procédés ont été testés pour la serrer mais le serrage se faisant à température ambiante, on constate malgré tout une fuite dès 50°C. Il semble donc que la température joue un rôle prépondérant en créant des dilatations qui annihilent partiellement le serrage des différents éléments.

Nous avons constaté aussi que, si la fuite est faible à 110°C, environ 10 mm³/heure, une descente en température rapide accentue cette fuite car la membrane, contrairement aux métaux, ne revient pas aussi rapidement à son état initial. Ce phénomène ne se produit pas si le refroidissement est lent.

D'autre part le caoutchouc et le textile des premières membranes que nous avons utilisées ont été fortement attaqués par l'huile silicone et ce d'autant plus que la température était élevée. Cela a conduit dans certains cas au déchirement de la membrane. Pour pallier ce défaut, la société "Le Joint Français" nous a fourni de nouvelles membranes de composition différente.

L'étanchéité s'avère être la partie la plus critique de la cellule pour la réalisation d'essais à long terme.

1.5.2. Influence de la température sur le système de mesure

Il s'agit de quantifier les effets de la température sur les diverses parties du système expérimental et sur les grandeurs mesurées par les capteurs afin de corriger les mesures effectuées.

On désignera par :

h : la hauteur de l'échantillon

e_{pp} : l'épaisseur des pierres poreuses

dh_{ech} : la variation de hauteur de l'échantillon (>0 si diminution de hauteur)

- $dh_{\text{capt,th}}$: la variation de hauteur donnée par le capteur sans tenir compte de la dérive du capteur et de la partie émergée du dispositif avec la température
- $dh_{\text{capt,exp}}$: la variation de hauteur donnée par le capteur, lorsque l'échantillon est remplacé par un cylindre de métal de dilatation connue (ici l'Invar)

1) Dilatation des pièces intervenant dans le déplacement du comparateur

Le système de chargement et les pierres poreuses d'une part, le support fixe (21) utilisé pour la mesure du déplacement d'autre part, se dilatent différemment et induisent une déformation parasite dh_1 , fonction de la température, qu'il convient d'évaluer.

La fig.4.5 indique en grisé les pièces en Invar.

Le capteur de déplacement enregistre la variation de distance entre le support du capteur et le sommet du repère "fixe".

Lors d'une variation de température dT , le capteur doit indiquer un tassement théorique, notée $dh_{\text{capt,th}}$ (>0 pour un tassement), qui prend en compte le tassement de l'échantillon et la dilatation différentielle des deux chaînes de mesure indiquées sur la figure 4.5, (1) pour le "capteur" et (2) pour le piston.

— Entre les plans D et E, on néglige la différence de déformation de ces deux "chaînes" car on suppose qu'elles restent à une température constante ambiante. En fait, elles chauffent également dans une mesure plus faible et la différence de déformation résultante sera intégrée dans une correction ultérieure.

— Entre les plans B et D les "chaînes" (1) et (2) se dilatent de la même façon.

— Entre les plans A et B, les dilatations de la chaîne (1), dl_1 , et de la chaîne (2), dl_2 , s'écrivent:

$$\begin{aligned} dl_1 &= m_i \cdot (h + 2 e_{pp}) \cdot dT \\ dl_2 &= (- dh_{\text{éch}}) + 2 m_{pp} e_{pp} dT \end{aligned}$$

On impose au capteur d'afficher une variation positive quand l'échantillon tasse de façon à avoir une concordance immédiate entre la valeur lue sur le capteur et le tassement de l'échantillon pour une température constante. Le capteur indique par conséquent la valeur suivante :

$$\begin{aligned} dh_{\text{capt,th}} &= dl_1 - dl_2 \\ dh_{\text{capt,th}} &= dh_{\text{éch}} - [2 (m_{pp} - m_i) e_{pp} - m_i h] \cdot dT \end{aligned}$$

Il apparaît un facteur de correction, $C1$, entre $dh_{\text{éch}}$ et $dh_{\text{capt,th}}$ dû à la dilatation différentielle des pièces immergées dans le bain :

$$dh_{\text{éch}} = dh_{\text{capt,th}} + C1 \quad [16]$$

$$\text{avec } C1 = 2 (m_{pp} - m_i) e_{pp} dT - m_i h dT$$

2) Sensibilité du capteur à la température

Lorsque la température du bain thermostaté augmente, le capteur bien qu'en partie isolé s'échauffe légèrement.

Un cylindre métallique en Invar de hauteur h_1 connue ($h_1=3\text{cm}$), dont la dilatation linéaire m_i est elle aussi connue, remplace l'échantillon dans la cellule oedométrique. On mesure expérimentalement le déplacement du capteur, noté $dh_{\text{capt,exp}}$ pour différents incréments de température.

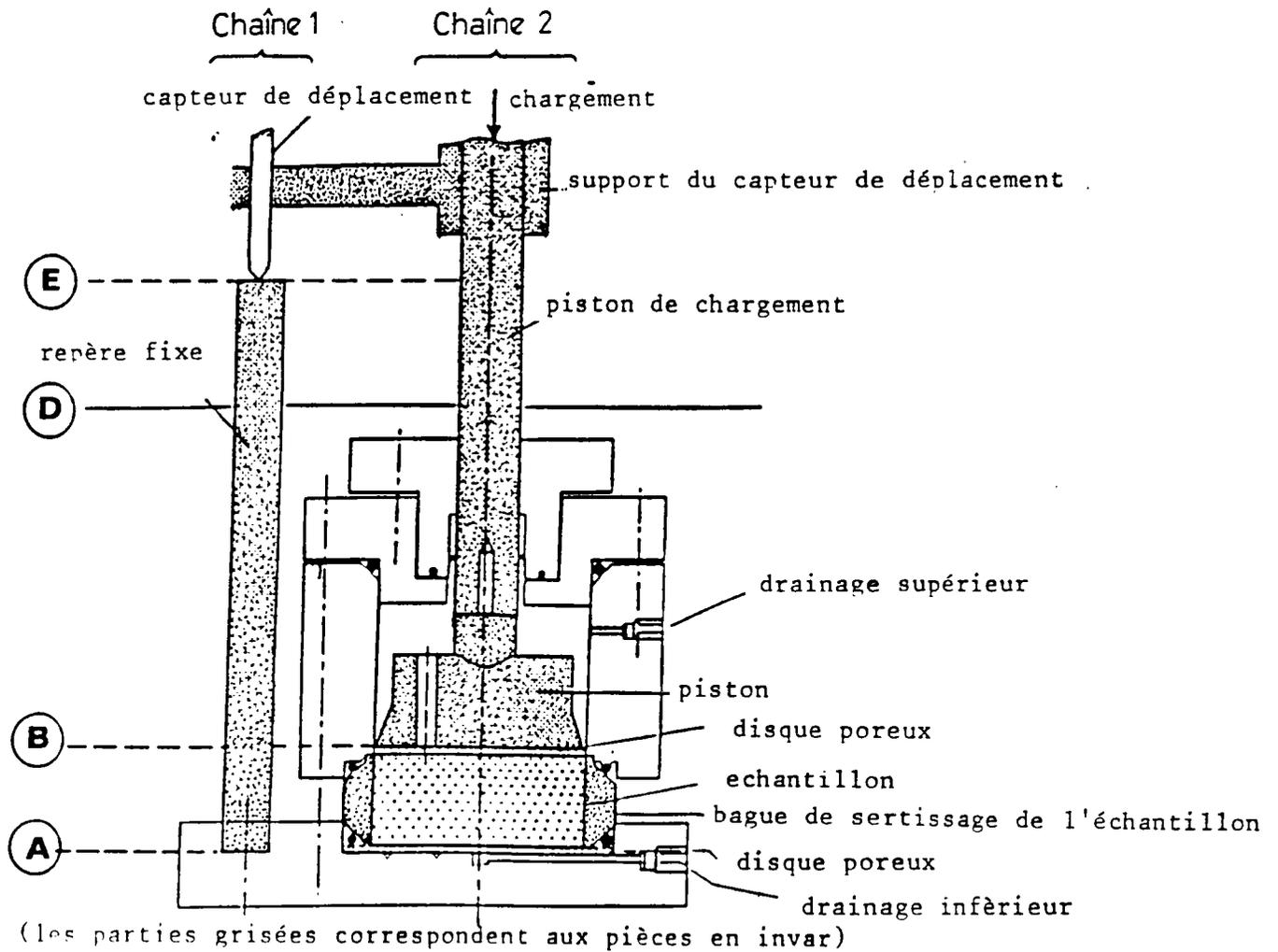


Figure 4.5 Schéma de principe de la cellule oedométrique

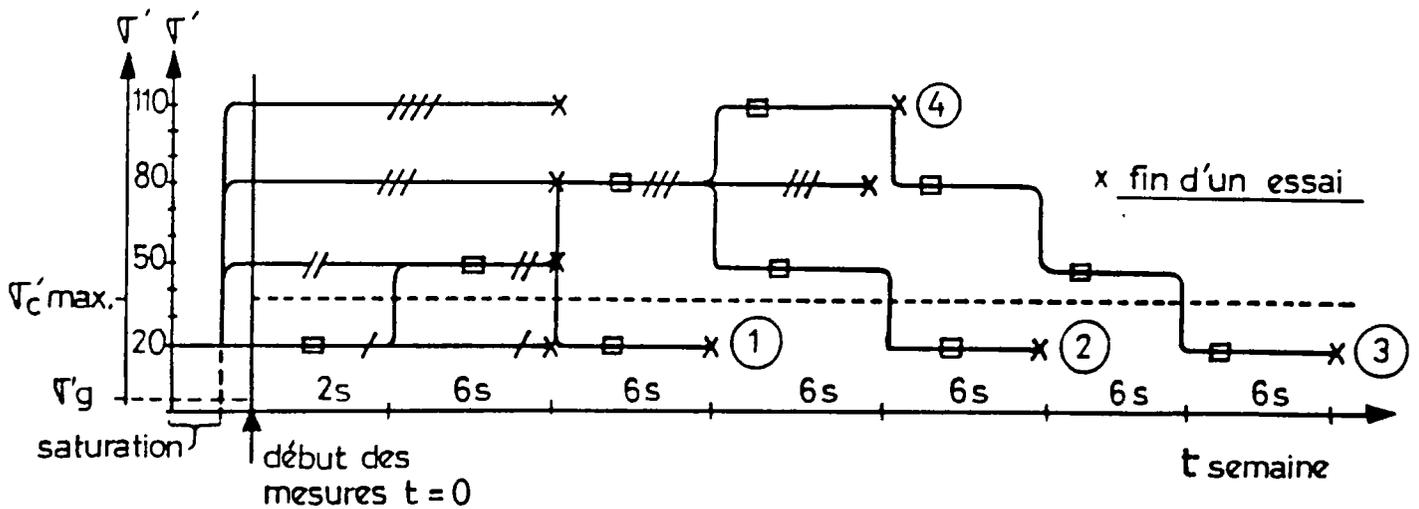


Figure 4.6 Schéma du programme initial des sollicitations thermiques

Remarque : Les symboles permettent de suivre un même essai.

/, //, /// : Sont des chargements respectivement à 20°, 50°, 80° et 110°C

□ : Sont des chargements ayant subi un "cycle" de température

1/ 20-50-20 noté "20-50-20"

2/ 20-50-80-50-20 noté "20-80-20"

3/ 20-50-80-110-80-50-20 noté "20-110-20"

4/ 20-50-80-110 noté "20-110"

– Dans ces conditions et en reprenant l'équation [16]:

$$(dh_{éch}) = - m_i h_i dT$$

et

$$(dh_{capt,th}) = - 2 (m_{pp}-m_i) e_{pp} dT - m_i (h - h_i) dT$$

[$m_i (h-h_i) dT$] est négligeable devant [$2 (m_{pp}-m_i) e_{pp} dT$]

Or on observe que la valeur obtenue expérimentalement pour ce test, $dh_{capt,exp}$, n'est pas égale à la valeur prévue théoriquement, $dh_{capt,th}$ bien que tenant compte de la première correction C1. Ce phénomène doit essentiellement être dû à la réaction du capteur avec la température du bain que nous n'avons pas pris en compte précédemment. Il faut par conséquent appliquer une correction C2 aux valeurs expérimentales:

$$dh_{capt,th} = dh_{capt,exp} + C2 \quad [17]$$

– La correction C2 est calculée et tabulée pour différentes montées de température par les valeurs expérimentales obtenues lors du test au cours duquel l'échantillon est remplacé par un cylindre d'Invar.:

$$C2 = dh_{(exp)cyl.inv.} - 2 (m_{pp} - m_i) e_{pp} dT$$

$$dh_{(exp)cyl.inv.} : dh_{capt,exp} \text{ pour le test indiqué}$$

3) Conclusion

En définitive, la valeur expérimentale donnée par le capteur doit subir deux corrections pour donner la valeur exacte du tassement de l'échantillon :

$$dh_{éch} = dh_{exp} + C1 + C2 \quad [18]$$

$$\text{avec } C1 + C2 = dh_{(exp)cyl.inv.} - m_i h dT$$

Le tableau 4.2 donne les valeurs des corrections C1 et C2 à apporter aux mesures expérimentales.

Passage de T1 à T2 (en °C)	20 à 50	50 à 80	80 à 110	110 à 80	80 à 50	50 à 20
$dh_{(exp)cyl.inv.} \cdot \frac{m_i}{m_i} \cdot h \cdot dT$ (μm)	+ 2	0	- 1	+ 14	+ 12	+ 9
$C1$ (μm)	0,6	0,6	0,2	- 0,2	- 0,6	- 0,6
$C1 + C2$ (μm)	- 2	0	+ 1	- 14	- 12	- 9

Tableau 4.2 : Corrections à apporter aux valeurs données par le capteur pour avoir directement le $dh_{éch}$

Sur le plan expérimental, la mesure de la variation de volume du matériau lors des sauts de température doit être faite avec beaucoup de précautions :

- les corrections mises en évidence ci-dessus seront appliquées aux résultats expérimentaux du capteur afin d'éliminer les artéfacts liés à la température et provenant du système de mesure lui-même. Leur prise en compte est surtout nécessaire pendant les premières heures qui suivent une variation de température. Au-delà, elles pourraient être négligées au niveau de l'exploitation des résultats.
- les valeurs de $dh_{(exp)cyl.inv.}$ écrites dans le tableau 4.2 ne sont en fait que des moyennes de plusieurs tests identiques. Dans le cas de la montée de 20 à 50°C, les résultats sont assez dispersés entre (-11) et (+10) μm , ceci est sans doute lié à la

présence de l'épaisseur de la membrane synthétique dans la chaîne de mesure, qui a été négligée.

1.6. Mesures du chargement

Les vérins pour oedomètre ont été étalonnés en faisant des essais de chargement sur un capteur de force (un anneau dilatométrique). Les courbes (pression d'air appliquée (P_{air}) / contrainte sur l'échantillon (σ_0)) tracées pour chacun des vérins, en tenant compte du poids du piston qui s'ajoute à la force exercée par le vérin, sont données en annexe pour une cellule vide.

Dans le cas d'une cellule contenant de l'eau sous pression à 3 bars, il faut effectuer une correction C3 calculée en annexe. Ainsi, à une pression d'air donnée (P_{air}) correspond une contrainte effective sur l'échantillon égale à $(\sigma_0 - 20)$ en kPa.

1.7. Montée en température de l'échantillon

L'objectif est de mesurer le temps de montée en température à l'intérieur de l'éprouvette (notée t_0) ainsi que l'allure de cette évolution thermique en fonction du temps. La valeur t_0 peut être utile lors de l'exploitation des résultats des essais de fluage pour des montées en température progressives (courbe tassement-logarithme du temps). Elle est aussi à prendre en considération dans l'interprétation de l'allure du début de la courbe de déformation volumique suite à un incrément de température.

Un thermocouple (fer-constantan) est placé dans un échantillon d'argile. Les deux fils qui le constituent passent dans un orifice percé dans la pierre poreuse de la face inférieure de l'éprouvette. Ils sortent de la cellule par l'orifice creusé dans le socle, puis sont introduits dans un tube jusqu'à émerger du bain thermostaté. Ils sont reliés aux bornes d'un voltmètre. La différence de potentiel enregistrée est directement convertie en température grâce aux tables "Reference table for thermocouple". La courbe temps-température est alors tracée.

Le temps t_0 mesuré avec le prototype des cellules est d'une heure pour une montée de 20°C, et de deux heures et demi pour une montée de 40°C (les courbes sont reproduites en annexe). On a utilisé par la suite, en première approximation, un temps de deux heures pour une augmentation de 30°C de la température.

1.8. Conclusion

Nous disposons, pour l'étude de l'influence de la température sur la déformation volumique à long terme des sols argileux, d'une cellule oedométrique et d'un banc de mesure adaptés aux caractéristiques des essais à mettre en oeuvre.

2. DEROULEMENT DES TRAVAUX EXPERIMENTAUX

Les expériences concernent trois sols intacts, et un sol remanié qui est obtenu par gonflement d'un des matériaux intacts. Nous étudions de cette manière l'influence du remaniement sur le fluage. Les essais sont réalisés suivant des modalités proches de celles de l'essai oedométrique.

2.1. Principe des essais

L'essai consiste à mesurer au cours du temps la variation de hauteur, directement liée à la variation de volume, de l'échantillon soumis à une contrainte σ' et à la température T ou soumis à une sollicitation thermique dT à la contrainte σ' .

2.2. Mode opératoire

Après mise en place dans la cellule oedométrique, les échantillons de 70 mm de diamètre et de 24 mm de hauteur sont amenés à saturation pendant 48 heures minimum (48 heures pour LAGNY et ST GENEST, et 72 heures pour LIMAY). Ces échantillons prélevés à proximité de la nappe ont un degré de saturation très proche de 1 (cf tableau 3.3). Une pression faible est appliquée dès le départ pour assurer le contact échantillon-piston. Elle est augmentée, si un gonflement apparaît, par paliers progressifs de façon à éviter également un tassement dû à une trop forte charge initiale. Cette pression est appelée pression d'antigonflement et notée σ'_g . Une contre pression de 0,3 MPa est appliquée dès le départ pour éviter une vaporisation de l'eau quand la température des échantillons est portée à 110°C.

Dans le cas des échantillons remaniés de l'argile de ST GENEST, le remaniement se fait par gonflement de l'argile qui se développe librement pendant la phase de saturation et au delà (une semaine) sous une pression faible d'environ 5 kPa, nécessaire pour assurer un contact fiable entre le piston et l'échantillon. On constate qu'au bout d'une semaine plus de 96 % du gonflement total théorique prévisible (cf travaux de DAKSHANAMURTHY D. et VAYSSADE B. 1978 décrits au paragraphe 5.2.1.) est atteint.

A l'issue de la phase de saturation, à 20°C pour les essais avec des paliers, et à environ 25°C (température ambiante du laboratoire= T_{eau}) pour les essais de montée en température directe, on mesure une première perméabilité (durée de l'essai de 24 heures à 72 heures suivant la nature de l'argile. L'argile de ST GENEST étant homogène, l'essai est d'environ un jour et pour l'argile de LIMAY qui est hétérogène, la durée est de trois jours).

On applique ensuite sur l'échantillon la température initiale de l'essai concerné (20, 50, 80 ou 110°C: température de l'eau à la fin de l'équilibrage thermique), et on mesure le tassement correspondant. L'équilibre thermique étant atteint au bout d'un jour, on mesure alors une deuxième perméabilité (durée 24 à 72 heures).

Enfin l'échantillon est chargé à une pression constante, correspondant à la limite supérieure de la pression de préconsolidation déterminée lors des essais oedométriques à 20°C, et qui est reportée dans le tableau 4.3:

argile	σ' (kPa)
LAGNY	270
ST GENEST	400
LIMAY	520

Tableau 4.3 : Pressions de consolidation appliquées aux échantillons

Par la suite des sollicitations thermiques correspondant aux quatre températures suivantes - 20, 50, 80 ou 110°C - peuvent être appliquées à l'échantillon.

Il est procédé à une acquisition en continu de la valeur du tassement dh au cours du temps.

En cours d'essai, des mesures de perméabilité sont effectuées pour étudier l'évolution de ce coefficient avec le fluage. Les premiers essais ayant montré que les mesures de perméabilité en fin de consolidation primaire entraînaient des perturbations sur la courbe de fluage, un délai de 2 ou 3 jours après la mise sous charge ou en température a, par la suite, été respecté.

La perméabilité de l'échantillon est aussi mesurée en fin d'essai et à la fin de chaque palier de température.

L'essai de perméabilité s'effectue au moyen d'un perméamètre à charge constante. La face supérieure de l'échantillon reste à 0,3 MPa alors qu'une pression légèrement supérieure, allant de 0,32 à 0,37 MPa, est appliquée sur la face inférieure de l'échantillon par

l'intermédiaire d'un contrôleur pression-volume GDS, correspondant à un gradient de 80 à 280. Un courant ascendant se crée dans l'éprouvette, courant dont le débit est mesuré par le GDS.

En fin d'essai, les cellules sont démontées et des morceaux d'éprouvettes sont lyophilisés. Cette opération est nécessaire pour une conservation de la texture afin d'effectuer une étude par porosimétrie au mercure et une observation au M.E.B. sur les échantillons à l'état final.

2.3. Planning des essais

2.3.1. Programme initial

Différents types de montée en température avaient été programmés (cf fig.4.6) :

- a) montée en température directe à 20, 50, 80 et 110°C avec étude du fluage à moyen terme sur trois mois environ;
- b) montée en température directe à 80°C avec étude du fluage à long terme sur neuf mois environ;
- c) montée en température progressive de 20 à 110°C par paliers de 30°C et pour chaque palier, étude du fluage à moyen terme sur deux mois environ;
- d) montée en température progressive puis descente progressive entre 20 et 50°C, entre 20 et 80°C et entre 20 et 110°C avec des paliers de 30°C et pour chaque palier, étude du fluage à moyen terme sur deux mois environ.

Cette gamme d'essais privilégie l'exploration des paramètres de sollicitation thermique et fluage.

Au cours de chaque essai des mesures de perméabilité ont été effectuées.

2.3.2. Adaptation du programme

.1. Réduction dans le temps des paliers de température:

L'examen des premières courbes de fluage en fonction du logarithme du temps sur des essais d'une durée de 2 à 3 mois, a permis de constater qu'un ajustement satisfaisant à une droite est obtenu dès 6 semaines. Nous avons en conséquence réduit la durée des paliers de montée ou descente en température de 8 à 6 semaines, les caractéristiques de la droite qui peuvent être ainsi déterminées n'étant pas modifiées de façon significative entre 6 et 8 semaines.

.2. Lancement de nouveaux essais :

Au cours de la réalisation de ces essais, nous avons été confrontés à certaines difficultés, telles qu'une surchauffe anormale des éprouvettes, surchauffe due aux appareils de thermostatisation qui ont vieilli prématurément du fait de leur fonctionnement ininterrompu pendant plusieurs mois dans un milieu ambiant mal ventilé.

Les essais touchés par ce phénomène présentent un tassement important (jusqu'à quatre fois le tassement enregistré depuis le début de l'essai). Quinze jours après remise en température, un tassement résiduel persiste (de une à trois fois le tassement enregistré avant la surchauffe) malgré le gonflement qui a suivi l'arrêt de la surchauffe. Cette perturbation influe sur les caractéristiques de la courbe aux paliers de température appliqués par la suite.

Les cycles 20-110-20°C ont tous été perturbés en fin de palier à 110°C pour les argiles de LAGNY, ST GENEST.N, LIMAY et en début de palier à 80°C pour celle de ST GENEST.G.

La descente en température sur ces essais n'étant pas interprétable dans de bonnes conditions, il a été nécessaire de lancer de nouveaux essais pour mettre en évidence le

comportement des différentes argiles lors d'un refroidissement progressif. Pour cela nous avons décidé d'effectuer sur chaque type d'argile un essai qui se décompose de la façon suivante :

- une saturation à 20°C;
- une consolidation sous charge à 20°C sur une durée minimale d'une semaine, de manière à observer le fluage et déterminer la droite d'ajustement de la courbe (dh-lg(t));
- une montée à 50, 80 puis 110°C avec pour chacune de ces températures un palier d'une semaine permettant de déterminer approximativement la droite de fluage;
- une descente à 80, 50 puis 20°C avec des paliers de quatre semaines.

.3. Essais de montée en température à des vitesses variables :

Par ailleurs, nous avons constaté sur les premiers résultats que lors d'une montée rapide en température une variation volumique importante appelée "tassement thermique primaire" se produit dans les heures qui suivent et que ce tassement est bien supérieur au tassement dû au fluage au cours de six semaines suivantes. Il débute par un gonflement dû à des surpressions interstitielles (cf chap.2 paragraphe 2) dans l'échantillon, qui sont la conséquence de la dilatation de l'eau interstitielle générée par le choc thermique.

Pour mieux comprendre ce qui se passe pendant ce laps de temps allant de quelques heures (ST GENEST, LAGNY) à un jour (LIMAY), nous avons effectué des essais avec des vitesses de montée en température beaucoup plus lentes pour analyser l'influence de celle-ci sur le "tassement thermique primaire" et le fluage. Nous avons ainsi étudié sur LIMAY et sur ST GENEST.N cinq types de montée en température de 20° à 80°C, suivant 5 protocoles :

- (1) une montée directe,
- (2) une montée progressive par paliers de 5°C toutes les heures,
- (3) une montée progressive par paliers de 10°C tous les jours,
- (4) une montée directe de 20 à 50°C, puis une montée directe de 50 à 80°C six semaines plus tard,
- (5) une montée progressive de 20 à 50°C par palier de 5°C toutes les heures, puis une semaine plus tard une deuxième montée progressive analogue de 50 à 80°C.

.4. Essais de compressibilité à différentes températures :

Des essais oedométriques à 50 et 110°C ont été réalisés sur les trois types d'argiles, les essais à 20°C ayant été effectués pour la caractérisation mécanique des sols (cf paragraphe 5 chap.3). Ils nous ont permis de tester l'influence de la température sur la consolidation et la compressibilité de ces sols, et de conclure sur le rôle de la minéralogie.

3. CONCLUSION

— L'originalité de la cellule mise au point au C.G.I. réside en son adaptation pour tenir à 110°C pendant plusieurs semaines. Elle a pour cela été testée pendant 15 jours à 130°C. Ses spécificités sont :

- l'utilisation de l'Invar pour toutes les pièces intervenant dans la mesure du "tassement";
- l'utilisation d'une membrane "Bellofram" pour assurer l'étanchéité au niveau du piston tout en limitant le frottement latéral de celui-ci.

16 cellules ont ainsi été construites pour effectuer les essais.

— Un programme d'une cinquantaine d'essais, d'une durée de deux semaines à plus de six mois a pour but de faire varier différents paramètres de façon à évaluer le rôle :

- de la minéralogie et de la texture du matériau à son état de consolidation,
- de l'incrément de température,
- de la vitesse de montée en température,
- de la durée d'un palier de température,
- d'un cycle de température.

Chapitre 5

LES RESULTATS

Nous avons analysé dans ce chapitre les résultats de tous les essais effectués.

On distingue plusieurs séries d'essais :

- les **essais de compressibilité par paliers à température constante de 20, 50 ou 110°C**;
- les **essais de consolidation à température constante de 20, 50, 80 ou 110°C**; ces deux séries ont pour but de suivre l'évolution des paramètres caractéristiques de la consolidation mécanique suivant la température du milieu.
- les **essais de montée rapide en température de 20 à 50, 80 ou 110°C**. L'objectif est d'étudier le rôle joué par l'incrément de température;
- les **essais de montée de 20 à 80°C à des vitesses différentes**. Le but est de mettre en évidence le rôle joué par la vitesse;
- les **montées et/ou descentes progressives par paliers de 30°C**. L'intérêt est de connaître le caractère réversible ou non d'une sollicitation thermique et de distinguer l'influence de la température finale appliquée pour des essais ayant subi un même incrément de température.

Une dernière partie, sur la texture et son évolution suite aux sollicitations thermiques appliquées, s'appuie sur les nombreux essais de perméabilité réalisés ainsi que les courbes de porosimétrie au mercure tracées pour les échantillons en début et en fin d'essai.

1. ESSAIS OEDOMETRIQUES A 20-50-110°C

Des essais oedométriques à 20°C ont été effectués sur chaque type d'argile pour déterminer leurs caractéristiques mécaniques et leur état de consolidation. Par la suite, les essais sous sollicitation thermique s'effectuant à la pression de préconsolidation pour chacun des matériaux étudiés, il a paru nécessaire d'étudier l'évolution potentielle des caractéristiques mécaniques en fonction de la température. Ainsi des essais de compressibilité supplémentaires ont été effectués à 50 et 110°C (cf figure 5.1).

Les paramètres mesurés ont été :

- dh_0 : la déformation lors de la mise en température
- pour chaque niveau de chargement σ' :
 - t_{100} : le temps de fin de consolidation primaire (en s)
 - C_c : l'indice de compression = $de/dlg(\sigma')$
 - C_α : le taux de compression = $(dh/h_0)/dlg(t)$

Le but est d'estimer l'influence de la température et de l'incrément de température sur C_c , C_α , t_{100} et dh_0 ainsi que la variation de C_α avec σ' .

1.1. LAGNY

– L'échantillon étant saturé à la pression d'antigonflement pendant 48 heures, on élève sa température :

- après un jour à 50°C, on observe un gonflement de 23 micromètres pour un OCR de 1,8;
- après un jour à 110°C, on observe un tassement de 41 micromètres pour un OCR d'environ 2,2.

Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus par BALDI (cf paragraphe 4.2 chapitre 2) indiquant pour un échantillon de OCR moyen à élevé (OCR≈2), un gonflement à

faible température (50°C) et un tassement à forte température (110°C). Toutefois ces déformations (dh/h₀) restent faibles de (-0,09 %) à 50°C à (+0,07 %) à 110°C.

- Les résultats des trois essais à 20, 50 et 110°C sont reportés sur la figure 5.2. On constate que les C_c ont des valeurs très proches variant dans une plage de 10%. Si on mesure C_c/(1+e₀) on observe une augmentation continue de ce rapport: entre 20 et 110°C elle est de 16%.

T oedo. (°C)	20	50	110
w %	33,5	30,6	30,2
C _c (x10 ⁻²)	11,2	11,2	12,4
C _c / (1+e ₀) (x10 ⁻²)	5,83	6,13	6,79

Tableau 5.1 : Evolution de l'indice de compression en fonction de la température pour LAGNY.

1.2. ST GENEST

- Les pressions d'antigonflement augmentent quand la teneur en eau initiale diminue, ce qui va dans le sens des conclusions de PARCEVEAUX (1980) indiquant qu'il existe une relation linéaire décroissante entre le logarithme de la pression de gonflement Ps et la teneur en eau w :

$$\log Ps = - a w + b$$

- A la pression d'antigonflement, on chauffe l'échantillon pour atteindre la température de l'essai et on note après un jour :

- à 50°C, un tassement de 2 micromètres,
- à 110°C, un tassement de 154 micromètres.

On retrouve ici les résultats de BALDI pour un échantillon moyennement à faiblement surconsolidé (OCR entre 2 et 1,5) soit une augmentation du tassement avec la température.

- Le temps de fin de consolidation primaire t₁₀₀ diminue avec la température. Pour σ' entre 200 et 1300 kPa, t₁₀₀ varie entre :

- 5 000 et 14 000 s à 27°C,
- 3 700 et 5 000 s à 50°C,
- 600 et 2 400 s à 110°C.

Pour des incréments de pression égaux, on note dans le tableau suivant les résultats sur les t₁₀₀.

dσ' (kPa)	(t ₁₀₀) 27° / (t ₁₀₀) 50°	(t ₁₀₀) 27° / (t ₁₀₀) 110	(t ₁₀₀) 50° / (t ₁₀₀) 110
150	1,6	3,7	2,3
220	1,2	3,2	2,6

Ces rapports, toujours supérieurs à 1, indiquent bien une accélération de la consolidation avec la température. Ces valeurs sont à rapprocher du rapport de la viscosité de l'eau aux mêmes températures :

- μ₂₇ ° / μ₅₀ ° = 1,6
- μ₂₇ ° / μ₁₁₀ ° = 3,4
- μ₅₀ ° / μ₁₁₀ ° = 2,2

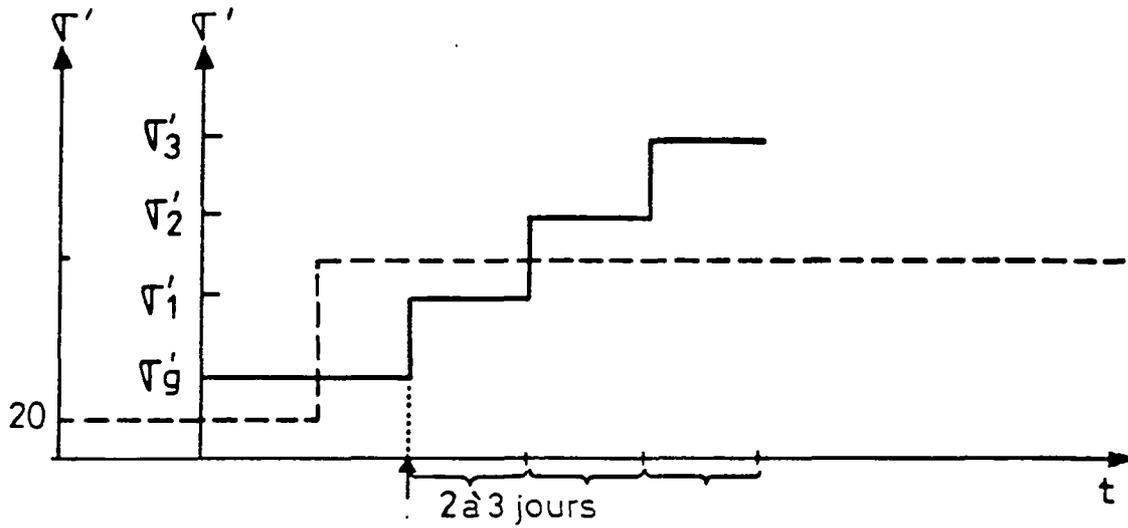


Figure 5.1 Schéma de principe des essais oedométriques à T1 (50° ou 110°C)

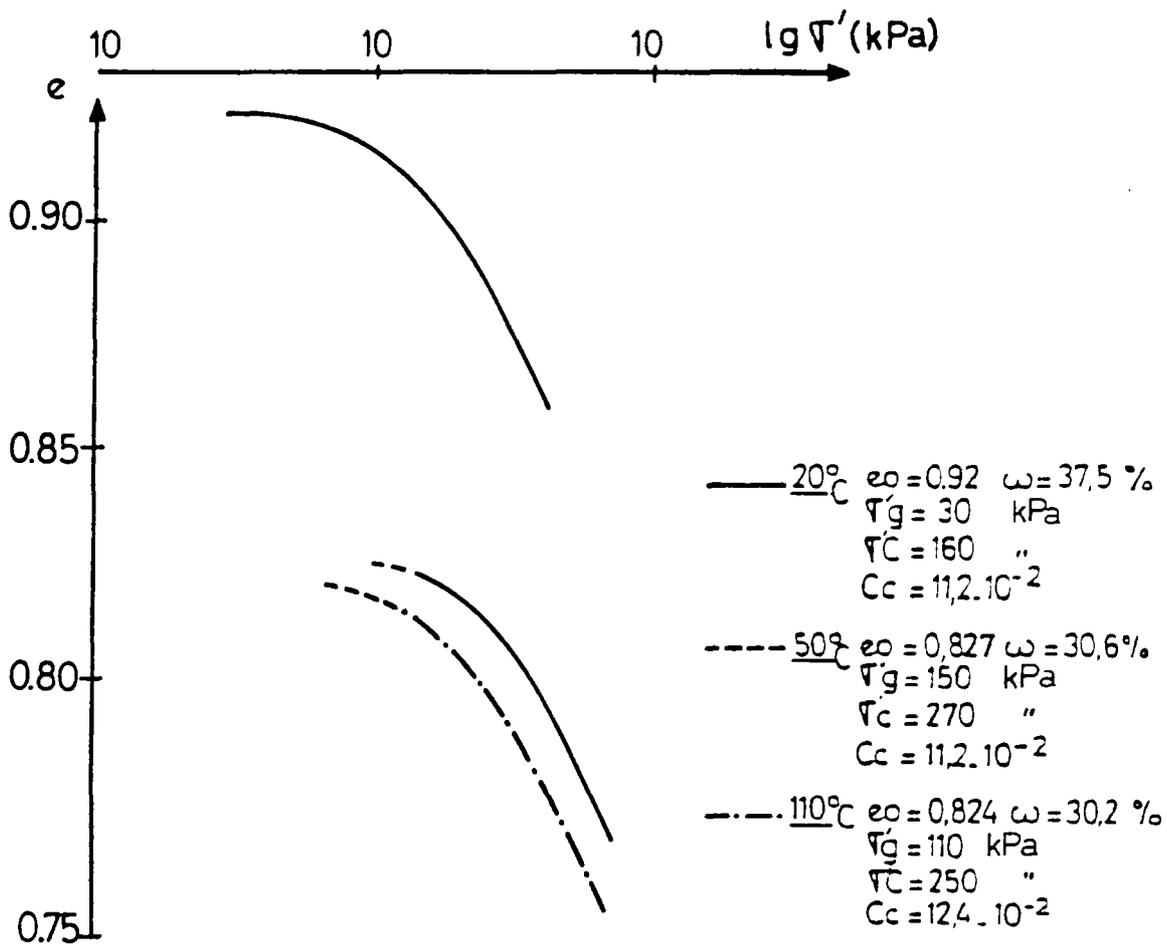


Figure 5.2 Courbes oedométriques de LAGNY à 20 , 50 et 110°C

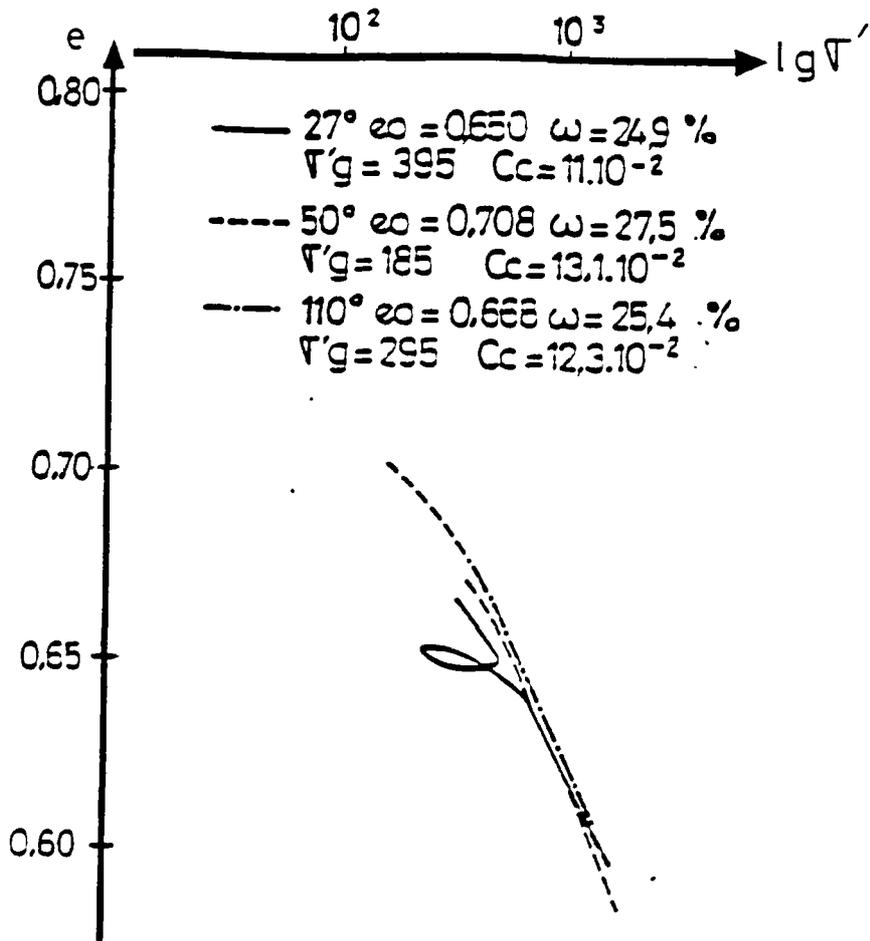


Figure 5.3 Courbes oedométriques de SAINT-GENEST à 27 , 50 et 110°C

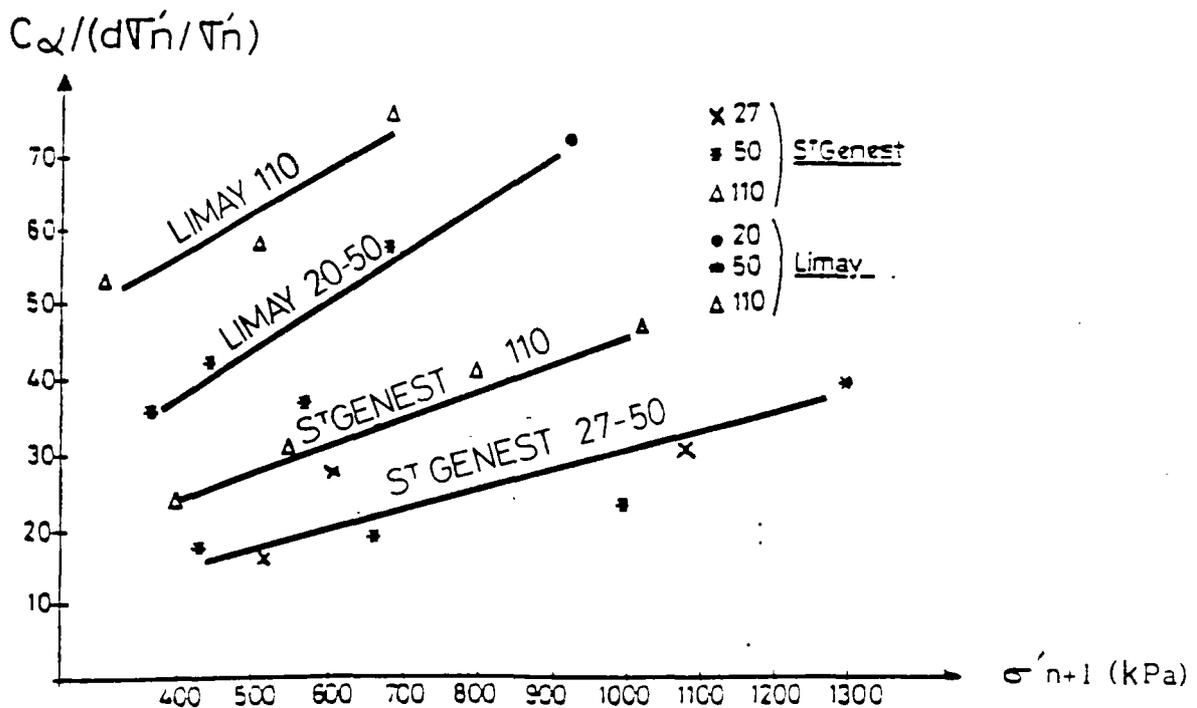


Figure 5.4 Evolution du taux de compression secondaire "réduit" $C_\alpha / (d\sigma'_n / \sigma'_n)$ avec la pression appliquée σ'_{n+1} pour SAINT-GENEST et LIMAY

On en conclut que la viscosité de l'eau est le paramètre essentiel qui régit la dissipation des pressions interstitielles par drainage de l'eau. La dispersion des résultats est due à des conditions initiales différentes de pression d'antigonflement et de teneur en eau (w_i entre 24 et 27%).

- Les courbes oedométriques à 27, 50 et 110°C sont rassemblées sur la figure 5.3. On observe des pentes similaires dont les valeurs sont données dans le tableau suivant.

T (°C) oedo.	27	50	110
w (%)	24,9	27,5	25,4
C_c ($\times 10^{-2}$)	11	13,1	12,3
$C_c / (1+e_0)$ ($\times 10^{-2}$)	6,66	7,67	7,37

Tableau 5.2 : Evolution de l'indice de compression en fonction de la température pour ST GENEST

C_c augmente entre 27 et 110°C de 12 % pour des teneurs en eau proches ($w_i \approx 25$ %). A 50°C C_c est plus élevé mais la teneur en eau initiale est aussi plus élevée ($w_i = 27,5$ %). Si on ramène ces pentes à l'indice des vides initial, on observe une augmentation de $C_c / (1+e_0)$ entre 27 et 110°C de 10,7%, donc de l'ordre de grandeur de la dispersion des résultats pour des essais analogues répétés sur un échantillon (cf PHILIPPONNAT 1977). On ne peut donc conclure du rôle joué par la température sur la valeur de C_c , si ce n'est qu'il n'est pas primordial.

- C_α ne montre pas de comportement particulier quand σ' augmente, par contre si on divise par le pourcentage d'augmentation de la contrainte σ' soit $d\sigma'_n / \sigma'_n$, ce nouveau taux de compression secondaire "réduit" présente une allure particulière quand on le représente en fonction de la contrainte appliquée σ_{n+1} (cf figure 5.4). On constate une augmentation de $C_\alpha / (d\sigma'_n / \sigma'_n)$ d'une part avec la contrainte appliquée et ceci quelque soit la température, d'autre part avec la température et plus particulièrement entre 50 et 110°C pour une même pression. Ces résultats montrent que C_α dépend tout d'abord du taux d'augmentation de la contrainte et ensuite de la contrainte appliquée et de la température. Entre 20 et 50°C, $C_\alpha / (d\sigma'_n / \sigma'_n)$ ne présente pas de variation notable.

T (°C)	σ'_{n+1} (kPa)	$d\sigma'_n$ (kPa)	C_α ($\times 10^{-4}$)	$C_\alpha / (d\sigma'_n / \sigma'_n)$
27	495	100	4,16	16,6
	625	130	7,87	30,2
	800	175	-	-
	1050	250	9,62	31
	1270	220	7,59	36
50	285	100	7,2	-
	435	150	8,83	16,9
	660	225	9,79	18,8
	998	338	11,60	22,7
	1300	302	11,75	39
110	400	105	8,64	24
	550	150	11,58	31
	800	250	18,74	41
	1025	225	13,06	46
	1280	255	-	-

- : pas de mesure possible sur les courbes

Tableau 5.3 : Evolution du fluage avec la température et la pression appliquée σ'_{n+1}

1.3. LIMAY

- Après trois jours de saturation à 20°C à des pressions d'antigonflement analogues, sur des éprouvettes de teneurs en eau similaires ($\approx 28,5$ %), on chauffe ces dernières à :

- 50°C, ce qui conduit à un tassement de 22 micromètres,

- 110°C, ce qui conduit à un tassement de 196 micromètres.

On retrouve encore le résultat général d'une augmentation de la déformation avec la température, cette déformation est un tassement à 50 et 110°C pour un échantillon moyennement à faiblement surconsolidé (OCR entre 1 et 2).

– Les t_{100} sont des fonctions décroissantes de T :

- à 20°C, il est supérieur à 35 000 s;
- à 50°C, il varie entre 25 000 et 36 000 s;
- à 110°C, il varie entre 16 000 et 25 000 s.

Il y a bien une accélération de la consolidation primaire avec la température. Le tableau suivant reproduit quelques résultats de deux essais à 50 et 110°C, très proches par leur teneur en eau initiale et les paliers de pression appliquée.

σ' (kPa)	645	870	1210
$(t_{100})_{50^\circ} / (t_{100})_{110^\circ}$	2	2,1	2

Ces valeurs sont à rapprocher du rapport des viscosités μ_{50} / μ_{110} qui est de 2,2.

– Les courbes oedométriques sont reproduites sur la figure 5.5. Les résultats sur les pentes sont données dans le tableau suivant.

T oedo. (°C)	27	50	110
w (%)	28,6	28,4	28,4
C_c ($\times 10^{-2}$)	16,7	16,8	17,8
$C_c / (1+e_0)$ ($\times 10^{-2}$)	9,34	9,58	10,09

Tableau 5.4 : Evolution de l'indice de compression en fonction de la température pour LIMAY

On note que C_c augmente de 7 % entre 27 et 110°C, $C_c / (1+e_0)$ augmente lui de 8% entre ces deux températures.

– Les courbes $C_\alpha / (d\sigma'_n / \sigma'_n)$ en fonction de la pression appliquée σ'_n ou σ'_{n+1} pour LIMAY et ST GENEST ont la même allure à 50 et 110°C. On peut donc faire les mêmes conclusions. De plus les points représentatifs de LIMAY sont au dessus de ceux de ST GENEST, ce qui nous permet de dire que le fluage est plus important pour LIMAY.

T (°C)	σ'_{n+1} (kPa)	$d\sigma'_n$ (kPa)	C_α ($\times 10^{-4}$)	$C_\alpha / (d\sigma'_n / \sigma'_n)$
20	675	100	-	-
	800	125	-	-
	925	125	2,6	71,7
	1100	175	-	-
50	370	55	6,06	35,6
	450	80	8,80	41,9
	570	120	10,10	37,0
	685	115	11,43	57,0
110	310	80	10,08	53
	390	120	-	-
	510	120	18,22	58
	690	180	26,48	75

- : pas de mesure possible sur les courbes

Tableau 5.5 : Evolution du fluage avec la température et la pression appliquée σ'_{n+1}

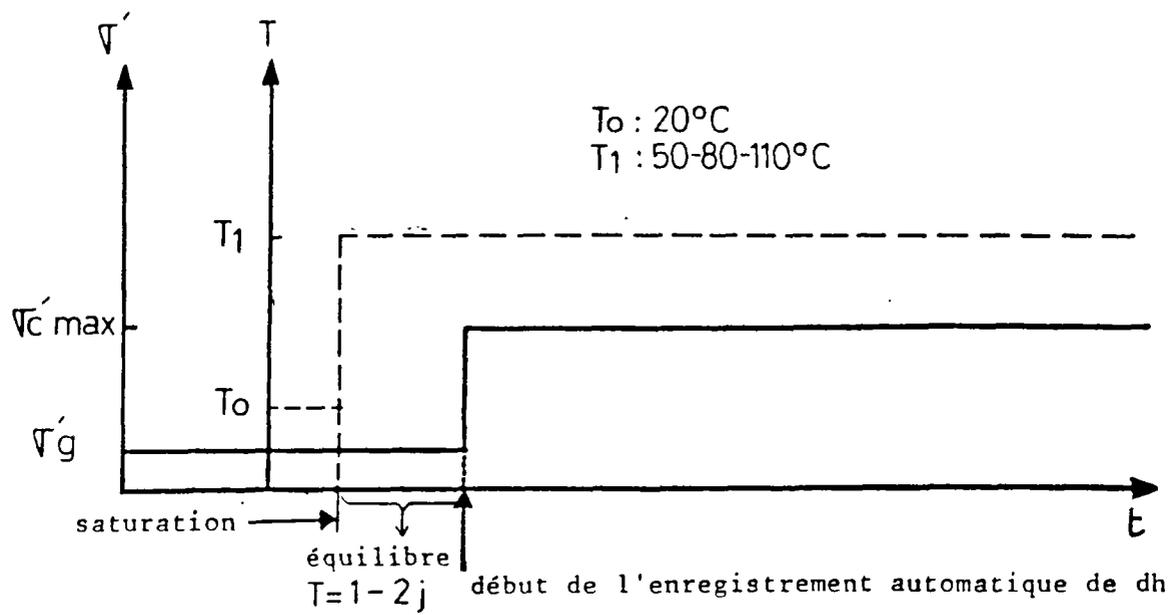


Figure 5.6 Schéma de principe des essais de consolidation à 50°, 80° ou 110°C

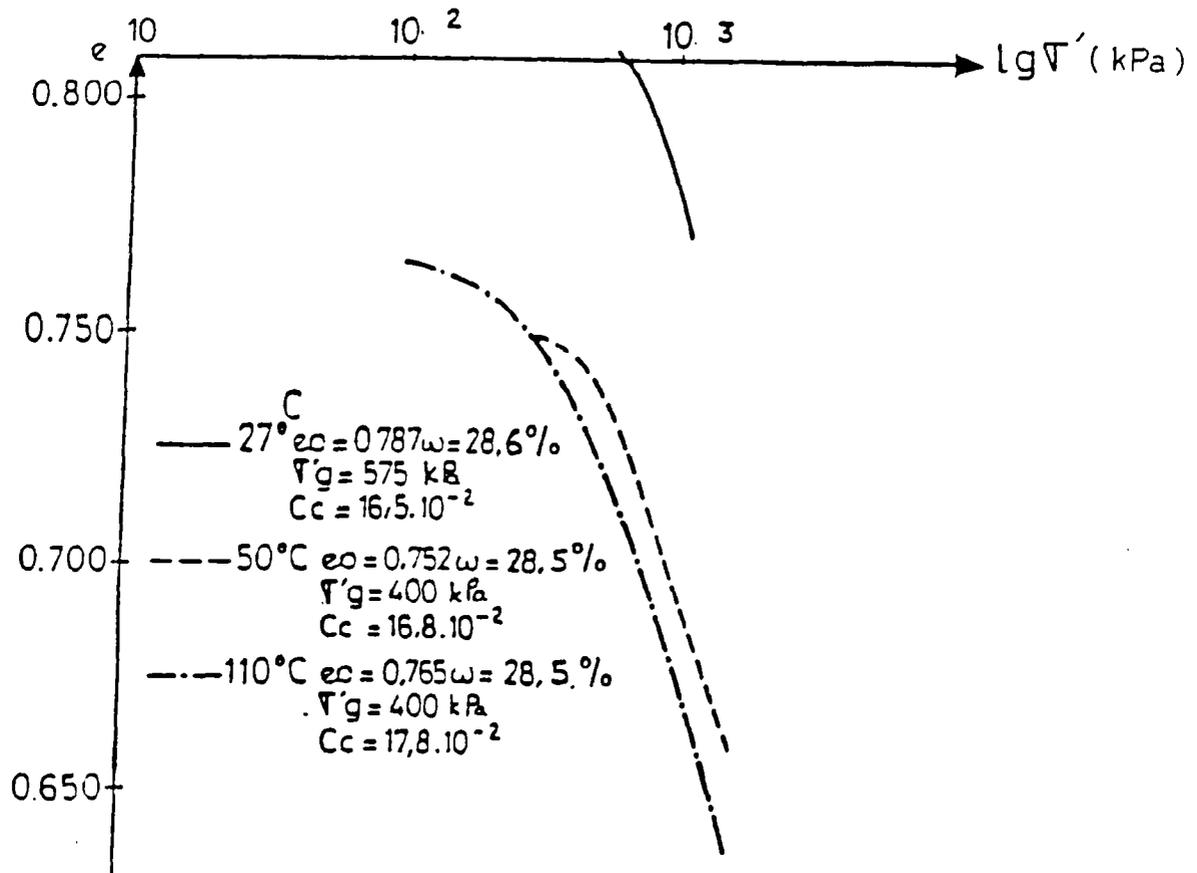


Figure 5.5 Courbes oedométriques de LIMAY à 20 , 50 et 110°C

1.4. Conclusion

La conclusion de cette première partie sur le rôle de la température est :

1) une accélération de la consolidation primaire due essentiellement à la diminution de la viscosité de l'eau interstitielle, ce qui avait déjà été observé par de nombreux auteurs.

2) une tendance à l'augmentation de la compressibilité (environ 10% entre 27 et 110°C).

3) une accélération de la compression secondaire à 110°C par rapport à 20 ou 50°C mais ce taux de compression secondaire dépend en parallèle et de façon croissante de l'incrément de pression appliqué. Il varie aussi suivant la nature et l'état du matériau. L'étude de la compression secondaire est incomplète ici du fait du temps trop court de chaque palier (1 à 3 jours). On ne retient par conséquent que la tendance.

2. ESSAI DE CONSOLIDATION A TEMPERATURE CONSTANTE: 20,50,80 ou 110°C

Ces essais (cf figure 5.6) nous ont permis de connaître l'évolution du fluage avec la température pour une même charge appliquée.

— Les paramètres mesurés sont :

- dh_0 : déformation verticale de l'échantillon quand on élève sa température de 20°C à T1 à la pression d'antigonflement.
- C_v ou t_{100} : caractéristiques de la consolidation primaire
- dh_p : déformation verticale due à la consolidation primaire et au tassement instantané en enlevant la part due au fluage (mesurée aux temps initiaux par extrapolation de la droite de fluage)
- $C\alpha$ ou $C\alpha_e$: taux de compression ou indice de fluage caractéristiques de la consolidation secondaire
- dh_f : déformation verticale due au fluage dont on évalue les valeurs dès le départ en extrapolant la droite de fluage dans le repère (dh-lg(t)).

En dehors de dh_0 qui est lu directement sur le capteur, les autres paramètres sont mesurés sur les courbes (dh-lg(t)).

— Nous avons aussi repris le modèle de FELIX (1980): la relation entre le tassement et le temps est appliquée dans le but d'extrapoler le fluage. Elle est rappelée ici:

$$C(t) = h_f (1 - \exp(-\alpha \cdot t^B)) \quad [20]$$

- $C(t)$: tassement en fonction du temps
 $h_{f,t,t}$: déformation totale théorique due au fluage au bout de 100 ans (tassement à 100 ans h_f moins le tassement immédiat $C(t)$ pour t égale 1s)
 h_f : tassement théorique total au bout de 100 ans (ce tassement est déduit de la dernière valeur du tassement mesuré h_n au cours de l'essai et de la première mesurée juste après la fin de la consolidation primaire h_1 ; t_n et t_1 étant les temps correspondant à ces valeurs)

On a:

$$h_f = h_1 + (h_n - h_1) \frac{\lg(t_\infty) - \lg(t_1)}{\lg(t_n) - \lg(t_1)}$$

t_∞ étant fixé à 100 ans.

Le calcul de α et B est expliqué en annexe

L'intérêt de ce modèle est d'extrapoler le fluage avec le temps. Nous l'avons appliqué à différentes températures dans le but d'en tirer une relation ou au moins un comportement général entre ses paramètres et la température dans le but de faire des prévisions.

Nous commencerons par ST GENEST.G car après gonflement les différences entre les échantillons se sont estompées. On peut ainsi isoler le rôle de la température, les autres paramètres étant très proches. On a ensuite essayé de confirmer ce rôle sur les autres sols dont l'état initial est plus dispersé.

2.1. ST GENEST.G

— La représentation graphique du taux de gonflement vertical (dh/h_0), lors de la phase de gonflement libre d'une durée d'une semaine, en fonction du logarithme du temps est une courbe en "S" analogue aux courbes de consolidation avec un gonflement primaire et un gonflement secondaire, cf figure 5.7. Le gonflement secondaire est négligeable devant le gonflement primaire.

Les travaux de V.DAKSHANAMURTHY (1978) et B.VAYSSADE (1978) ont mis en évidence l'existence d'une loi hyperbolique entre le taux de gonflement d'un échantillon d'épaisseur h_0 et le temps t :

$$\frac{dh}{h_0} = G \frac{t}{B + t} \quad [19]$$

G : taux de gonflement final (dh/h_0), obtenu pour un temps infini.
B : temps de demi-gonflement, temps au bout duquel le sol a gonflé de la moitié de son taux de gonflement final.

Cette relation [19] peut s'écrire :

$$\frac{t}{dh/h_0} = \frac{1}{G} t + \frac{B}{G} \quad [20]$$

Les paramètres B et G peuvent être déterminés graphiquement par la représentation du gonflement dans le système de coordonnées ($t, t/(dh/h_0)$) qui est une droite comme le montre la figure 5.8.

G varie dans notre cas entre 6 et 11 % et permet de ramener des indices de vides initiaux allant de 0,657 à 0,751 à des indices de vides entre 0,812 et 0,840 à 20°C. Dans tous les cas au bout de 6 jours plus de 96 % du gonflement total théorique est atteint.

— On élève ensuite la température de l'échantillon à la valeur fixée pour l'essai et on constate un gonflement supplémentaire pouvant atteindre 0,9 %, soit 231 micromètres à 110°C. L'échantillon est alors largement surconsolidé puisque la pression appliquée est d'environ 5 kPa et la pression de préconsolidation (mesurée par les essais de compressibilité) est de 400 kPa, ce qui correspond à un OCR de 80. On constate à nouveau (cf chap.2 paragraphe 4.2) que le comportement est dilatant quelque soit la température pour un OCR élevé.

— On applique ensuite la pression de préconsolidation provoquant une consolidation de l'échantillon et on mesure le coefficient de consolidation c_v selon la méthode de CASAGRANDE ou le t_{100} . Ces valeurs reportées dans un diagramme ($(c_v)_T / (c_v)_{20} - T$) (cf figure 5.9) indiquent une nette augmentation de c_v avec la température à rapprocher de la variation de viscosité de l'eau.

— Pendant les phases de consolidation secondaire, on peut mesurer les C_α ou $C_{\alpha e}$ et les reporter dans un diagramme en fonction de la température. On constate une augmentation de ce paramètre avec T (cf figure 5.10). Au bout d'un mois, on mesure le pourcentage du

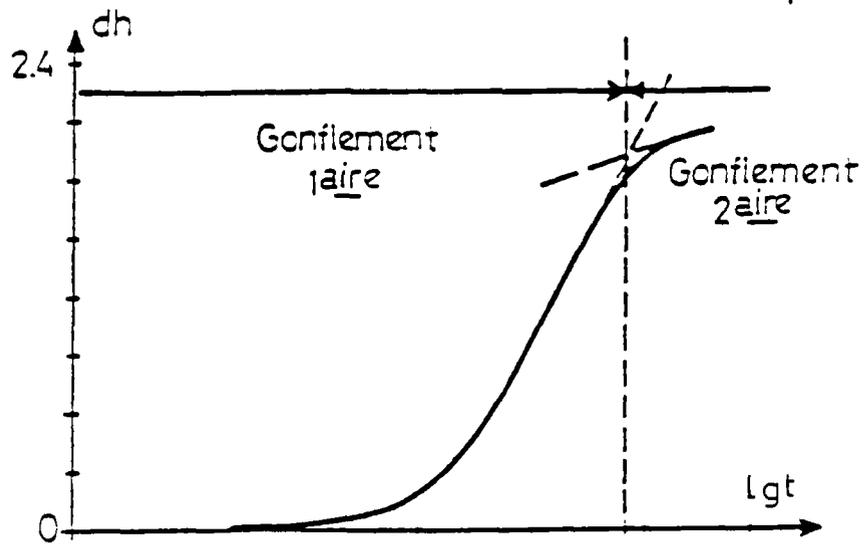


Figure 5.7 Courbe de gonflement (taux de gonflement - logarithme du temps) pour SAINT-GENEST à 20°C

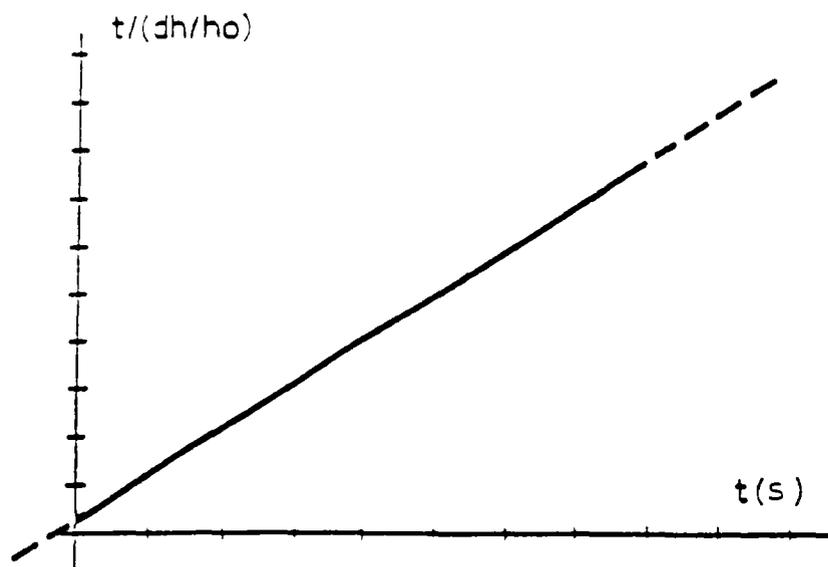


Figure 5.8 Courbe de gonflement ($t/(dh/ho) - t$) pour SAINT-GENEST à 20°C

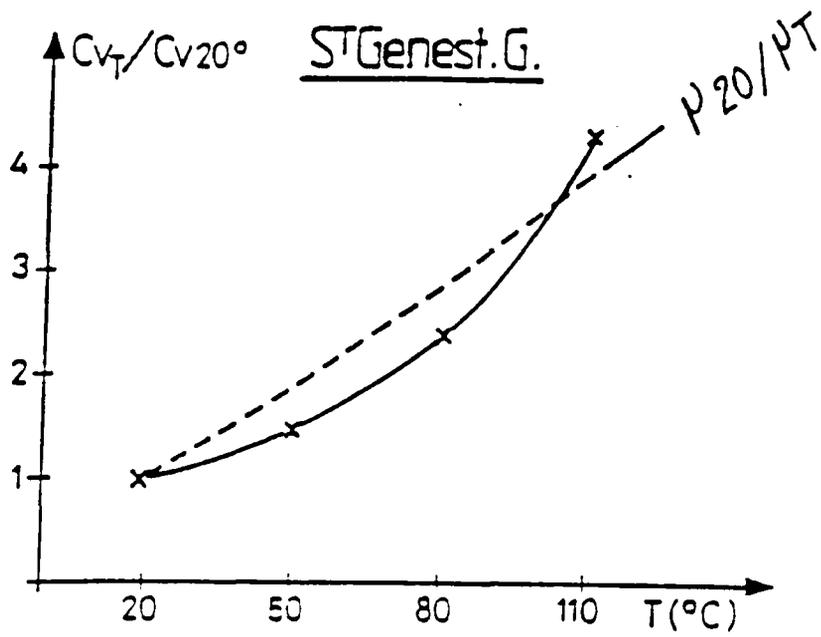


Figure 5.9 Evolution de C_{vT}/C_{v20° avec la température pour SAINT-GENEST G.

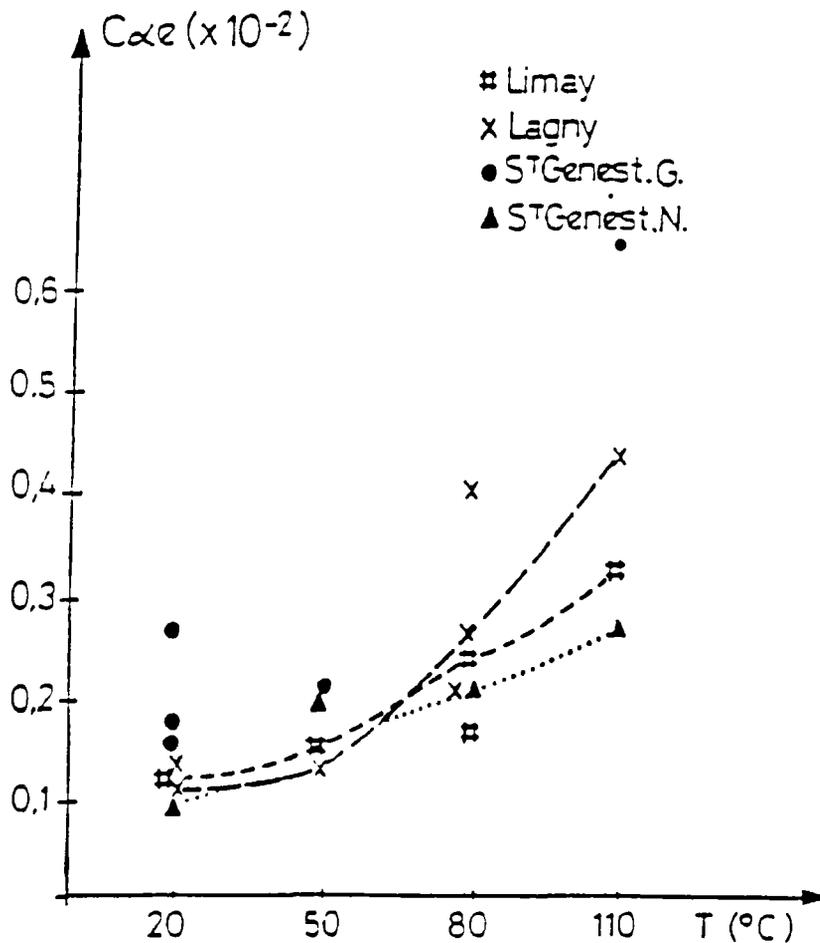


Figure 5.10 Evolution du $C\alpha\varepsilon$ avec le temps pour LAGNY, LIMAY, SAINT-GENEST N. et SAINT-GENEST G.

tassement total dû au fluage en prenant comme extrapolation linéaire de ce phénomène aux temps initiaux le repère (dh - lg(t)).

T du palier essai (°C)	20 20-110-20	50 -	80 -	110 -
e ₀ - w _i (%)	0,852-26,2	0,823-27,6	0,841-26,0	0,859-28,5
C _α (x10 ⁻⁴) - C _{αe} (x10 ⁻³)	8,9 - 1,6	11,4 - 2,1	12,8 - 2,3	34,0 - 6,3
dh _{tot} (mm)	1,87	1,74	1,71	2,12
dh _{fluage} (mm)	0,16	0,25	0,25	0,47
fluage (%)	9	14	15	24

Tableau 5.6 : Evolution des paramètres de fluage en fonction de la température pour ST GENEST.G

La valeur du fluage à 110°C est la plus élevée. Cette différence est-elle due uniquement à la dispersion des résultats pour un même essai ou ne serait-ce plutôt une confirmation de ce qu'on avait observé sur les essais oedométriques de ST.GENEST, c'est à dire à 20°C et 50°C un C_α proche et à 110°C un C_α nettement supérieur. L'ensemble des essais effectués ne nous permet pas de certifier ce comportement.

Les paramètres de FELIX pour les essais sur ST GENEST.G sont reproduits dans le tableau suivant :

	20	50	80	110
w _i %	26,2	27,6	26,0	28,5
e ₀	0,837	0,808	0,835	0,835
α ₀	2,11	1,615	1,678	0,983
β	0,031	0,044	0,039	0,056
h _f (mm)	1,951	1,840	1,971	2,429
h _{f,t,t} (mm)	0,239	0,320	0,369	0,909

Tableau 5.7 : Evolution des paramètres de fluage de FELIX en fonction de la température pour ST GENEST.G

En traçant les points (α,β) sur un diagramme semi logarithmique (cf figure 5.11), on constate leur alignement suivant une droite d'équation:

$$\log(\alpha) = - 14,08 \beta + 0,763$$

On retrouve le même type de relation que FELIX pour l'argile de Cubzac Les Ponts (cf chap.2 paragraphe 2.4.4).

Le pourcentage de fluage est donné par exp(-α) :

- entre 20 et 50 ou 80°C, ce pourcentage augmente légèrement;
- entre 20 et 110°C, ce pourcentage double.

Ces résultats aussi montrent le rôle non négligeable de la température en particulier à 110°C. Cependant il faudrait renouveler ces essais à 20, 50, 80 et 110°C pour connaître la dispersion normale des résultats pour un même essai.

Passons maintenant à ST GENEST.N de manière à analyser le rôle du remaniement.

2.2. ST GENEST.N

— Lors de la montée en température, toujours à la pression d'antigonflement, on observe un gonflement léger de 21 micromètres à 50°C (OCR≈3) et un tassement de 37 et 58 micromètres respectivement à 80 et 110°C (OCR≈2), d'où un comportement compactif à

forte température; ce comportement reste cependant faible pour ce matériau d'OCR moyen, aux environs de 2.

L'échantillon de l'essai effectué à 20°C dans le cadre d'un cycle 20-80-20 présentait initialement une teneur en eau de 29 %; celle-ci est comparable à celles des autres essais de montée en température directe avant consolidation qui sont aux alentours de 28 %.

— Les coefficients de consolidation c_v de ces essais augmentent avec la température soit une accélération de la consolidation primaire avec la température. On peut au choix soit reporter c_v en fonction de T (déjà étudié au paragraphe 1) ou c_v "réduit" soit $c_v / ((\sigma'_{cmax} - \sigma'_g) / \sigma'_g)$ en fonction de w_i (cf fig.5.12). Ce deuxième diagramme permet de regrouper tous les points à 20°C sur une droite montrant ainsi une relation entre $c_v / ((\sigma'_{cmax} - \sigma'_g) / \sigma'_g)$ et w_i pour un même sol et à une température donnée :

- à 20°C, $c_v / (d\sigma' / \sigma'_g) = -1,16 w_i + 38,28$
- à 80°C, l'éloignement pour un même w_i à cette droite est caractéristique du rôle de T. $c_{v,80} / c_{v,20} = 1,23$
- à 110°C, on obtient $c_{v,110} / c_{v,20} = 1,83$

— Les paramètres qui caractérisent la consolidation sont reproduits dans le tableau 5.8. Ils sont obtenus à partir des courbes de consolidation à 20, 50, 80 et 110°C (la teneur en eau était relativement constante comprise entre 28 et 29%)

T palier étudié (°C) essai	20 20-80-20	50	80	110
$e_0 - w_1$ (%)	0,765-29,0	0,716-27,6	0,766-28,6	0,762-28,7
$C_{\alpha_e} (x10^{-4}) - C_{\alpha_e} (x10^{-3})$	5,8-1,02	12,2-2,02	11,8-2,08	15,0-2,58
dh_p (mm)	0,194	0,141	0,134	0,077
dh_p (100ans) (mm)	0,128 -40%	0,277 -66%	0,268 -66%	0,343 -82%

Tableau 5.8 : Evolution des paramètres du fluage en fonction de la température pour ST GENEST.N

— La modélisation des courbes suivant la relation de FELIX donne à α , β , h_f et h_{ftt} les valeurs reproduites dans le tableau suivant.

T (°C)	20 "20-80-20"	50	80	110
α	0,820	0,374	0,504	0,275
β	0,061	0,105	0,080	0,105
h_f	0,328	0,407	0,359	0,413
h_{ftt}	0,142 (44%)	0,280 (44%)	0,217 (60%)	0,307 (76%)
$dh_{primaire}$	0,186	0,127	0,142	0,106

$dh_{primaire}$: tassement dû à la dissipation des surpressions interstitielles ainsi qu'au tassement instantané suivant le modèle.
Il est donné par l'équation: $dh_{primaire} = h_{ftt} - h_f$

Tableau 5.9 : Evolution des paramètres de fluage de FELIX en fonction de la température pour ST GENEST.N

On note alors que la température :

- accentue le phénomène de fluage, C_{α_e} augmente ainsi que le pourcentage du tassement dû uniquement au fluage;
- diminue l'amplitude du tassement dû uniquement à la dissipation de la pression interstitielle.

L'essai à 50°C présente un fluage analogue à celui mesuré à 80°C, mais l'incrément de pression appliqué est triple, 300 % au lieu de 100 %, et peut expliquer un fluage important proche de celui à 80°C.

On note une relation linéaire entre les paramètres de fluage de FELIX $\log \alpha$ et β , cf figure 5.11.

– Les conclusions pour ce matériau sont :

- une accélération de la consolidation primaire avec la température (déjà observée au paragraphe 1) induisant une diminution du tassement primaire;
- une augmentation du fluage qui compense et surpasse la réduction observée du tassement de consolidation primaire *stricto sensus*. Ainsi au bout de 100 ans (ou même moins) le tassement total augmente avec la température.

Plusieurs essais de consolidation effectués à 20°C ont montré que les résultats étaient très dispersés pour ST GENEST.N et beaucoup moins pour ST GENEST.G en raison d'une dispersion beaucoup plus faible des indices des vides des échantillons de ce sol.

Le tassement dû au fluage pour l'argile de ST GENEST.G est plus élevé que celui de ST GENEST.N. Par contre le rapport, tassement de fluage sur le tassement total après 100 ans, est deux fois plus faible.

2.3. LAGNY

– La déformation de l'argile de LAGNY à la pression d'antigonflement σ'_g sous l'effet de la montée en température est reproduite sur la figure 5.14 avec celles de ST GENEST.N, ST GENEST.G et LIMAY. Les valeurs, pour les essais dont le OCR est de 2,5, sont :

- à 50°C, un gonflement de 0,25%;
- à 80°C, un gonflement variant de 0,05 à 0,5% (3 essais);
- à 110°C, un gonflement pratiquement nul de 0,01%.

Ceci indique bien pour un échantillon d'OCR moyen entre 2 et 3, un gonflement lors du chauffage, qui diminue avec la température jusqu'à une inversion du phénomène qui passe de dilatant à compactif.

– Les mesures de c_v sur les différentes courbes sont assez dispersées mais vont toujours dans le sens d'une accélération du phénomène avec T. Entre 20 et 110°C, ce coefficient triple.

Trois essais ont été effectués à 80°C :

- à moyen terme sur 3 mois noté "80",
- à moyen terme avec des mesures régulières de la perméabilité noté "80(k)",
- à long terme sur 6 mois noté "80LT".

On constate un alignement du coefficient de consolidation $c_v / ((\sigma'_{cmax} - \sigma'_g) / \sigma'_g)$ en fonction de la teneur en eau initiale de l'échantillon w_i . D'où l'hypothèse d'une relation linéaire entre $c_v / (d\sigma' / \sigma'_g)$ et w_i à une température donnée et pour un même sol.

Malgré nos précautions, les teneurs en eau des carottes d'argiles ont diminué durant leur stockage. Elles sont passées de 35-36 % initialement à moins de 30 %, voire 25 % pour certaines. Ceci a influé sur la pression d'antigonflement, la pression de consolidation, le tassement mesurés...D'où une interprétation plus délicate et plus limitée des résultats obtenus avec ce matériau.

— Nous avons retenu les essais dont les teneurs en eau initiales étaient les plus proches possibles pour analyser les caractéristiques de la consolidation en fonction de la température (cf tableau 5.10).

T du palier essai (°C)	20	50	80 (k)	110
$e_0 - w_L$ (%)	0,866-32,0	0,946-34,5	0,966-34,0	0,930-33,1
C_α ($\times 10^{-4}$)- $C_{\alpha e}$ ($\times 10^{-3}$)	6,1- 1,13	6,7- 1,29	10,5- 2,05	22,3- 4,31
dh_{tot} (mm)	0,202	0,187	0,214	0,562
dh_{fluage} (2 mois, mm)	0,106	0,106	0,174	0,332

Tableau 5.10 : Evolution des paramètres du fluage en fonction de la température pour LAGNY

On constate une nette progression de l'indice de fluage avec la température, toutefois les valeurs à 20 et 50°C sont proches. Il faut noter que la pression d'anticonflement de l'essai "50" a été de 140 kPa alors qu'elle était de 120 kPa pour "20", 90 kPa pour "80(k)" et "110". D'où l'application d'un incrément de pression plus faible à 50°C pour atteindre σ'_{cmax} , ce qui a pu avoir comme conséquence de sous estimer le fluage si on veut comparer avec les autres essais.

2.4. LIMAY

— Après la phase de saturation à 20°C et l'élévation de la température de l'échantillon, la déformation ε observée, pour un OCR moyen de 1,4, est de :

- à 50°C, peu de déformation,
- à 80°C, un tassement important de 0,8 %
- à 110°C, un tassement supérieur à 1,3 % (0,8 % pour un OCR de 2), ce qui est bien supérieur à ce que l'on avait observé sur les autres sols pour des OCR voisins.

— A partir des courbes de consolidation à 20, 50, 80 et 110°C, on calcule les coefficients de consolidation c_v selon la méthode de CASAGRANDE. On trouve toujours une augmentation de ce paramètre avec la température (cf figure 5.13). Par contre les c_v sont plus de 10 fois plus faibles que ceux des autres argiles, ce qui est en relation avec une perméabilité globalement 10 fois plus faible de l'argile de LIMAY. Cela confirme les conclusions faites à partir des essais oedométriques à différentes températures.

— Sur les courbes de consolidation on mesure les C_α ou $C_{\alpha e}$ qui sont reportés sur le diagramme.5.10. Le tassement total et les caractéristiques du fluage sont indiqués dans les tableaux.5.11 et 5.12.

T du palier essai (°C)	20	50	80	110
C_α ($\times 10^{-4}$)- $C_{\alpha e}$ ($\times 10^{-3}$)	6,3- 1,16	7,9- 1,49	12,1- 2,31	18,1- 3,20
dh_{tot} (mm)	0,155	0,292	0,365	0,222
dh_{fluage} (2 mois, mm)	0,088- 56%	0,152- 52%	0,205- 56%	0,222-100%

Tableau 5.11 : Evolution des paramètres du fluage en fonction de la température pour LIMAY

T (°C)	20			50	80		110
essai	20-50-20	20-80-20	20-110-20	-	-	80 LT	-
w _i %	26,9	30	29,1	32,4	32,4	29,5	30,5
e _o	0,722	0,838	0,814	0,883	0,912	0,791	0,768
h _r	0,159	0,370	0,411	0,288	0,359	0,225	0,214
h _r / σ _c %	0,069-44%	0,126-34%	0,138-34%	0,120-42%	0,186-52%	0,135-60%	100%
d _{0,7} / σ _c %	32	6	98		37	37	37

Tableau 5.12 : Evolution des paramètres de fluage de FELIX en fonction de la température pour LIMAY

On remarque que plus la teneur en eau w_i est faible plus le pourcentage de fluage est important.

La pression de préconsolidation maximum estimée à 520 kPa par des essais oedométriques à 20°C avec des teneurs en eau initiales de 32,5 % a dû être réévaluée quand ces dernières sont descendues en dessous de 27 %. Ce qui crée une cause supplémentaire de dispersion des résultats.

Le diagramme.5.10 nous montre que le taux de compression secondaire augmente avec la température à partir de 50°C, ses valeurs restent comprises entre celles de LAGNY et ST GENEST.N.

2.5. Conclusion

Cette deuxième partie conforte les observations faites dans le paragraphe précédent sur les essais oedométriques à des températures différentes. De nouveaux résultats permettent de conclure sur deux points:

1) A la pression d'antigonflement le chauffage entraîne une déformation fonction de la température finale, fonction de la pression par l'intermédiaire de l'OCR ($\sigma_{\text{appliquée}} / \sigma_c$) et de la nature du matériau.

La pression est un paramètre essentiel qui régit cette déformation puisque suivant sa valeur on aura une dilatation ou une compaction.

La différence pour un même OCR des courbes (déformation-température) provient de la nature des sols :

- LIMAY a un comportement fortement compactif qui se distingue de celui des autres argiles en raison du caractère spécifique de ce sol, c'est à dire sa forte plasticité.
- LAGNY présente aux températures moyennes 50° et 80°C une dilatation qui n'existe pas pour ST GENEST et LIMAY. Cette dilatation pourrait être attribuée au caractère minéralogique spécifique de cette argile, c'est à dire à la présence d'illite.

L'évolution de la double couche avec la température amène suivant les différents auteurs (cf paragraphe 2.2 chapitre 1), à des déformations supérieures à 1 % quand on passe de 20 à 80°C. Ceci n'a pas été observé et il faut rappeler que les calculs effectués supposent qu'aucun réarrangement textural a lieu. Cette condition paraît bien improbable du fait de l'énergie thermique fournie et de la contrainte effective appliquée au sol qui diminue pendant quelque temps. Par conséquent la double couche évolue certainement avec la température mais son rôle est difficilement quantifiable (trop de paramètres inconnus entrent en jeu) et est masqué par l'importance du réarrangement textural fonction de l'OCR et à la texture initiale, elle même fonction de la pression de préconsolidation du matériau.

2) Le taux de compression secondaire augmente de façon continue avec la température, excepté entre 20 et 50°C, températures pour lesquelles on ne distingue pas de différences notables. A 110°C l'indice de fluage a doublé voire triplé par rapport à 20°C.

Ces résultats sont valables sur les trois matériaux qui présentent des C_α proches.

On a observé sur LIMAY à 20 et 80°C que le pourcentage du fluage sur le tassement total est d'autant plus important que w_i est faible.

Le comportement de LAGNY est proche de celui de ST GENEST.N mais cette argile tasse moins et flue un peu plus, il faut noter que sa teneur en eau est plus élevée et que l'incrément de

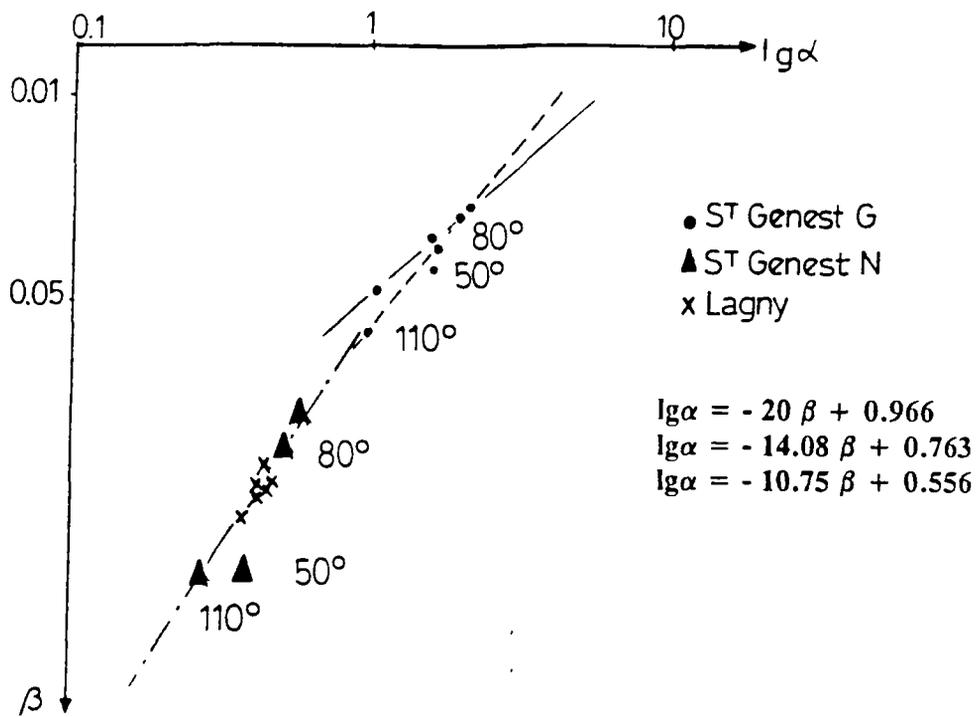


Figure 5.11 Paramètres de FELIX

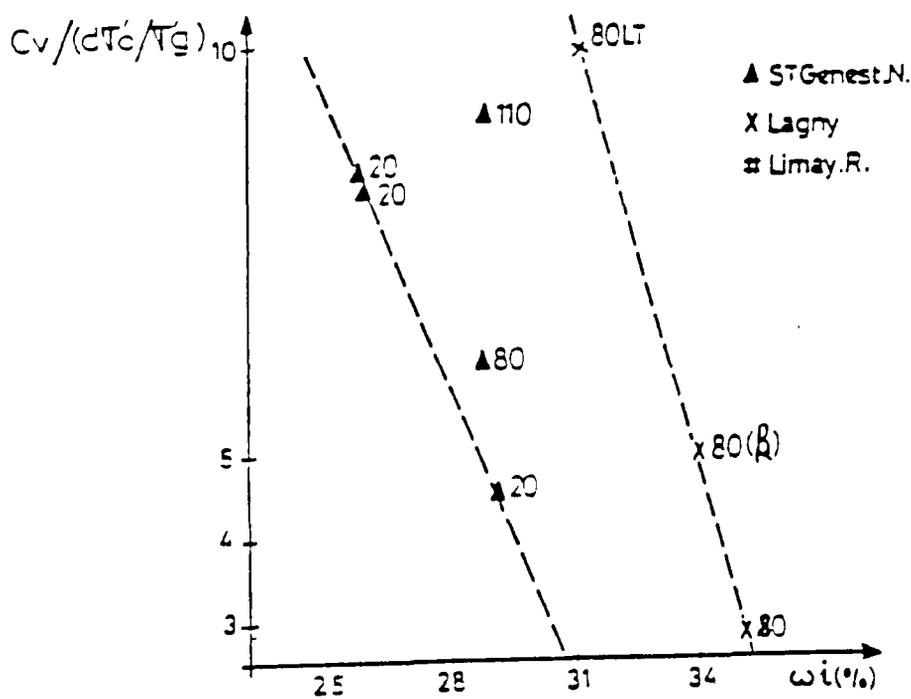


Figure 5.12 Evolution du C_α "réduit" $C_v / (d\sigma_{n+1} / \sigma_n)$ avec la teneur en eau initiale ω_i pour LAGNY et SAINT-GENEST

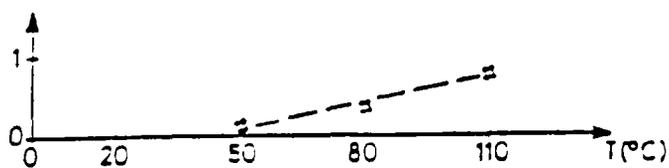


Figure 5.13 Evolution du C_v avec la température pour LIMAY

pression est plus fort. Par contre le pourcentage de fluage se situe aux alentours de 60 % quelque soit la température, alors que pour ST GENEST.N il augmente. Les c_v sont aussi très proches.

Il faut noter que les essais effectués sur six mois à 80°C (notés "80LT") indiquent une continuité du comportement, soit du fluage au delà de trois mois. Nous n'avons pas observé de différences notables des paramètres mesurés.

3. ESSAI DE MONTEE RAPIDE EN TEMPERATURE: 20-50, 20-80 et 20-110

Les montées de 20 à 80°C et de 20 à 110°C correspondent à des essais supplémentaires par rapport au planning initial. En effet ces deux essais nous ont paru nécessaires dans le but de connaître l'influence de la vitesse de montée en température (cf paragraphe 4 suivant) et l'influence de l'incrément de température, tous paramètres thermomécaniques étant égaux par ailleurs.

Le principe de ces essais, reproduit sur la figure 5.15 est le suivant :

- l'échantillon est saturé pendant deux ou trois jours à la pression d'antigonflement à 20°C.
- on applique ensuite la pression de préconsolidation et on le laisse consolider pendant deux semaines. On mesure à 20°C le taux de compression secondaire C_α .
- on élève la température du bain thermostaté immédiatement. Le capteur indique dans un premier temps un gonflement et par la suite un tassement, les corrections sur les valeurs données par le capteur de déplacement étant effectuées (cf paragraphe 1.5.2 chapitre 4).

— La figure 5.16 présente la courbe $(dh-lg(t))$ pour un essai de montée en température de 20 à 80°C sur l'argile de LAGNY. L'origine des temps est la mise sous charge à 20°C de l'échantillon. On y distingue plusieurs phases dans l'évolution de la hauteur de l'échantillon. A 20°C la phase initiale de consolidation est suivie d'une phase de fluage établi. Pour le palier de température suivant à 80°C une phase transitoire liée à l'application de la nouvelle température est suivie d'une nouvelle phase de fluage établi. Pour chaque palier de température, on peut calculer une pente $(dh/h_0)/dlg(t)$ qui correspond dans un essai de consolidation classique en condition isotherme au taux de compression secondaire C_α . Le coefficient ainsi obtenu pour la droite de fluage établi, correspondant à un palier de température donnée, est toutefois avec ce mode de calcul fonction de la durée des paliers de température précédents du fait de l'échelle logarithmique utilisée pour le temps. Elle n'est donc pas directement utilisable pour caractériser dans l'absolu l'influence de la température sur le fluage.

Pour cette raison une courbe de consolidation est tracée pour chaque palier de température en prenant pour origine des temps celui correspondant à l'application de la dernière température, les tassements dh étant définis à partir de la hauteur effective de l'échantillon à la fin du palier précédent, soit $h_{0,T}$. La figure 5.17 présente l'allure de la courbe ainsi obtenue, à 80°C pour l'essai considéré. On peut y distinguer beaucoup plus nettement que sur la courbe précédente les caractéristiques de la phase transitoire et celles du fluage établi, qui deviennent plus directement comparables d'un palier à l'autre. Ce sont les pentes calculées sur ces courbes qui seront par la suite désignées par $C_{\alpha(T)}$ après les avoir divisées par $h_{0,T}$.

— La courbe expérimentale telle qu'elle peut être observée pendant la phase transitoire avant l'établissement du régime de fluage pur résulte de la coexistence de trois phénomènes plus ou moins simultanés qui peuvent être décrits qualitativement comme suit:

(a) Une expansion thermique de la phase liquide qui entraîne un gonflement de l'échantillon. En effet l'eau de l'échantillon se dilate du fait de l'augmentation de la température. Il en résulte une surpression de l'eau dans l'échantillon d'autant plus forte que l'évacuation de l'eau est lente (perméabilité faible), ce qui diminue la pression effective sur l'échantillon. Une évacuation de l'eau en surpression devrait ramener l'échantillon à son état initial (tassement nul).

(b) Un réarrangement des particules dû à l'augmentation de la température de l'eau interstitielle, qui en se dilatant tend à séparer les particules, perturbant ainsi des liaisons interparticulaires. Au fur et

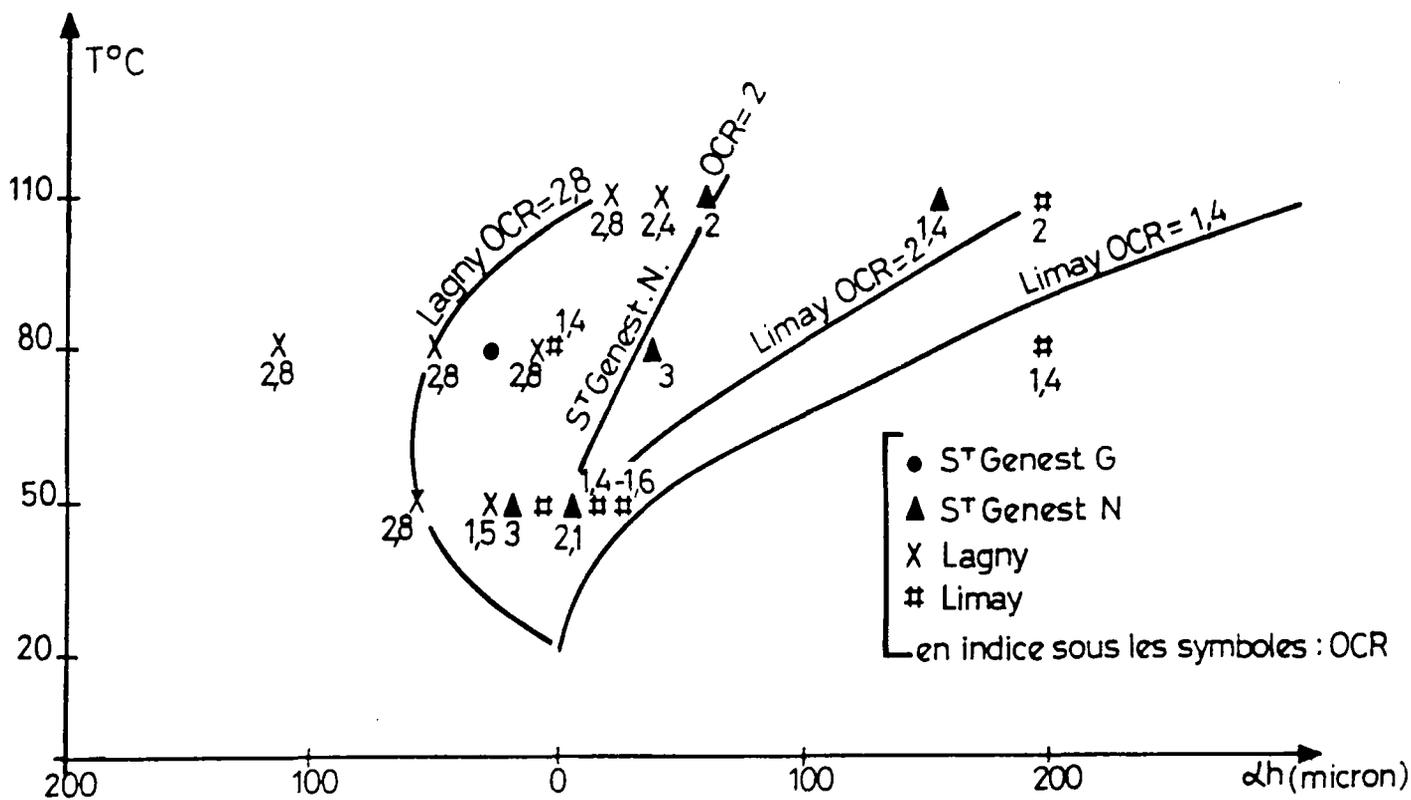


Figure 5.14 Evolution de la déformation avec la température à la pression d'antigonflement

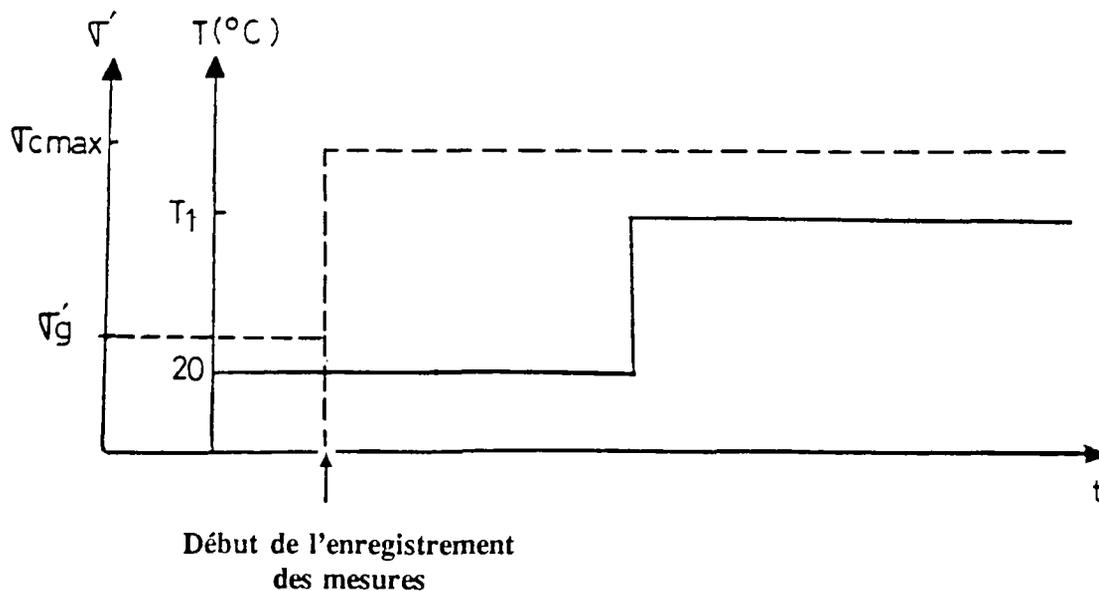


Figure 5.15 Schéma de principe des essais de montée rapide en température (T : 50, 80 ou 110 $^{\circ}\text{C}$)

à mesure que l'eau se draine, un réarrangement des particules se produit, réarrangement qui peut être différent de l'arrangement initial.

(c) Un fluage du matériau avec des caractéristiques fonction notamment de la température et de la contrainte effective. L'établissement d'une température uniforme dans l'échantillon n'étant pas instantanée, le taux de compression secondaire passera d'une valeur fonction de la température initiale à une nouvelle valeur fonction de la nouvelle température imposée. Cette valeur peut être mesurée sur la partie terminale de la courbe expérimentale.

— La courbe expérimentale peut être divisée en trois parties:

1. La première débute ($t=0$ s) avec la montée en température; elle se traduit par un gonflement de l'échantillon sous l'effet du choc thermique et est supposée se terminer au maximum de celui-ci, soit à t_0 c'est à dire à 1000 s pour ST GENEST.N, 1200 s pour LAGNY et 1400 s pour LIMAY . Pendant toute cette phase le fluage mesuré à 20°C aux temps initiaux est pratiquement nul; il apparaîtra en pointillé sur certaines figures.

2. La deuxième prend la suite et se termine quand débute la phase de fluage nettement établie. Pendant toute cette période la pente de la courbe de fluage varie d'une valeur nulle à la température et aux temps initiaux à une valeur aux environs de 2.10^{-2} mm.

Pour connaître l'évolution du fluage durant cette phase on aurait pu calculer un taux de compression secondaire fonction de la température sous la forme:

$$C_{\alpha(x,t)} = C_{\alpha,T_f} \cdot (T_{(x,t)} - T_i) / (T_f - T_i)$$

x : un point quelconque de l'échantillon
t : temps
 $T_{(x,t)}$: température au point x au temps t
 C_{α,T_f} : taux de compression final à la température finale

Ce calcul est difficile à effectuer du fait de la complexité pour calculer $T_{(x,t)}$. Par conséquent nous avons choisi pour représenter le fluage durant cette deuxième phase de prolonger la droite de fluage observée par la suite. Cela nous permet de mesurer un tassement dh_{t_0} (point de cette droite au temps t_0) dû au choc thermique obtenu après dissipation totale de la surpression interstitielle et en retranchant la part due au fluage. Nous l'appellerons par la suite tassement thermique primaire par analogie avec une consolidation mécanique.

3. La troisième phase est celle du fluage pur qui est linéaire avec le logarithme du temps. La pente mesurée sera divisée par h_{0,T_i} , hauteur de l'échantillon avant le choc thermique, pour obtenir le C_{α} à T_f . Passons à l'étude individuelle des trois matériaux.

— Nous étudierons les paramètres suivants :

- dh_{t_0} : tassement thermique primaire(en mm) décrit précédemment
- $C_{\alpha,T}$: taux de compression mesuré sur la courbe (dh -logt) pour le palier à la température T
- dh_T : tassement total mesuré à la fin du palier à la température T
- dh_g : gonflement maximal de l'échantillon (en mm) en début de palier quand on a élevé sa température
- dh_f : tassement (en mm) dû au fluage mesuré à partir de t_0 et par extrapolation de la droite de fluage quand celui-ci n'est pas totalement établi
- t_0 : temps mis pour atteindre le gonflement maximal lors d'une montée de T

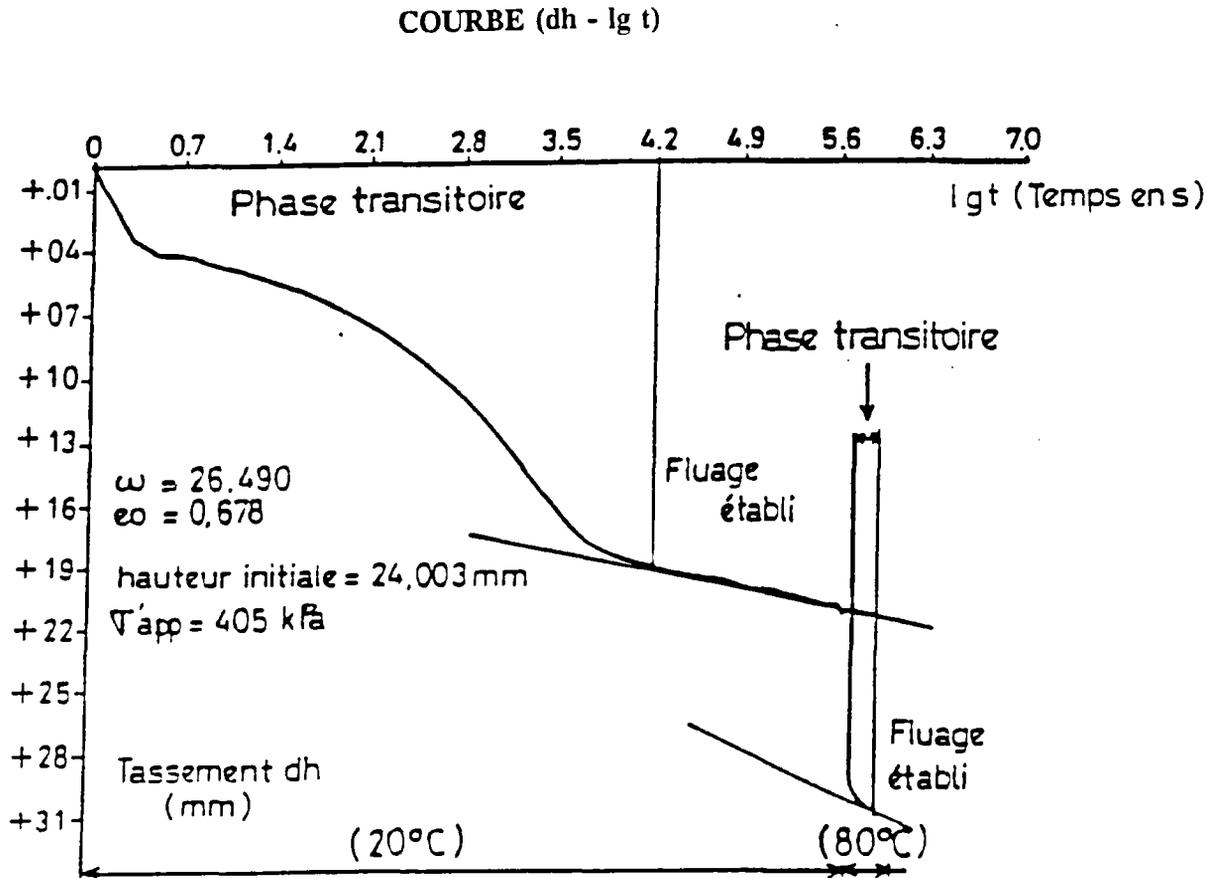


Figure 5.16 Courbe de fluage de l'argile de SAINT-GENEST N. avec des paliers de température à 20° et 80°C

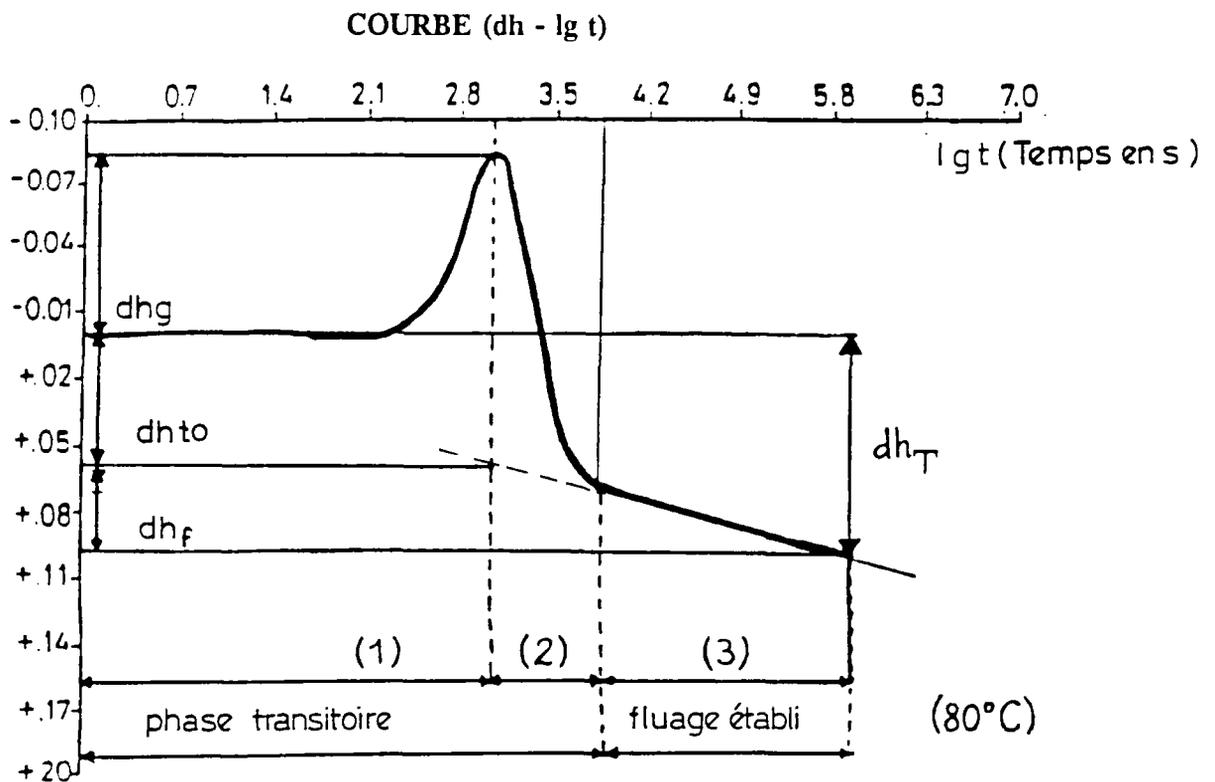


Figure 5.17 Courbe de fluage corrigé correspondant au palier à 80°C de la figure 5.12 avec pour origine des temps l'instant d'application de la température et pour origine du tassement la hauteur acquise à cet instant

3.1. LAGNY

Les courbes des trois essais sont présentées sur la figure 5.18. Le tableau 5.13 regroupe les valeurs des différents paramètres mesurés.

2 ^{ème} palier à T °C	50	80	110
$e_0 - w_1$ %	0,824 - 30,3	0,659 - 24,6	0,659 - 24,6
$C_{\alpha,T} (10^{-4}) - C_{\alpha,T}/C_{\alpha,20}$	8,28 - 1,14	5,03 - 1,45	11,74 - 2,04
$dh_{t0} - dh_{t0}/dh_{20}$	0,006 - 2 %	-0,009 - (-8 %)	0,033 - 26 %
$dh_g - dh_g/dh_{20}$	-0,026 - (-8%)	-0,110 - (-100%)	-0,141 - (-112%)
$dh_f - dh_f/dh_{20}$	0,053 - 16 %	0,034 - 31 %	0,075 - 59 %
dh_T/dh_{20}	18 %	23 %	85 %

e_0 : indice des vides au début du palier à T°C
 w_1 : teneur en eau de l'échantillon avant sa mise en place dans la cellule

Tableau 5.13 : Comparaison du palier à T avec le palier à 20°C pour LAGNY

L'essai à 50°C est effectué sur un échantillon dont l'indice des vides e_0 est de 0,798, valeur très supérieure à celles des deux autres essais (0,652 et 0,651). Par conséquent pour comparer ces essais nous avons étudié non pas $C_{\alpha,T}$, dh_{t0} ...mais $C_{\alpha,T}/C_{\alpha,20}$, dh_{t0}/dh_{20} ...Nous espérons ainsi en divisant par les paramètres du palier à 20°C qui dépendent eux mêmes des conditions initiales, nous affranchir en partie des différences de ces conditions et retrouver entre 50, 80 et 110°C un comportement général plus cohérent.

Trois observations importantes sont à faire sur cet échantillon :

- (1) lorsque l'incrément de température, et par là même la température finale augmente, C_{α} augmente lui aussi passant de 14 % à 50°C à 104 % à 110°C.
- (2) à la pression de préconsolidation (soit un OCR de 1), LAGNY a un comportement qui passe de dilatant à 80°C à compactif à 110°C. A 80°C la sollicitation thermique amène à un remaniement de l'échantillon qui présente un gonflement thermique primaire ou résiduel, dh_{t0} .
- (3) plus la sollicitation thermique est forte, soit un incrément de température important, plus le gonflement qui suit est important. Mais l'énergie thermique et le gonflement ne sont pas les seuls facteurs déterminants du tassement thermique (la comparaison des essais à 50 et 80°C nous le montre); ici l'état initial du sol joue un rôle important.

3.2. ST GENEST.N

Le tableau 5.14 récapitule les paramètres principaux mesurés sur les courbes des trois essais présentées figure 5.19.

T (°C)	50 ("20-50-20")	80	110
$e_0 - w_1$ %	0,765 - 29	0,678 - 26,4	0,731 - 27,8
$C_{\alpha,T} (10^{-4}) - C_{\alpha,T}/C_{\alpha,20}$	5,77 - 0,93	6,39 - 1,18	5,04 - 0,91
$dh_{t0} - dh_{t0}/dh_{20}$	0,019 - 7 %	0,066 - 31 %	0,108 - 53 %
$dh_g - dh_g/dh_{20}$	-0,025 - (-9 %)	-0,069 - (-32 %)	-0,100 - (-49 %)
$dh_f - dh_f/dh_{20}$	0,048 - 17 %	0,048 - 23 %	0,037 - 18 %
dh_T/dh_{20}	24 %	54 %	71 %

Tableau 5.14 : Comparaison du palier à T avec le palier à 20°C pour ST GENEST.N

Pour ces essais les teneurs en eau varient entre 26,4 et 29 %. Les différences sont moins importantes que pour LAGNY et ne devraient pas trop perturber l'interprétation des résultats.

Deux observations ressortent :

- il n'y a pas d'évolution nette du fluage avec l'incrément de température. Les rapports de $C_{\alpha,T}/C_{\alpha,20}$ s'éloignent peu de 1 et ne présentent pas une évolution régulière.

COURBES (dh - lg t)

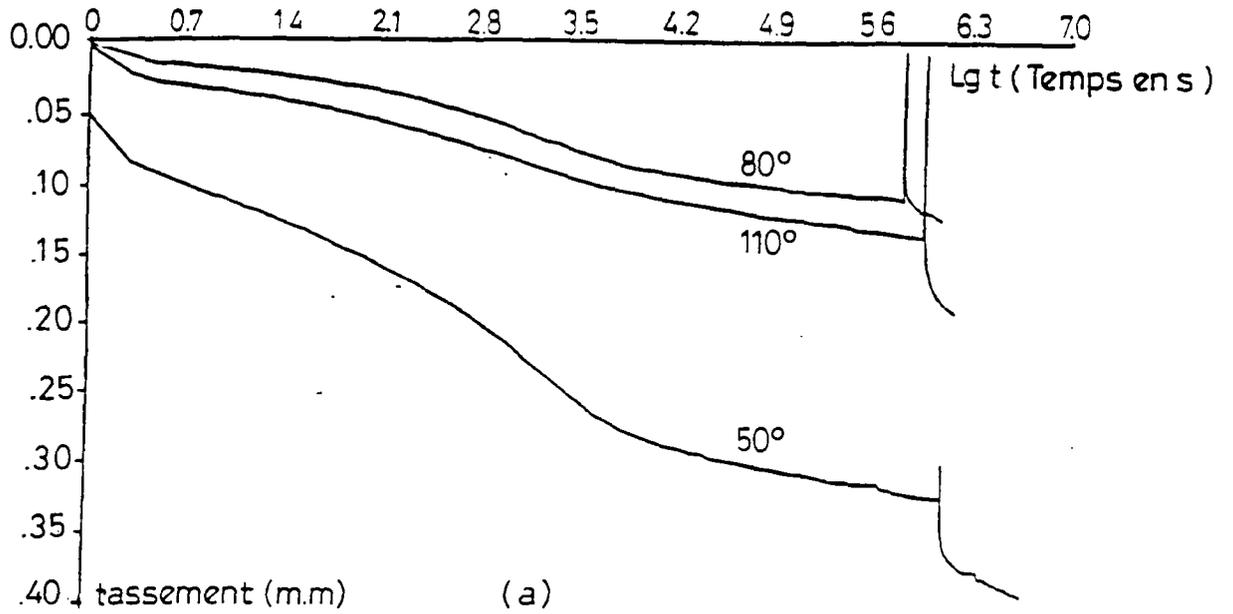
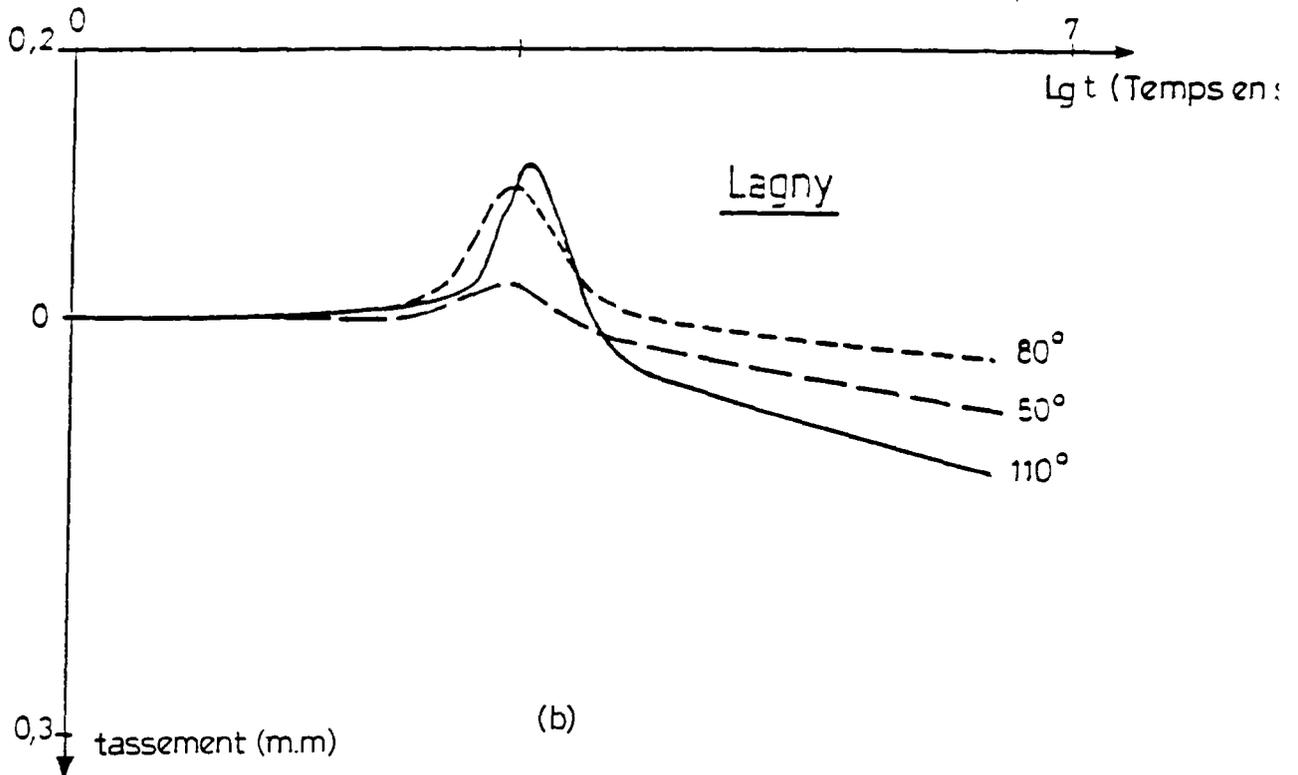


Figure 5.18 Courbes de consolidation des trois essais : 20-50, 20-80 et 20-110 sur LAGNY :
 (a) courbe complète, (b) courbe correspondant aux paliers de température supérieurs avec changement d'origine au moment du chauffage



- la déformation pour un OCR de 1 est positive et augmente régulièrement avec l'incrément de température. La déformation dh_{10}/h_0 indique un alignement pour les trois points représentatifs de 50, 80 et 110°C; il en est de même pour le rapport dh_{10}/dh_{20} .

3.3. LIMAY

Les courbes des trois essais sont présentées figure 5.20. Les trois essais ont été effectués sur des échantillons de teneurs en eau très proches, aux alentours de 29 %. Les résultats sont reproduits dans le tableau 5.15.

T (°C)	50 (*20-110*)	80	110
$e_0 - w_i$ %	0,788 - 29,1	0,775 - 28,8	0,763 - 28,5
$C_{HT} (10^4) - C_{HT} / C_{HT20}$	7,39 - 0,8	11,78 - 1,35	16,78 - 2,14
$dh_{t0} - dh_{t0} / dh_{20}$	0,122 - 30 %	0,312 - 72 %	0,450 - 136 %
$dh_{50} - dh_{50} / dh_{20}$	-0,069 - (-17 %)	-0,137 - (-32 %)	-0,219 - (-66 %)
$dh_{80} - dh_{80} / dh_{20}$	0,050 - 12 %	0,088 - 20 %	0,131 - 40 %
dh_T / dh_{20}	42 %	92 %	176 %

Tableau 5.15 : Comparaison du palier à T avec le palier à 20°C pour LIMAY

Notons que la pression appliquée sur l'échantillon à 110°C est plus faible que celle à 50 et 80°C d'où l'intérêt d'une normalisation en divisant par les valeurs du palier à 20°C. Cette précaution est peut être insuffisante pour autoriser des comparaisons très précises, c'est pourquoi il faut relativiser les valeurs à 110°C par rapport aux autres paliers.

Les résultats du tableau nous permettent de dire que:

- le fluage est nettement accéléré par l'incrément de température, allant même jusqu'à doubler après un chauffage de 90°C.
- le tassement thermique primaire augmente aussi avec dT. Le choc thermique crée 30 % de tassement supplémentaire à 50°C et 136 % à 110°C. La déformation, sans le fluage, atteint presque 2 %. Le comportement est nettement compactif quelque soit la température, et à la pression de préconsolidation (soit un OCR de 1) il est bien supérieur à celui obtenu à la pression d'antigonflement (OCR de 2).
- le gonflement de l'échantillon est très élevé et presque linéaire avec dT. Il dépasse de beaucoup celui de ST GENEST et de LAGNY, et est probablement lié à sa grande finesse et à sa perméabilité dix fois plus faible; ce qui retarde la dissipation des pressions interstitielles et permet un remaniement plus important. Il entraîne d'autre part une plus grande variation de la contrainte effective et donc un remaniement plus important.

3.4. Conclusion

1) Les trois échantillons présentent un tassement thermique primaire qui augmente avec l'incrément de température appliqué; ce tassement reste très faible pour LAGNY, voire négatif dans certains cas; il est trois fois plus élevé pour ST GENEST que pour LAGNY et cinq fois plus important pour LIMAY que pour ST GENEST.

Ce tassement est bien supérieur aux prévisions du fluage, si on avait laissé l'échantillon à sa température initiale (soit 20°C).

2) Le fluage augmente avec (dT) pour LAGNY et LIMAY. Cette augmentation pour LAGNY compense son faible tassement thermique primaire. On observe après un mois à la nouvelle température que l'augmentation de tassement dû au choc thermique est analogue pour LAGNY et ST GENEST, soit environ 20 % à 50°C et 80 % à 110°C. L'augmentation est par contre deux fois plus importante pour LIMAY, soit 42 % à 50°C et 176 % à 110°C.

3) La déformation thermique totale après un mois est croissante d'un échantillon d'argile de LAGNY à ST GENEST et enfin LIMAY et ce quelque soit la température. On note qu'il n'y a plus de gonflement pour LAGNY. Il faudrait donc ajouter aux résultats de BALDI sur les déformations de

COURBES (dh - lg t)

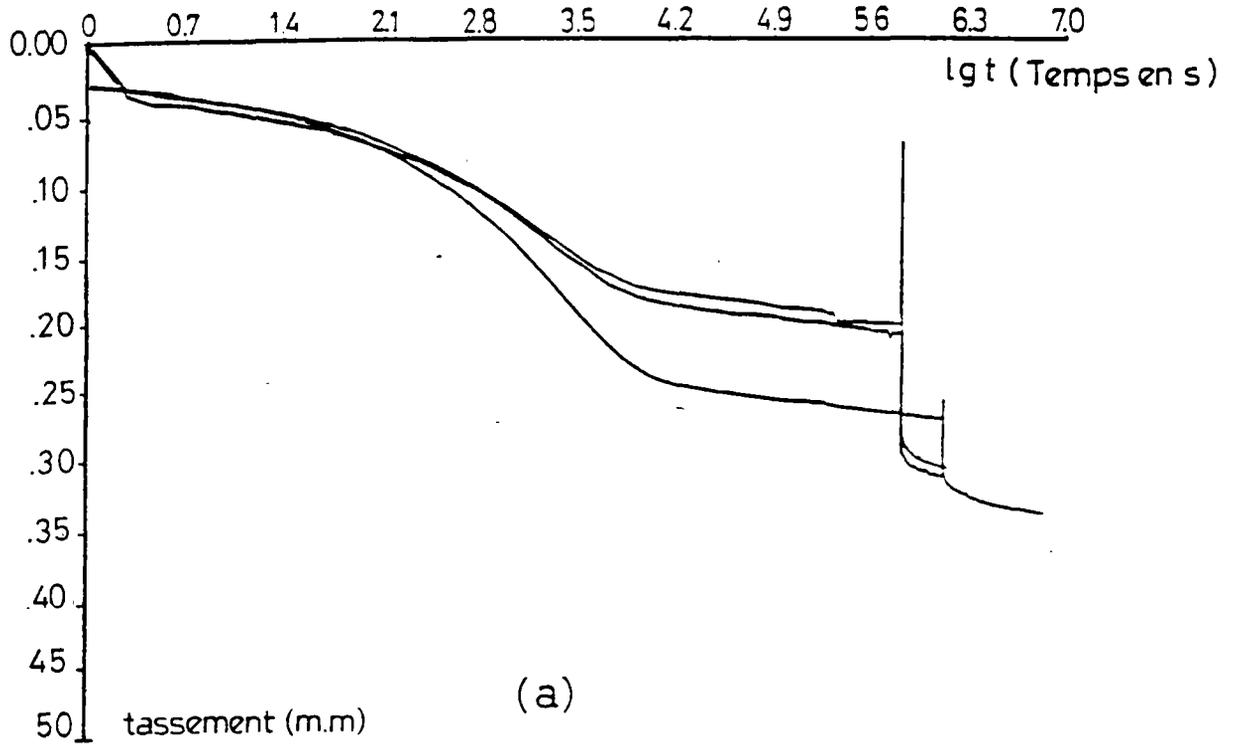
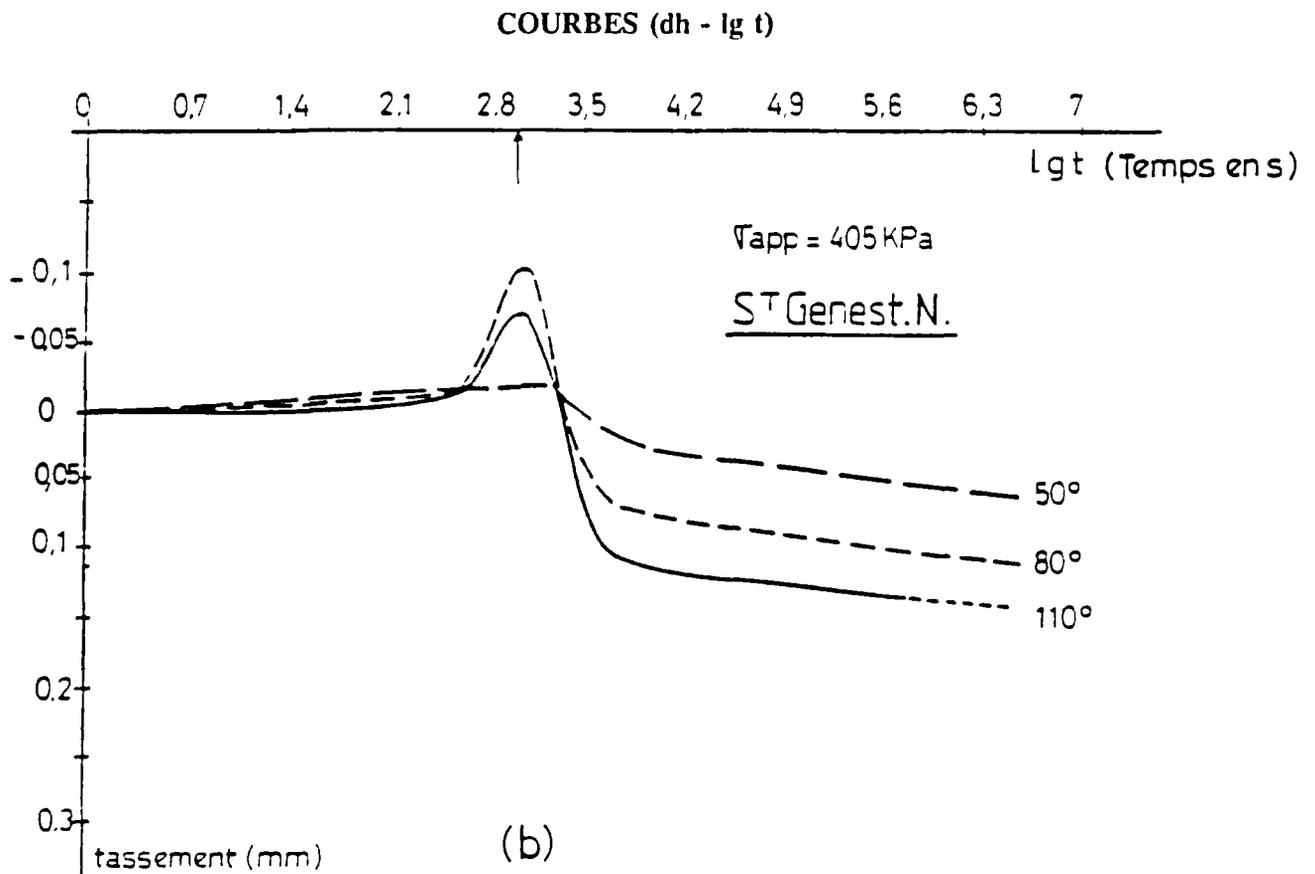


Figure 5.19 Courbes de consolidation des trois essais : 20-50, 20-80 et 20-110 sur SAINT-GENEST : (a) courbe complète, (b) courbe correspondant aux paliers de température supérieurs avec changement d'origine au moment du chauffage



l'échantillon en fonction de la température et de la pression, l'importance du paramètre temps quand on a affaire à des matériaux susceptibles de fluer.

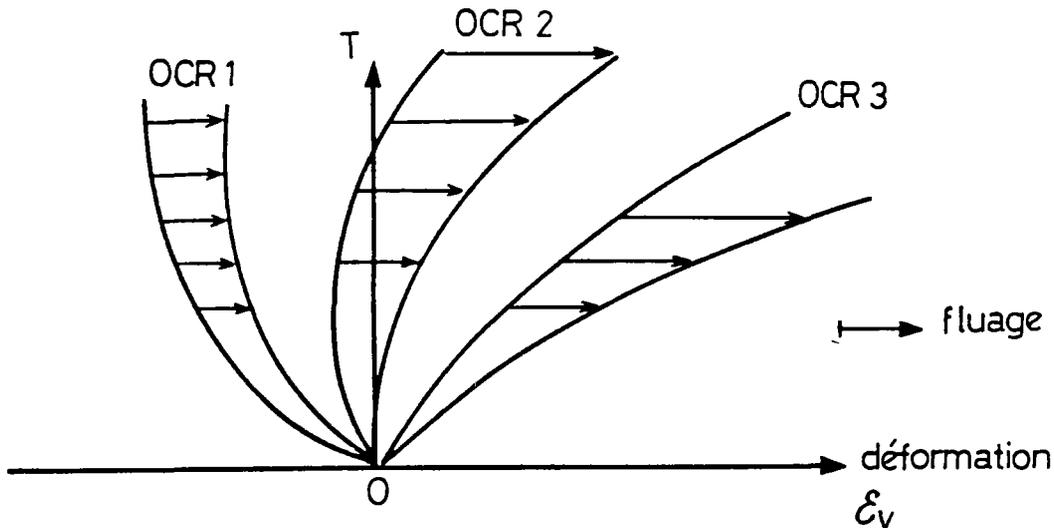


Schéma de l'évolution de la déformation en fonction de T , OCR et temps

Le comportement de LIMAY se distingue par un tassement très fort quand on le chauffe; ce tassement provient essentiellement du réarrangement lors de la phase transitoire d'autant plus important qu'il a une perméabilité faible. Ce matériau a la spécificité d'être très plastique d'où l'hypothèse qu'une forte plasticité favorise un tassement thermique primaire important comme il favorise un tassement mécanique (cf paragraphe 4.5 chapitre 2). LAGNY se comporte de façon inverse à ST GENEST.N avec un tassement thermique primaire très réduit et un fluage notable. ST GENEST présente un réarrangement primaire plus important que son fluage après un mois à 80 et 110° C.

4) L'accélération du fluage avec l'incrément de température qu'on observe pour LAGNY et LIMAY et non pour ST GENEST peut avoir pour origine les propriétés propres à ces argiles et distinctes de celles de ST GENEST, soit:

- une plasticité élevée pour LIMAY
- une présence de smectites commune pour LAGNY et LIMAY

L'élévation de température produit un gonflement qui dépend de l'incrément de température ainsi que de la vitesse du chauffage. Ce gonflement est à l'origine de remaniement, et il est par conséquent intéressant de connaître l'influence de la vitesse de chauffage sur la consolidation thermique du matériau. Dans le paragraphe suivant nous allons étudier ce paramètre.

4. MONTEE DE 20 à 80°C à DES VITESSES DIFFERENTES :

— Après une à deux semaines de consolidation à 20°C, la température des échantillons est élevée à 80°C de 5 façons différentes (cf figure 5.21):

- 80.R : montée directe,
- 80.L : montée progressive par paliers de 5°C toutes les heures,
- 80.TL : montée progressive par paliers de 10°C tous les jours,
- 50-80.R : montée directe à 50°C, palier de 6 semaines alors puis montée finale directe,
- 50-80.L : montée progressive à 50°C par paliers de 5°C toutes les heures, après une semaine montée progressive analogue à la précédente mais cette fois-ci à la température finale.

Le but de cette série de 5 essais est d'analyser le rôle joué par la vitesse de montée en température sur les résultats de la déformation thermique.

– Les paramètres retenus pour cette partie sont:

- dh_{80} (mm) : tassement thermique total obtenu 1 mois après le début de la montée en température de 20 à 80°C,
- dh_{20} (mm) : tassement total dû à la mise sous pression de consolidation σ'_{cmax} à 20°C et ceci pendant la durée du palier allant de 1 à 2 semaines,
- v_{fluage} (mm/s) : vitesse de fluage mesurée sur la courbe $(dh - \lg(d(dh)/dt))$ à partir d'un tassement fixé,
- a_T (mm) : pente de la droite de fluage $(dh/d\lg(t))$ mesurée à partir, soit des courbes de consolidation $(dh - \lg(t))$, soit des courbes de vitesse $(dh - \lg(d(dh)/dt))$. T est la température du palier considéré.

– Ces essais ont été réalisés sur ST GENEST.N et LIMAY qui présentaient des déformations assez différentes. Les courbes $(dh - \lg(t))$ sont tracées sur la figure 5.22. La pente du fluage en prenant comme origine la fin du palier à 20°C est facilement mesurable pour les essais "80.R" et "80.L"; elle est difficilement mesurable pour les autres montées à 80°C car la partie à 80°C est très réduite et on distingue mal la fin de la partie transitoire du régime de fluage établi du fait de l'échelle logarithmique choisie. On retombe sur ce que l'on avait dit au paragraphe 4.3 à propos du choix de l'origine du temps dans un repère logarithmique. Pour comparer les vitesses de fluage des cinq essais on se réfère à la relation de LÉROUEIL (cf paragraphe 2.4.2 chapitre 2):

$$R(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, \sigma') = 0 \quad [21]$$

- ε : tassement dh
- $\dot{\varepsilon}$: vitesse de tassement en fonction du temps
- σ' : on prendra ici la pression de préconsolidation appliquée σ'_{cmax} , soit une constante dépendant du sol.

On cherche donc une relation entre ε et $\dot{\varepsilon}$.

– A 20°C, on a tracé le tassement en fonction du logarithme de la vitesse du tassement $(dh - \lg(d(dh)/dt))$ pour LIMAY et ST GENEST.N. On observe la présence de deux portions de droite (cf fig.5.23 pour LIMAY), correspondant aux deux phases de consolidation: primaire et secondaire.

On constate que pendant la consolidation primaire le fluage a une vitesse très supérieure à celle de la dissipation des pressions interstitielles; c'est par conséquent cette dernière qui impose sa cinétique. Cependant par la suite le phénomène s'inverse et le fluage, ayant une vitesse plus faible, impose alors sa cinétique.

On peut écrire pour la phase de fluage:

$$\lg\left(\frac{dh}{dt}\right) = a \cdot h + b \quad [22]$$

a, b sont déterminés grâce à une regression linéaire
h représente ici le tassement et non la hauteur de l'échantillon

On intègre l'équation [22] dans le but d'obtenir une relation entre h et t.

$$\begin{aligned} dh/dt &= 10^b \cdot 10^{a \cdot h} \\ dh \cdot 10^{-a \cdot h} &= 10^b \cdot dt \\ -\frac{1}{a \cdot \ln(10)} \left[10^{-a \cdot h} \right]_{h_0}^h &= 10^b \cdot \left[t \right]_{t_0}^t \end{aligned}$$

COURBES (dh - lg t)

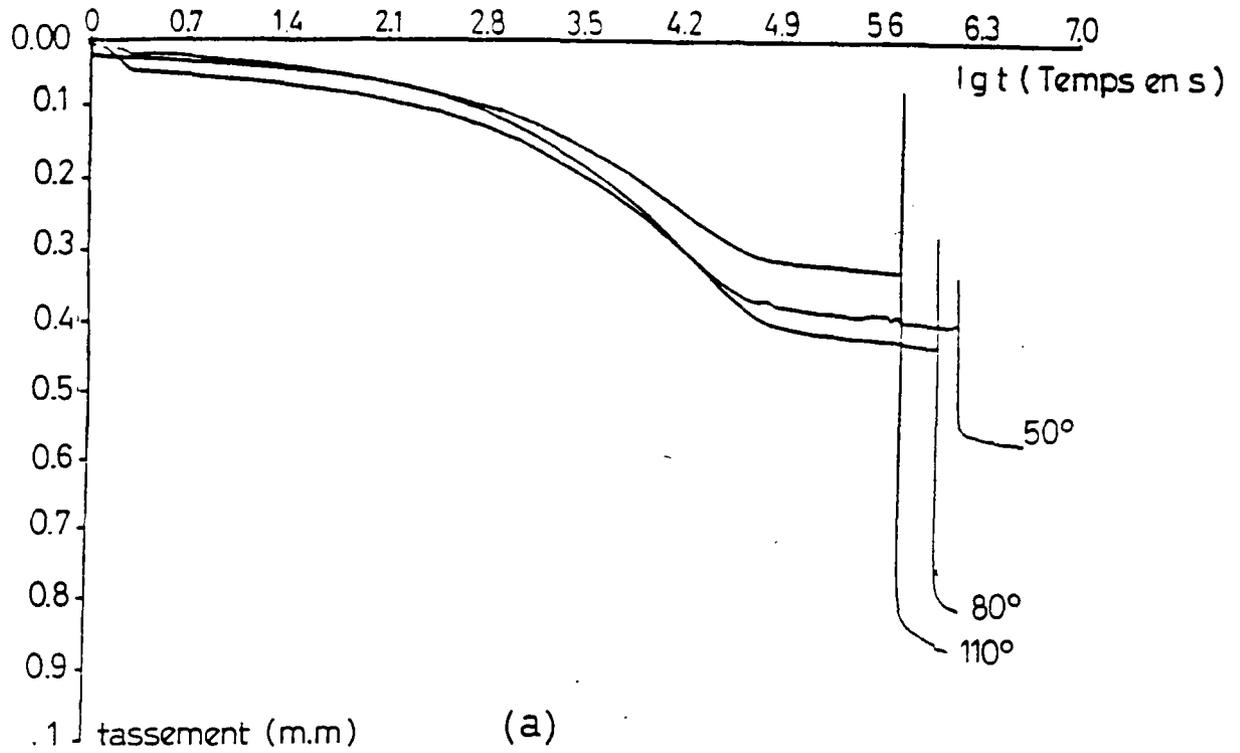
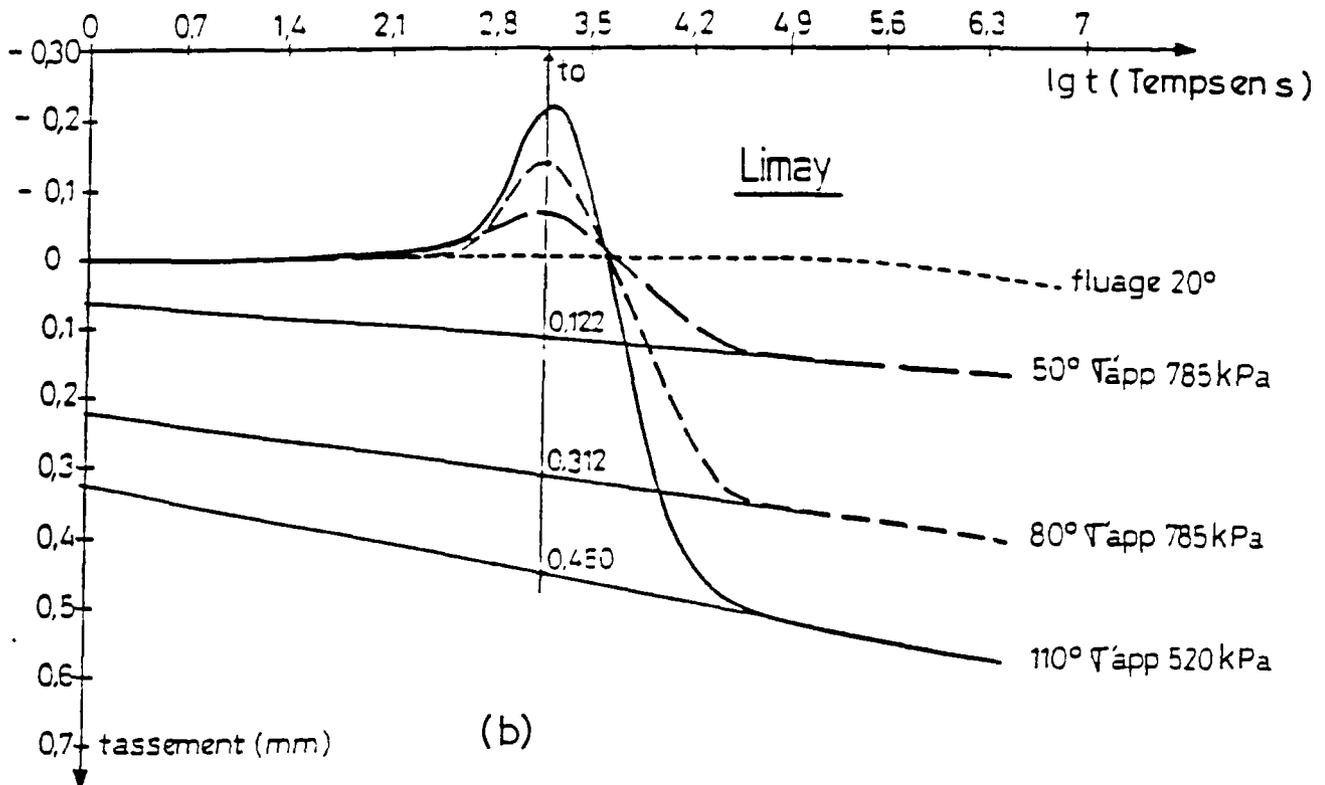
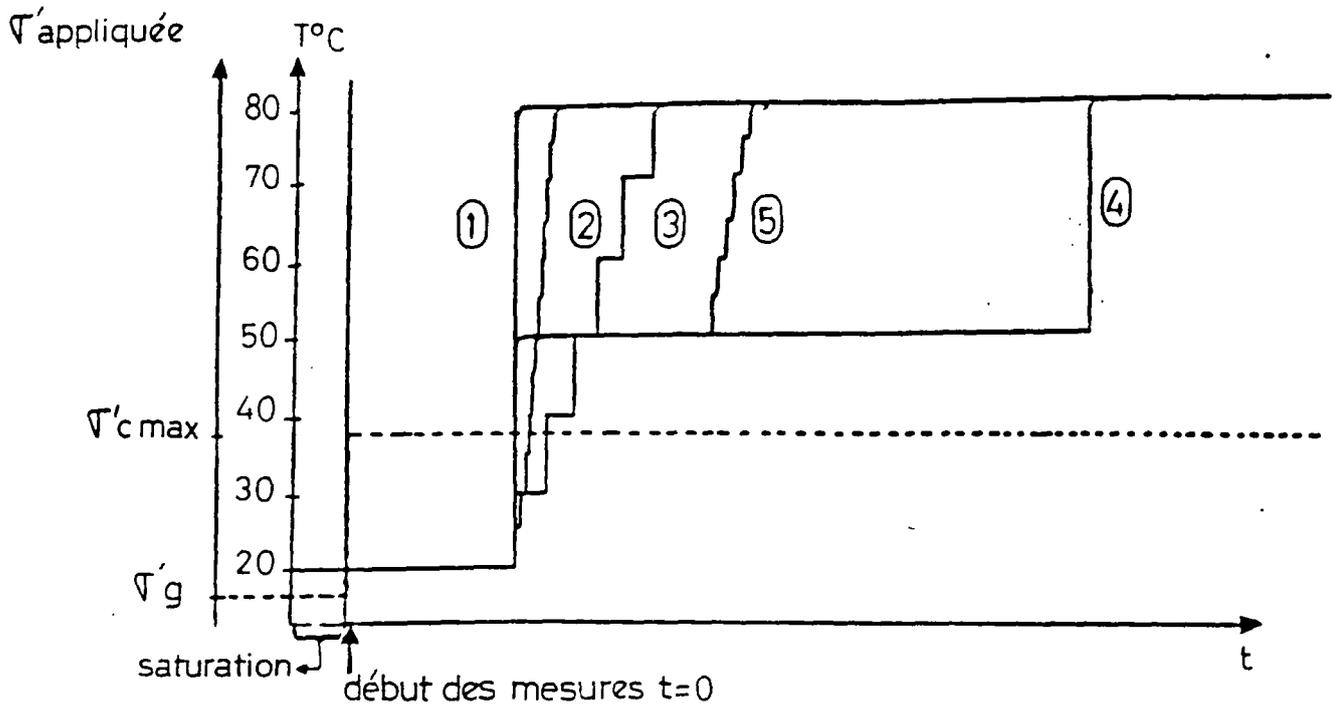


Figure 5.20 Courbes de consolidation des trois essais : 20-50, 20-80 et 20-110 sur LIMAY :
 (a) courbe complète, (b) courbe correspondant aux paliers de température supérieurs avec changement d'origine au moment du chauffage





- 1- montée rapide à 80°C "80R"
- 2- montée à 80°C par paliers de 5°C toutes les heures "80L"
- 3- montée à 80°C par paliers de 10°C tous les jours "80TL"
- 4- montée rapide à 50°C et 6 semaines après montée rapide à 80°C .. "50-80R"
- 5- montée par paliers de 5°C toutes les heures d'abord jusqu'à 50°C
et une semaine après jusqu'à 80°C "50-80L"

Figure 5.21 Schéma des cinq types de montée en température effectuées de 20° à 80°C

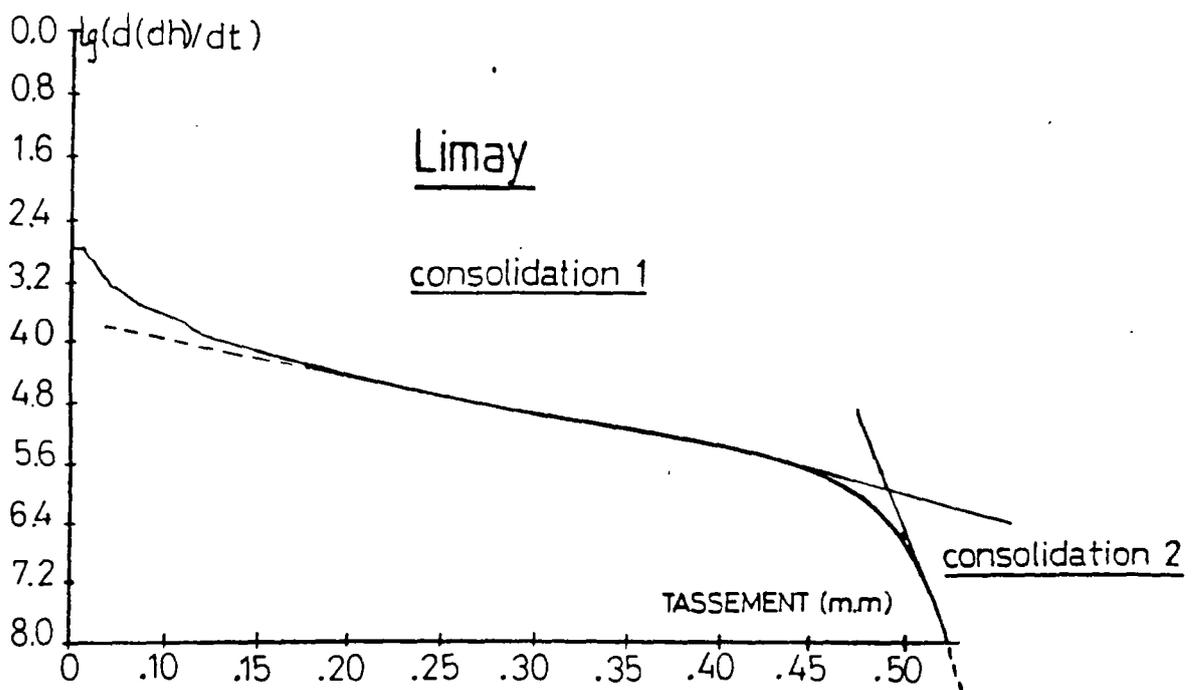


Figure 5.23 Courbe $\lg(dh/dt) - dh$ pour LIMAY à 20°C

t_0 : correspond à la fin du gonflement de l'échantillon

h_0 : correspond à la valeur du tassement à t_0 mesuré à partir de la droite de fluage prolongée aux temps faibles

$$10^{-a \cdot h} = -10^b \cdot a \cdot \ln(10) \cdot (t - t_0) + 10^{-a \cdot h_0}$$

$$-a \cdot h = \lg(\alpha_1 \cdot t + \alpha_2) \quad \text{avec:} \begin{cases} \alpha_1 = -10^b \cdot a \cdot \ln(10) \\ \alpha_2 = 10^b \cdot a \cdot \ln(10) \cdot t_0 + 10^{-a \cdot h_0} \end{cases}$$

$$h = -\frac{1}{a} \cdot \lg\left(t + \frac{\alpha_2}{\alpha_1}\right) - \frac{1}{a} \lg(\alpha_1)$$

$$h = a' \cdot \lg(t') + b' \quad \text{avec:} \begin{cases} t' = t - t_0 - (10^{-a \cdot h_0 - b}) / (a \cdot \ln(10)) \\ a' = -\frac{1}{a} \\ b' = -\frac{(b + \lg(a \cdot \ln(10)))}{a} \end{cases}$$

Le tassement est bien représenté par une droite dans un repère logarithmique du temps à condition d'effectuer le changement d'origine ainsi défini.

Ce changement d'origine ne correspond pas forcément à la fin du palier à 20°C pour nos essais. C'est le cas de l'essai "80.TL" pour lequel on observera cette droite de fluage à condition de prendre comme temps initial le début de la montée au dernier palier, c'est à dire de 70 à 80°C.

Pour les essais "80.R" et "80.L" le temps d'origine à prendre en compte pour avoir une droite de fluage n'est pas exactement la fin du palier à 20°C, mais environ 20 000 s de plus pour "80.L" et 30 000 s pour "80.R" sur LIMAY. Ces valeurs sont données à titre indicatif, car la mesure de a et b est approximative en particulier pour "80.L". Ces résultats laissent supposer que le fluage passe d'un état stable à 20°C à un autre état stable à 80°C après une phase transitoire de 20 000 s pour "80.L" et 30 000 s pour "80.R".

La méthode des vitesses nous apporte, par conséquent, des informations sur :

- la nécessité d'un changement d'origine,
- l'existence d'une période transitoire du fluage, entre son état à 20 et celui à 80°C,
- la valeur du taux de compression secondaire à 80°C, que l'on peut comparer à celui à 20°C.

Cette méthode est limitée pour deux raisons :

- la mesure des paramètres a et b est difficile pour les essais qui ont subi des perturbations, même minimales (c'est le cas de ST GENEST.N)
- le changement d'origine imposé pour chaque montée à 80°C ne permet pas la superposition des courbes et donc les comparaisons.

Les pentes du fluage a_T mesurées en prenant comme origine des temps, soit le début de la montée, soit 20 000 s après pour "80.L" et 30 000 s pour "80.R" sont à peu près les mêmes: dans le premier cas 2,7 au lieu de 2,4 et dans le deuxième 3,7 au lieu de 3. Pour comparer les essais nous prendrons pour des raisons de commodité la fin du palier à 20°C comme origine. La technique des vitesses présente l'inconvénient de ne pas présenter un bon alignement des points dès qu'il y a une perturbation des essais (telle qu'une coupure de courant entraînant un refroidissement des échantillons et une variation de son épaisseur). Ces phénomènes quand ils sont de courtes durées ne perturbent par contre pas trop les courbes de consolidation ($dh \cdot \lg(t)$). L'échantillon revient à son épaisseur antérieure, il suffit alors d'éliminer les points anormaux. La mesure de la pente du tassement en fonction du logarithme du temps est beaucoup plus précise que celle du logarithme de la vitesse.

Dans un deuxième temps on a considéré les courbes superposées en prenant comme origine pour toutes, le début des sollicitations thermiques, cf figure 5.24. Etudions le comportement de LIMAY et ST GENEST.N.

COURBES (dh - lg t)

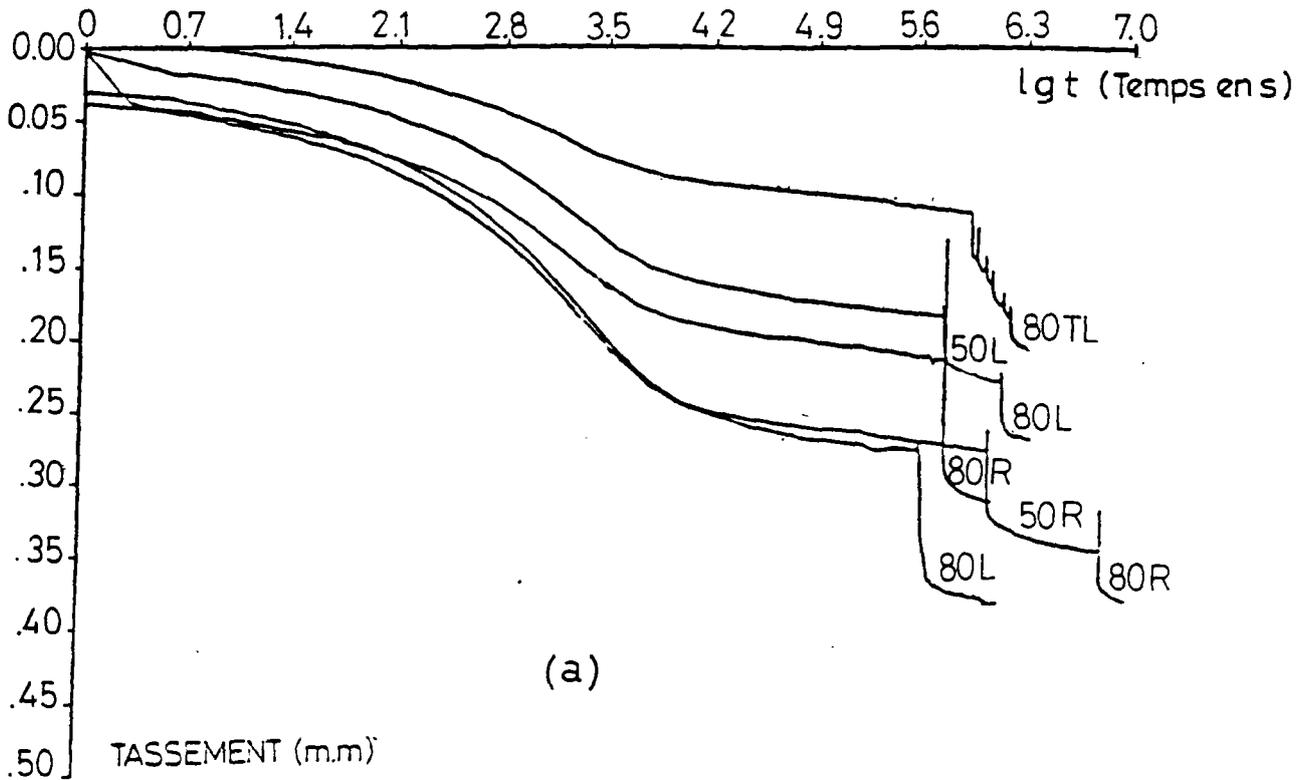
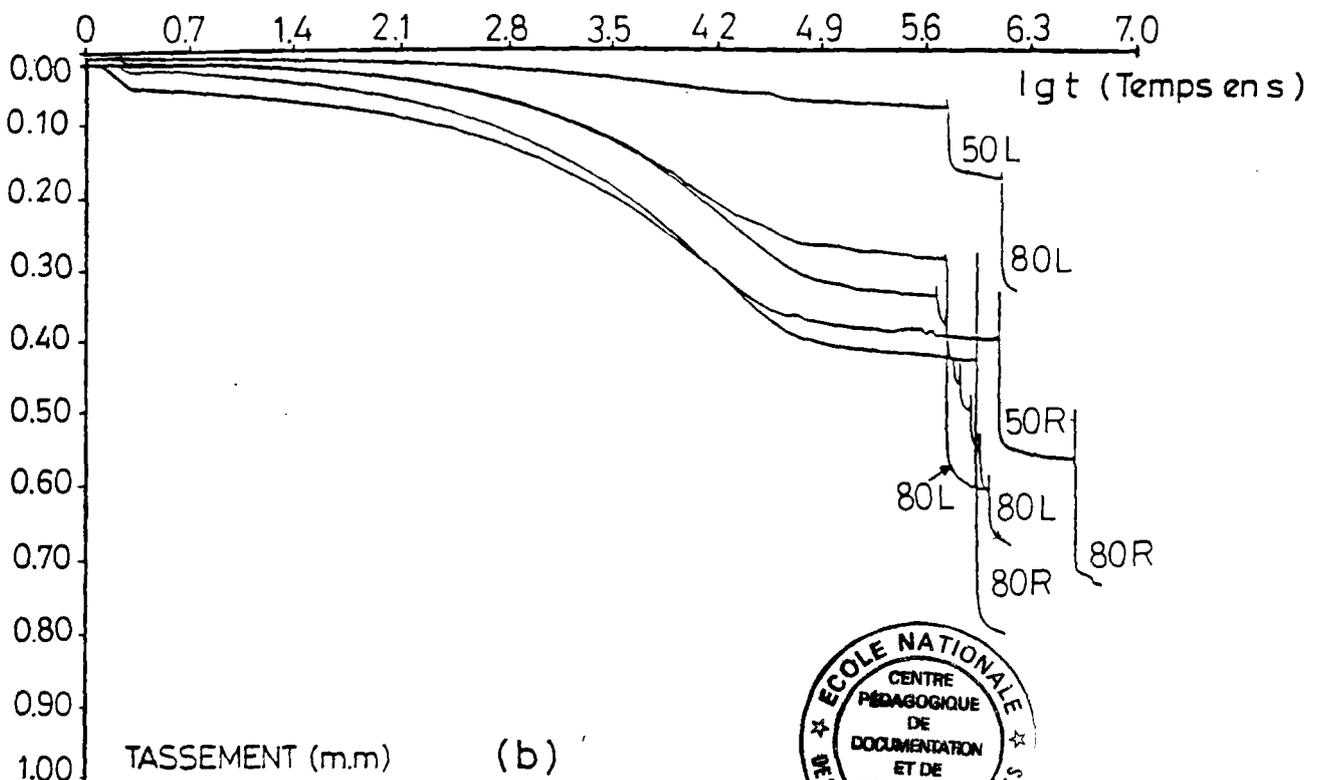


Figure 5.22 Courbes de consolidation complètes pour cinq essais de montée en température de 20 à 110°C à des vitesses différentes : (a) sur SAINT-GENEST, (b) sur LIMAY

COURBES (dh - lg t)



4.1. LIMAY

Les sollicitations thermiques étant espacées dans le temps, on mesure 15 jours après le début du premier changement de température, la vitesse de fluage à 80°C après chaque type de montée exceptée la montée notée "50-80.R" qui en est encore à 50°C. Le tableau 5.16 reproduit les différents résultats.

essai	80.R	80.L	80.TL	50-80.L
$e_0 - w_1$ %	0,775-28,8	0,701-27,8	0,685-27,2	0,739-27,5
$v_{\text{fluage}, 2s}$	$10^{-7,8}$	10^{-8}	$10^{-7,6}$	$10^{-7,6}$
$dh_{80} - dh_{80}/dh_{20}$	0,393- 91%	0,347-119%	0,350-102%	0,284-351%
a_{80} (vitesse)	2,4	2,59	2,4	2,08
a_{80} (consolid)	2,78	3,71	2,36	2,23
a_{20} (consolid)	2,1	2,52	2,33	1,07

$v_{\text{fluage}, 2s}$ (mm/s) : vitesse de fluage au bout de 2 semaines
 a_{80} et a_{20} sont en (10^{-2} mm)

Tableau 5.16 : Paramètres descriptifs du palier à 80°C après différents types de montée de 20° à 80°C pour LIMAY.

On constate après 15 jours, des vitesses proches pour les essais "80.R", "80.L" et "80.TL".

Les tassements thermiques primaires, en retirant la part due au fluage, sont difficiles à mesurer pour les essais de montée en température progressive. C'est pourquoi on mesure le tassement dh_{80} , tassement total obtenu 1 mois après le début du chauffage (extrapolé si besoin est, c'est à dire quand le temps réel de l'essai est inférieur à 1 mois). On peut le diviser par dh_{20} pour essayer de s'affranchir partiellement de la variation des paramètres initiaux: w_i, e_0 , et σ_g' . Mais on note que cela est insuffisant. En effet l'essai "50-80.L" indique un pourcentage de tassement anormalement élevé de 351 % sur lequel on ne peut pas se baser pour effectuer des comparaisons. Cet essai démarre à 20°C par un incrément de pression particulièrement faible de 25 % au lieu de 36 % pour les autres. Il faudra donc le traiter avec beaucoup de précautions. Par contre on note pour les 3 essais "80.R", "80.L" et "80.TL" des tassements après un mois du même ordre de grandeur correspondant à une augmentation du tassement suite à la sollicitation thermique de 90 % à 120 %, ce qui correspond, on le verra par la suite, aux résultats du paragraphe 5.3 pour ce matériau.

Les pentes du fluage propre à 80°C obtenues à partir des courbes de vitesse ($dh - \lg(d(dh)/dt)$) sont similaires pour les différents types de montée et ne montrent pas d'augmentation importante par rapport au palier à 20°C. Les six paliers successifs de 1 jour pour l'essai "80.TL" sont superposés figure 5.25 et présentent aussi des pentes de fluage analogues à 30, 40, 50, 60, 70 et 80°C.

4.2. ST GENEST.N

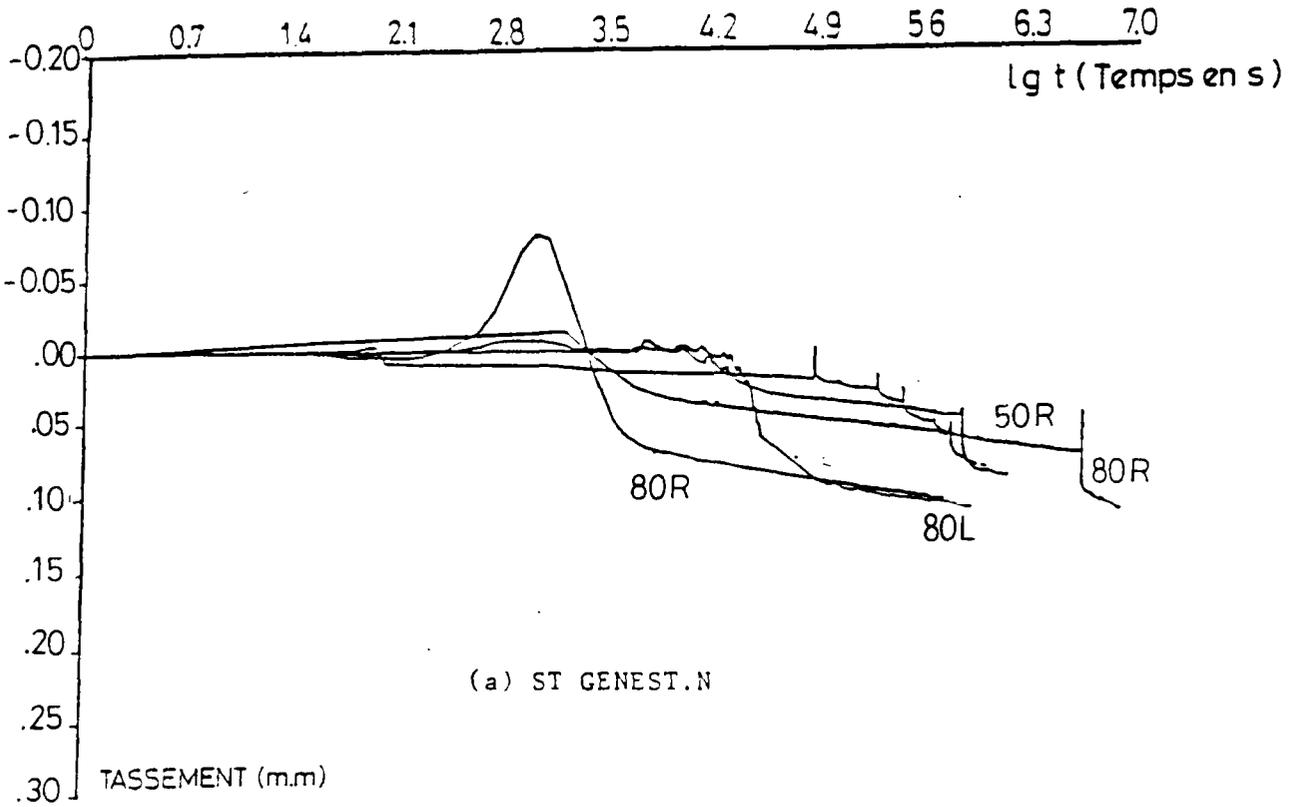
Pour cet échantillon, les mesures des vitesses sont souvent faussées en raison de petites perturbations en cours d'essai qui ne permettent pas d'interpréter les courbes ($dh - \lg(d(dh)/dt)$). Par conséquent on reportera uniquement dans le tableau 5.17 les valeurs de dh_{80} et des pentes a_{80} mesurées à partir des courbes de consolidation ($dh - \lg(t)$).

essai	80.R	80.L	80.TL	50-80.L
$e_0 - w_1$ %	0,678-26,4	0,707-27,5	0,733-28,1	0,724-27,6
$dh_{80} - dh_{80}/dh_{20}$	0,106- 50%	0,108- 37%	0,080- 50%	0,084- 45%
a_{20} (consolid)	1,3	1,22	1,15	1,37
a_{80} (consolid)	1,52	1,36	0,79	1,17

Tableau 5.17 : Paramètres descriptifs du palier à 80°C après différents types de montée de 20 à 80°C pour ST GENEST.N.

Après un mois, la sollicitation thermique a augmenté le tassement d'environ 50 % pour les 4 essais portés à 80°C, soit un tassement allant de 89 à 116 microns. Les résultats sont homogènes et les pentes du fluage, en prenant comme origine des temps le début de la dernière sollicitation thermique, ne montrent pas de différence notable avec celles du palier à 20°C, si ce n'est une

COURBES (dh - lg t)



COURBES (dh - lg t)

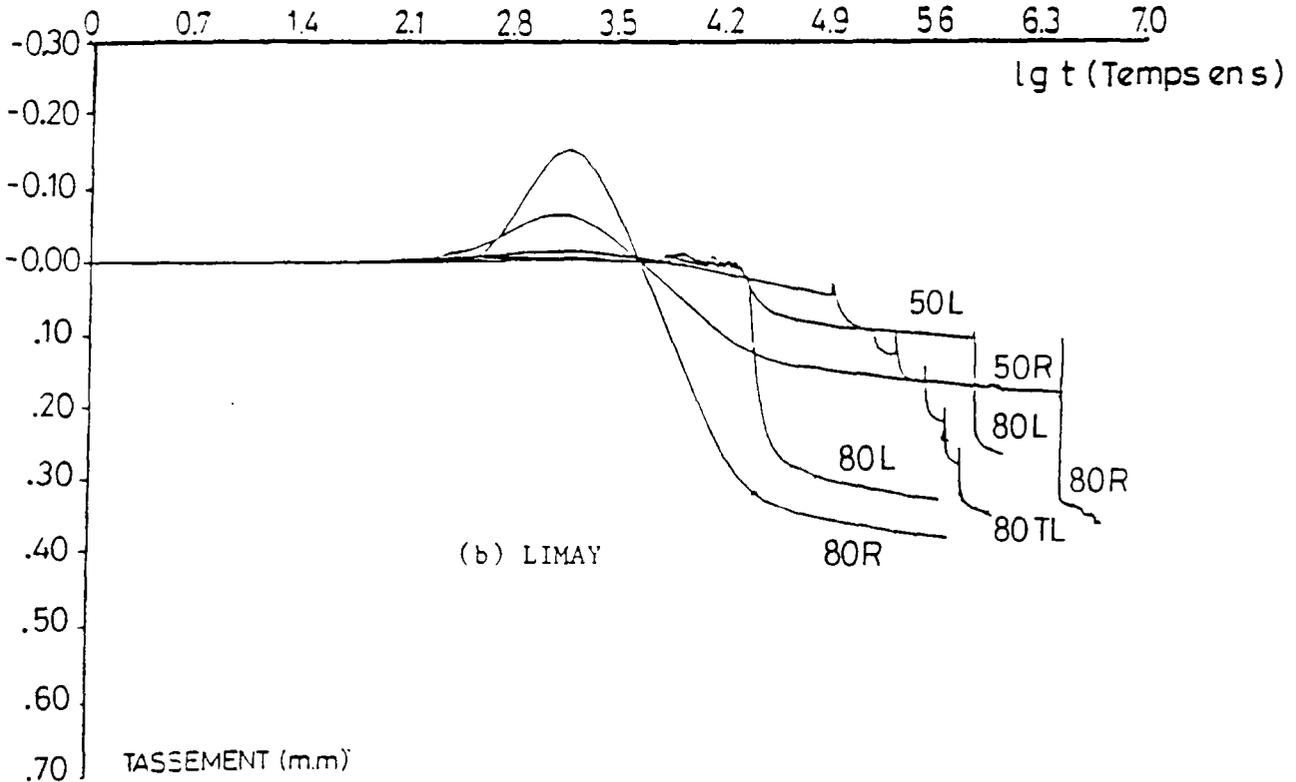


Figure 5.24 Courbes de consolidation partielles correspondant au palier de température supérieure pour les essais de la figure 5.22 avec un changement d'origine au moment du début des sollicitations thermiques

diminution dans le cas de l'essai "80.TL". Rappelons que pour ce dernier cas , la montée finale est de 10°C et non 60°C.

4.3. Conclusion

- Ce type d'essai a montré l'importance de la définition du fluage ainsi que de sa représentation.
 - le fluage correspond à la phase de la consolidation mécanique ou thermique qui suit la dissipation des surpressions interstitielles induites par le chauffage. Il est représenté par une droite sur la courbe $(dh - \lg(d(dh)/dt))$.
 - il est aussi représenté par une droite sur la courbe $(dh - \lg(t))$ à condition de bien choisir l'origine des temps. En première approximation ce choix portera sur le début du dernier incrément de température appliqué.

A partir de là, on observe que le taux C_α (pente du fluage divisé par la hauteur de l'échantillon avant l'application de la sollicitation mécanique à 20°C ou thermique à 80°C) ne varie pas de façon significative entre 20 et 80°C pour ST GENEST.N et LIMAY. Les C_α à 80°C sont très proches.

- Les tassements observés un mois après le début des sollicitations thermiques sont assez proches pour les 4 essais sur chaque argile. Ils ne nous permettent pas de conclure sur l'évolution du tassement suivant la vitesse de montée en température. On retrouve un tassement thermique dû au chauffage de 20 à 80°C pour LIMAY qui est près du double de celui de ST GENEST.N.

5. MONTEE ET DESCENTE PROGRESSIVE PAR PALIERS DE 30°C: "20-110", "20-50-20", "20-80-20", et "20-110-20"

- Sur chaque matériau, nous avons effectué 5 essais différents constitués d'une succession de montées et de descentes (sauf dans un cas) par paliers de 30°C (cf fig.5.26).

Cette série d'essais a pour but:

1) d'analyser le comportement de matériaux, différents par leur minéralogie, plasticité, perméabilité..., soumis à une même montée en température de 30°C, et d'en déduire le rôle des paramètres: minéralogie, plasticité, perméabilité...

2) de comparer les déformations induites par un même incrément de température quand les températures initiales sont différentes, de façon à estimer l'importance de ce dernier facteur

3) d'étudier l'impact d'un refroidissement suite à un échauffement et par conséquent d'en conclure sur le caractère réversible ou non de la déformation induite par une sollicitation thermique.

- Les paramètres mesurés pour conduire l'analyse ont été :

$C_{\alpha(T)}$: taux de compression à la température T (en effectuant un changement d'origine au moment de la dernière sollicitation de 30°C).
dh_{2j} (ou dh_{6s})	: déformation totale 2 jours (ou 6 semaines) après le début de la sollicitation thermique.
dh_{2j-6s}	: déformation due au fluage entre 2 jours et 6 semaines.

La figure 5.25 montre, suivant deux types de représentation, la consolidation d'un échantillon, soumis à un chargement, puis à des sollicitations thermiques successives entre 20 et 110°C. Au paragraphe précédent nous avons expliqué la raison du changement d'origine effectué au début du choc thermique et nous retiendrons par la suite uniquement ce type de représentation (2).

Les valeurs de la pente de fluage mesurées sur la courbe (1) sont plus élevées que celles de la courbe (2); elles augmentent avec T mais cela ne correspond pas réellement à une accélération du fluage. En effet elles ne correspondent pas à la pente d'une droite de fluage mais à la "pente

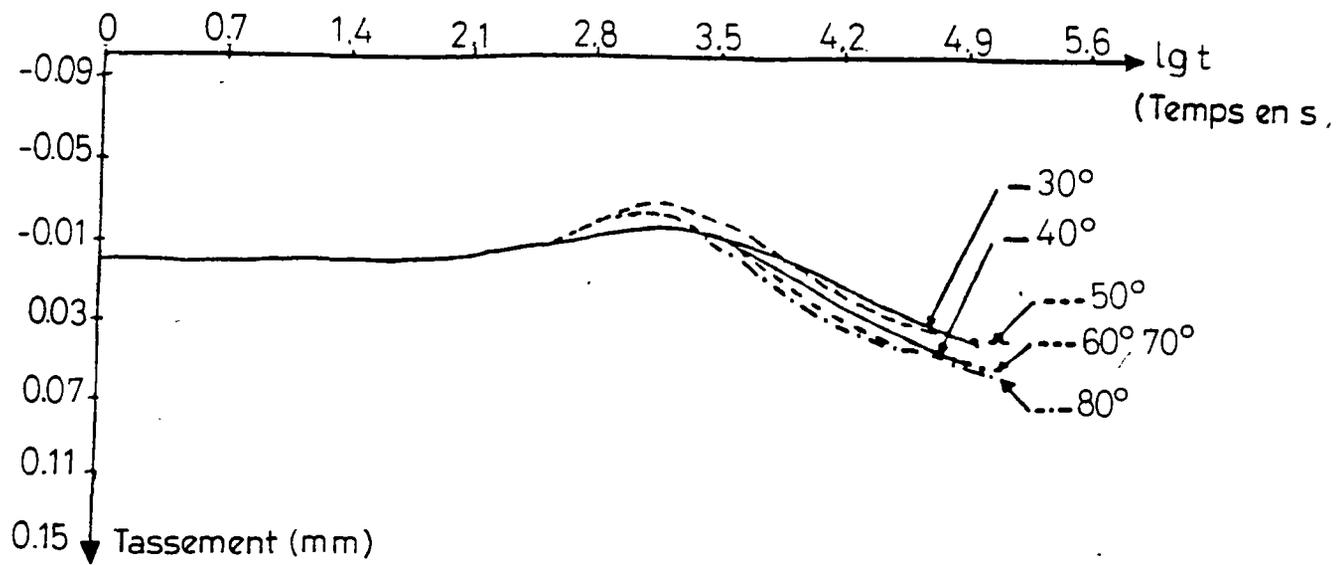
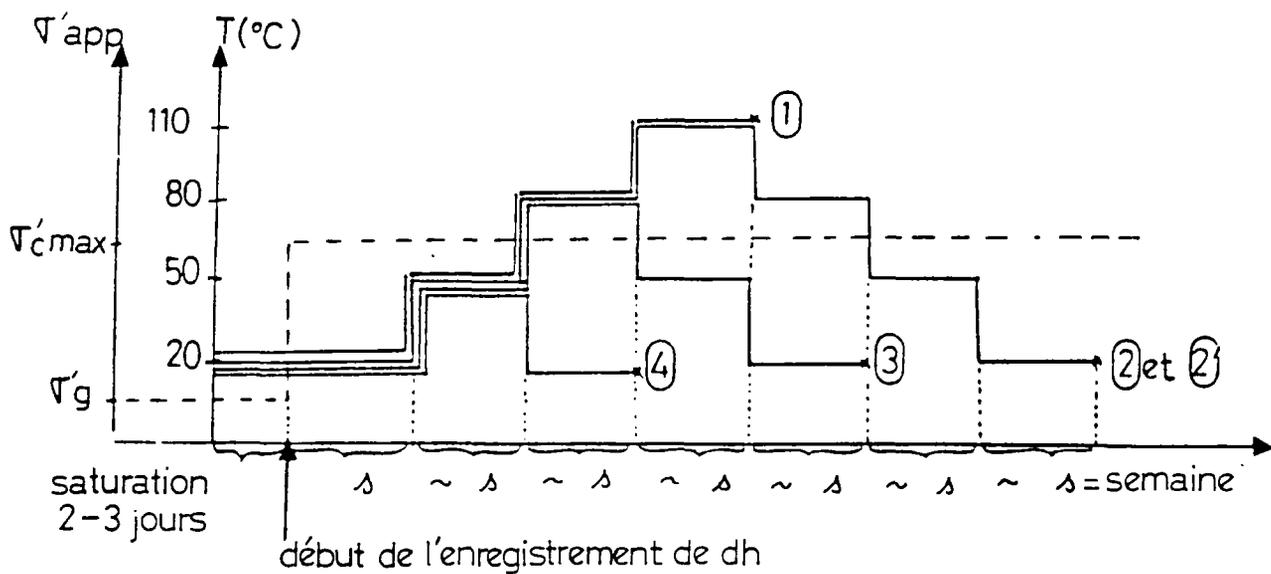


Figure 5.25 Courbes (dh - lg t) pour chaque palier de la montée progressive "20-80 TL". L'origine des temps est pour chaque courbe le début de la dernière sollicitation thermique



- 1/ "20-110"
- 2/ "20-110-20" : Montées de 30°C rapides et paliers de 6 semaines
- 2' "20-110-20(n)" : Montées de 30°C par palier de 5°C/heure, paliers à 50, 80 et 110°C de 1 semaine pour la montée.
- 3/ "20-80-20"
- 4/ "20-50-20"

Figure 5.26 Schéma de principe des essais de montée et descente progressives par paliers de 30°C

moyenne" d'une portion de courbe du fluage. La dérivée (pente en chaque point) de cette courbe diminue avec le temps jusqu'à atteindre la valeur de la pente mesurée sur la courbe (2).

Ainsi après une sollicitation thermique il ne faut pas confondre une accélération du fluage thermomécanique (courbe(1)) avec une relance de la consolidation thermique (courbe(2)) lors du chauffage, équivalente à un nouveau palier de chargement pour un essai oedométrique classique.

On étudie, avec pour choix de l'origine des temps les courbes du type (2) de la figure 5.27, les différents paliers d'une montée et d'une descente en température progressive.

5.1. LAGNY

— Les réponses aux sollicitations thermiques dues au chauffage de 30°C donnent des courbes de consolidation (courbes en annexe) d'allure générale analogue, quelque soit la température initiale; à savoir :

- un gonflement d'environ 30 micromètres,
- un tassement thermique primaire faible allant de 4 à 19 micromètres,
- un fluage qui apporte après 2 mois plus des deux tiers du tassement thermique, voire 90 % pour l'essai "20-110-20",
- le tassement total après 2 mois est aux alentours de 50 micromètres.

— Les différences apparaissent au niveau du C_α qui augmente dans l'ensemble de 20 à 110°C (cf fig.5.28). Cette augmentation est bien marquée et la plus importante dans le cas de l'essai "20-110-20(n)", pour lequel les montées de 30°C se font progressivement par paliers de 5°C toutes les heures. Pour avoir une droite il faut prendre comme origine des temps le début de la dernière sollicitation thermique, c'est à dire la dernière montée de 5°C, soit environ 5 heures après la première montée de 5°C. Pour l'essai "20-110-20(n)" les valeurs sont un peu surévaluées, car l'origine des temps a été prise au début de la montée de 30°C. Mais leur évolution relative d'un palier à 50, 80 ou 110°C à l'autre reste vrai, d'où une augmentation réelle de ce paramètre avec la température.

En fait, dans certains cas on remarque que le fluage pour les paliers à 50, 80 ou 110°C (dans l'essai "20-110-20(2)" par exemple), ressemble à une courbe ou à la succession de deux portions linéaires. La pente de la deuxième droite est plus élevée que la première et correspond à une consolidation tertiaire. Cette troisième phase peut avoir deux explications :

- un départ de matière en bordure de piston mais on devrait retrouver un comportement analogue pour les autres sols, ce qui n'est pas le cas;
- une déformation permanente des vides "interlamellaires". DERJAGUIN et al (1986) avaient observé que l'eau d'hydratation pouvait quitter partiellement l'espace interlamellaire, déclenchant ainsi un affaissement de la microstructure du squelette quand celui ci est soumis à une force. PUSH et GUVEN (1988) avaient observé sur une bentonite-Na chauffée à 150-200°C un changement irréversible de la structure vers des groupes plus denses, et des vides plus grands entre ces groupes. On verra par la suite, lors de l'étude texturale, que la distance intercouches des smectites est passée de 14 à 10 Å quand la température augmente. Ce phénomène est progressif et lent.

Ces courbes de fluage particulières sont mieux représentées par le modèle de FELIX que par une droite.

— Lors de la descente en température par palier de 30°C, les courbes après correction des effets dus aux appareils de mesure (cf chapitre.4 paragraphe 1.5.2) apparaissent comme des droites pratiquement horizontales; C_α est donc quasiment nul. On observe après des perturbations diverses comme une coupure de courant, une chute de la pression interstitielle, un retour à l'état normal avec un léger gonflement supplémentaire, ce qui crée une pente de fluage négative pour la courbe (dh-lg(t)). Dans le cas de l'essai "20-80-20" on mesure un C_α de (-8.10^{-5}) donc dix fois plus faible que lors des montées en température et de signe opposé.

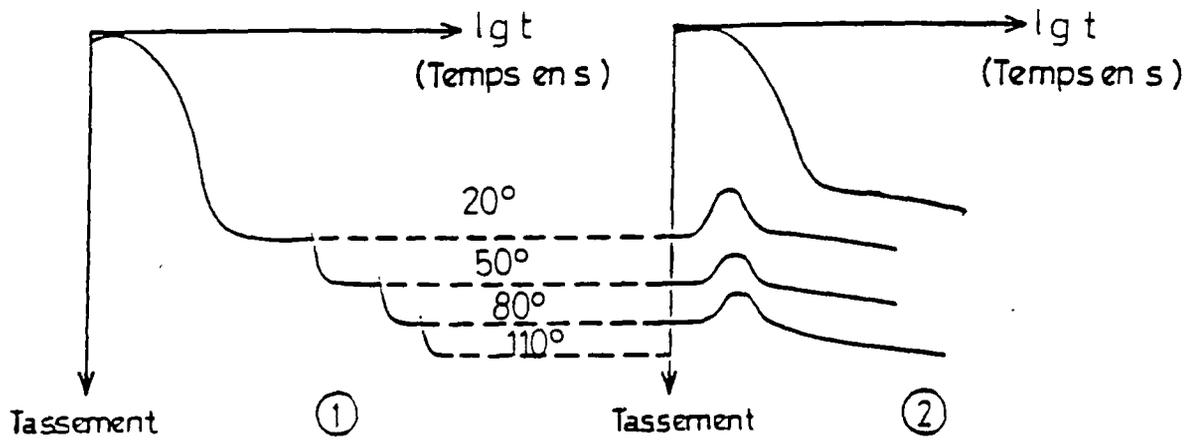


Figure 5.27 Deux types de représentation d'une consolidation (dh - lg t) :
 (1) classique
 (2) avec changement d'origine à chaque nouvelle sollicitation thermique

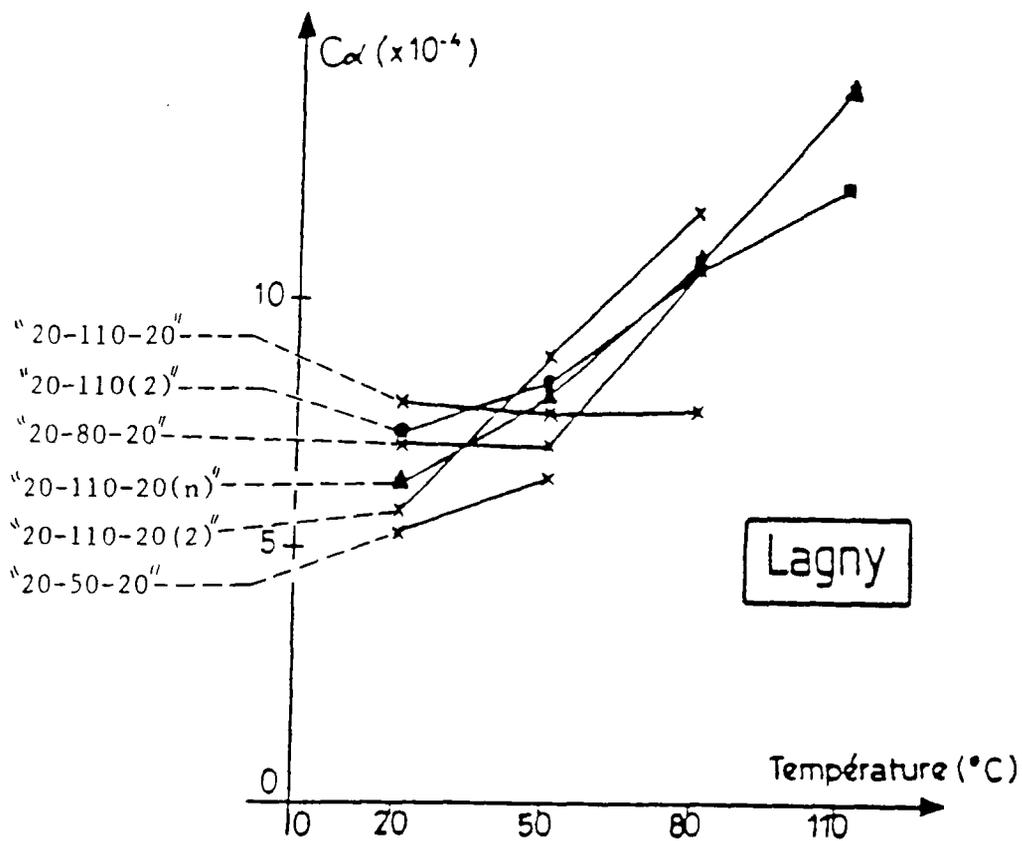


Figure 5.28 Evolution du $C\alpha$ pour des incréments de température de 30° sur LAGNY

– On a tracé sur la figure 5.29 les déformations verticales cumulées de l'éprouvette pour les différents essais. On reproduit dans le tableau 5.18 les déformations verticales après deux jours et après six semaines, pour chaque palier de T et pour tous les essais effectués.

essai	20-110(2)	20-110-20	20-110-20(2)	20-110-20(n)
50°C dh [2j 2j]-6s	0,032 0,030	0,022 0,023	0,042 0,016	0,032 0,028
80°C dh [2j 2j]-6s	-	0,015 0,023	0,032 0,037	0,036 0,035
110°C dh [2j 2j]-6s	0,026 0,042	-	0,036 0,039	0,045 0,047

Tableau 5.18 : Tassements (mm) consécutifs à chaque palier de 30°C des essais effectués sur LAGNY.

On constate que pour un OCR de 1, la déformation augmente largement avec la température mais aussi avec le temps, en raison du fluage de ce matériau. Le fluage constitue la majeure partie de la déformation.

5.2. ST GENEST.N

– Les réponses aux sollicitations thermiques d'un échauffement de 30°C sont des courbes (cf en annexe) proches de celles de LAGNY. On y observe :

- un gonflement d'environ 30 micromètres,
- un tassement thermique primaire faible voire même négatif,
- un fluage qui constitue la part essentielle du tassement après deux mois,
- un tassement total qui varie de 30 à 68 micromètres après deux mois. L'amplitude de ce tassement est plus faible à 110°C qu'à 50°C dans le cas d'un incrément de température de 30°C appliqué rapidement pour les deux. Par contre quand la montée est progressive, c'est à dire par paliers de 5°C toutes les heures, on constate le phénomène inverse soit une augmentation du tassement total après deux mois, ou même deux jours, entre 50 et 110°C.

– On reporte sur la figure 5.30 l'évolution du taux de compression secondaire C_α avec la température et on observe une quasi constance de ce taux quelque soit la température finale, excepté pour les montées lentes. Mais si on effectue un changement d'origine correspondant au début de la dernière sollicitation thermique de 5°C on obtient à 110°C pour le C_α de l'essai "20-110-20(n)" 7,04 au lieu de 10,66 et 5,67 au lieu de 7,15 pour l'essai "20-110-20(n.2)".

On trace sur la figure 5.31 l'évolution de la déformation cumulée après chaque palier de température. Les déformations pour chaque palier après 2 jours ou 6 semaines sont reproduites dans le tableau 5.19.

essai	20-50-20	20-80-20	20-110-20	20-110(2)	20-110-20(n2)
50°C dh [2j 2j]-6s	0,022 0,010	0,048 0,018	0,034 0,015	0,028 0,019	0,028 0,023
80°C dh [2j 2j]-6s	-	0,024 0,014	0,015 0,017	0,017 0,017	0,028 0,023
110°C dh [2j 2j]-6s	-	-	0,011 0,016	0,017 0,017	0,039 0,029

Tableau 5.19 : Tassements (mm) consécutifs à chaque palier de 30°C des essais effectués sur ST GENEST.N.

– On constate que chaque montée en température de 30°C correspond à une relance de l'essai avec pratiquement la même pente de fluage; d'autre part les tassements thermiques primaires sont

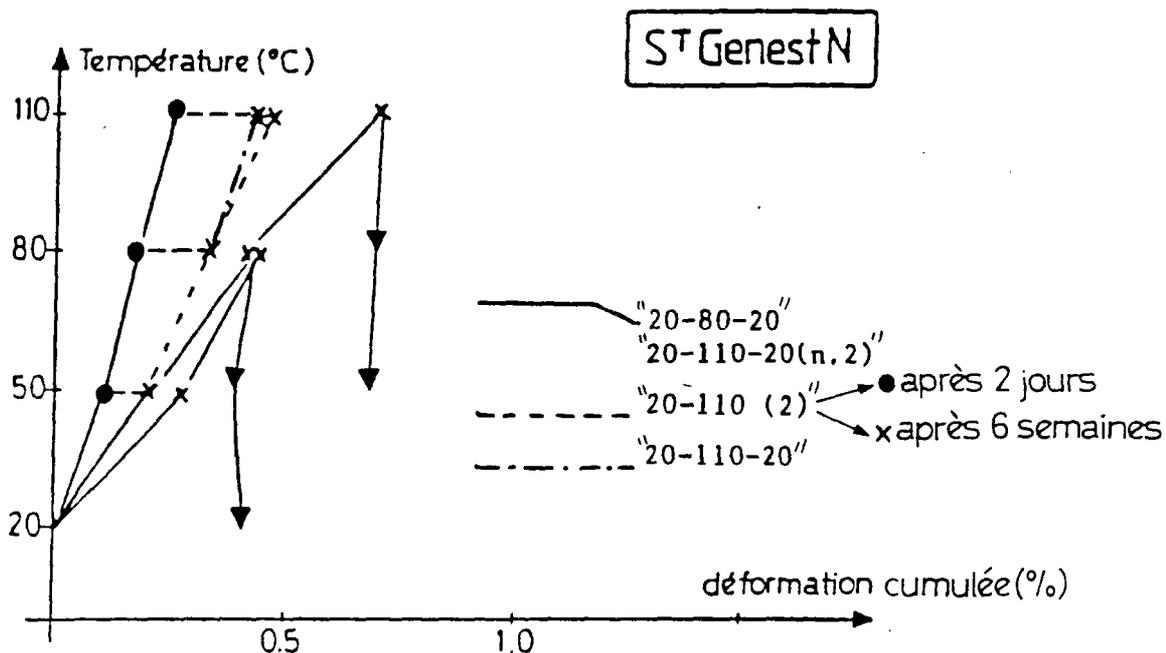


Figure 5.29 Evolution de la déformation verticale d'une éprouvette d'argile de SAINT-GENEST N. suite à une succession de montées en température de 30°C

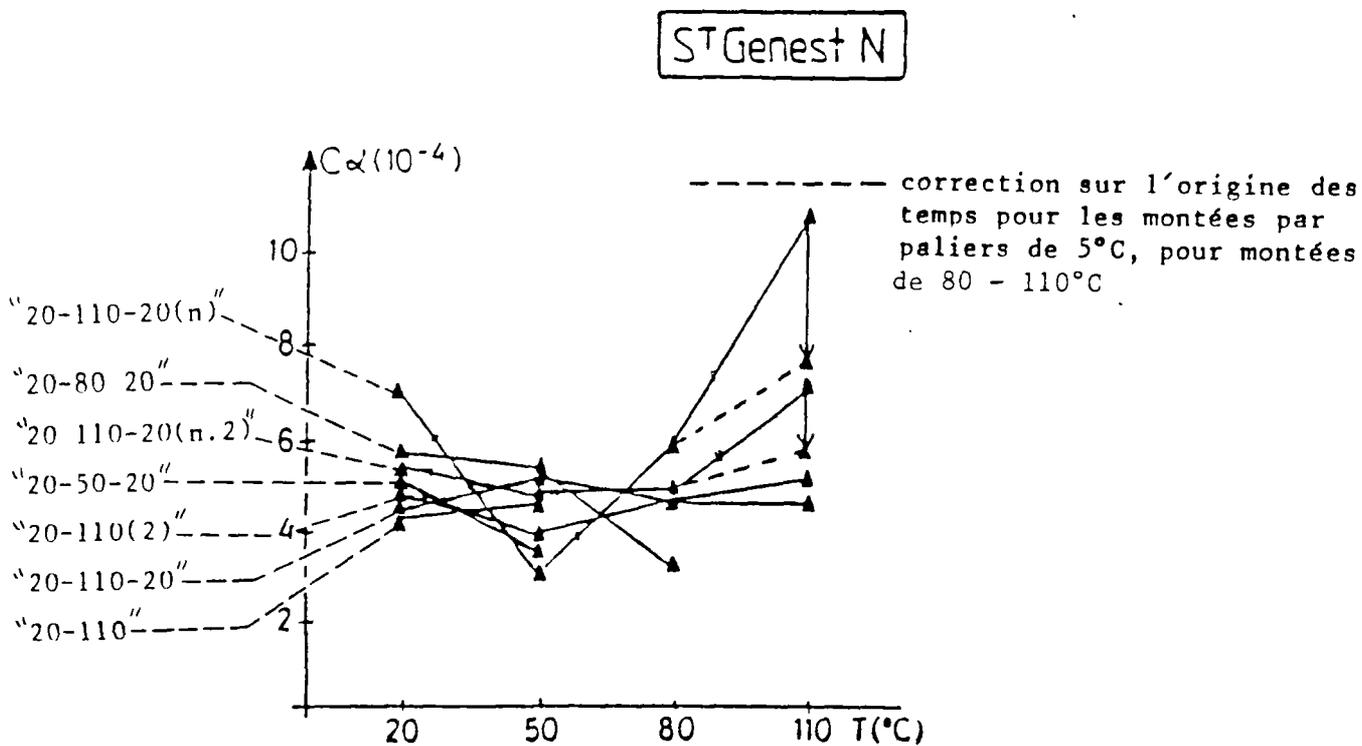


Figure 5.30 Evolution du $C\alpha$ pour des incréments de température de 30°C sur SAINT-GENEST N.

quasiment nuls. Par conséquent on peut faire des prévisions sur le tassement au temps t après une succession de paliers de 30°C . Pour cela il faut connaître au départ la courbe de consolidation à 20°C ; cet essai peut être effectué sur deux jours et nous donne le tassement mécanique primaire $dh_{1,20}$, qui ne comprend pas le fluage, ainsi que la pente du fluage à 20°C .

– Lors du refroidissement à 80 et 50°C on observe un très faible gonflement qui correspond à une phase secondaire avec un C_{α} de (-5) à $(-8).10^{-5}$. Le refroidissement de l'échantillon est un phénomène beaucoup plus lent que le chauffage, c'est pourquoi on n'observe pas de déformation. Cependant à 20°C on observe un tassement primaire de 6 micromètres pour l'essai "20-80-20" suivi par une phase de pente nulle. Ce comportement différent pour le refroidissement à 20°C par rapport à 50 ou 80°C provient du fait que la descente à cette température est rapide en raison de la mise en route d'un circuit de refroidissement (serpentin en cuivre dans lequel circule l'eau) dans le bain thermostaté. On observe alors une réponse d'allure opposée à celle d'une montée en température, soit une souspression interstitielle qui entraîne une augmentation de la pression effective et un tassement très faible: on peut envisager la création de bulles de gaz dans l'eau interstitielle sous l'effet de la contraction de l'eau et qui limiterait ainsi la sous-pression interstitielle et donc l'augmentation de σ' .

5.3. ST GENEST.G

– Les courbes de consolidation thermique (en annexe) consécutives à des montées de 30°C sont moins régulières que pour les deux échantillons précédents, excepté pour l'essai "20-110-20(n)" dont les trois paliers à 50 , 80 et 110°C se superposent assez bien. On observe un tassement nettement supérieur à 50°C qu'à 80°C , et un peu supérieur à 80°C qu'à 110°C .

– On observe un tassement primaire non négligeable et le taux de compression secondaire présente une tendance à la baisse avec la température (cf figure 5.25). A 20 et 50°C il est bien supérieur aux valeurs de ST GENEST.N; à 80°C il rejoint les valeurs de ce dernier.

– Lors du refroidissement la hauteur de l'échantillon ne varie pas du tout.

essai	20-50-20	20-80-20	20-110-20	20-110-20 (n)	20-110
50°C $dh_{[2]}^{[2]}-6s$	0,028 0,023	-	0,081 0,034	0,084 0,029	0,062 0,019
80°C $dh_{[2]}^{[2]}-6s$	-	0,026 0,011	0,044 0,018	0,069 0,028	-
110°C $dh_{[2]}^{[2]}-6s$	-	-	0,025 0,006	0,063 0,030	-

Tableau 5.20 : Tassements (mm) consécutifs à chaque palier de 30°C des essais effectués sur ST GENEST.G.

5.4. LIMAY

– Les courbes (en annexe) des différents paliers ont une allure analogue. Dans l'ensemble la consolidation après une montée de 20 à 50°C présente un tassement supérieur aux autres montées et surtout supérieur à la consolidation due au passage de 80 à 110°C . Cet échantillon présente une forte déformation suite à l'échauffement. Les caractéristiques de la courbe sont :

- un gonflement d'environ 60 micromètres à 50°C , et de 70 à 80 micromètres à 80 et 110°C ,
- un tassement primaire très important,
- un fluage analogue à celui de l'argile de LAGNY, mais en proportion ici plus faible,
- un tassement total élevé après deux mois.

– La figure 5.34 présente l'évolution du taux de compression secondaire C_{α} avec la température. On ne distingue pas de comportement net et général mais ici la majeure partie du tassement thermique est due à la phase primaire.

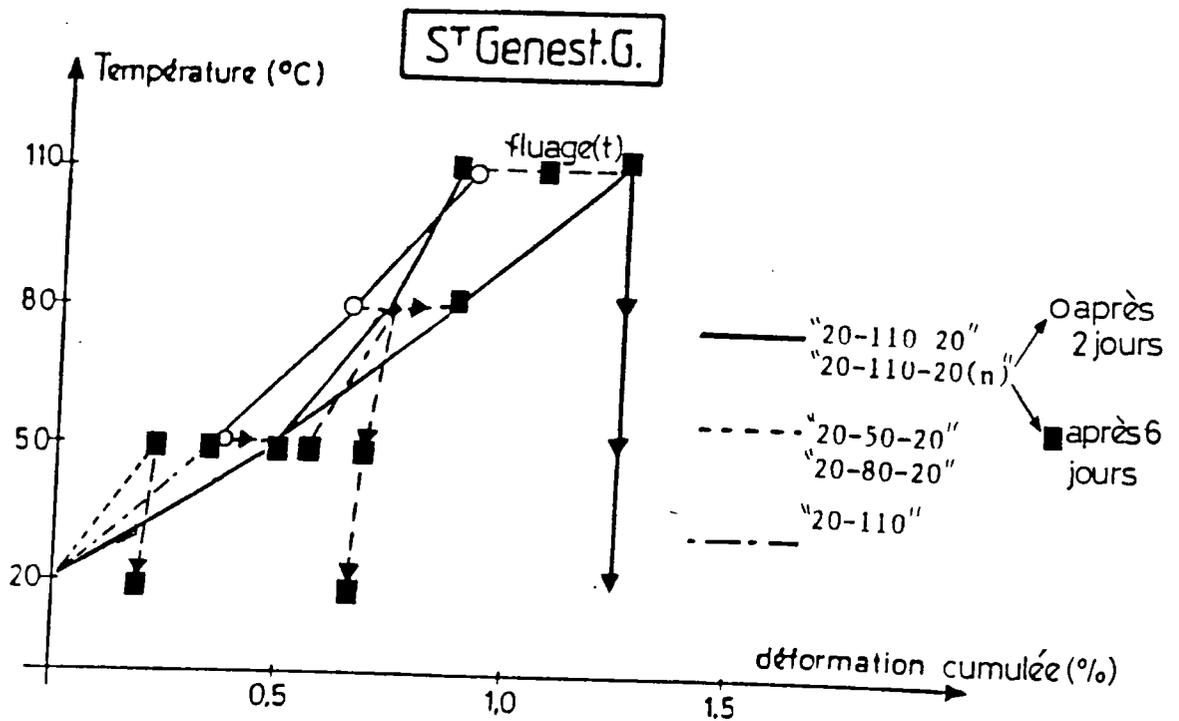


Figure 5.32 Evolution de la déformation verticale d'une éprouvette d'argile de SAINT-GENEST G. suite à une succession de montées en température de 30°C

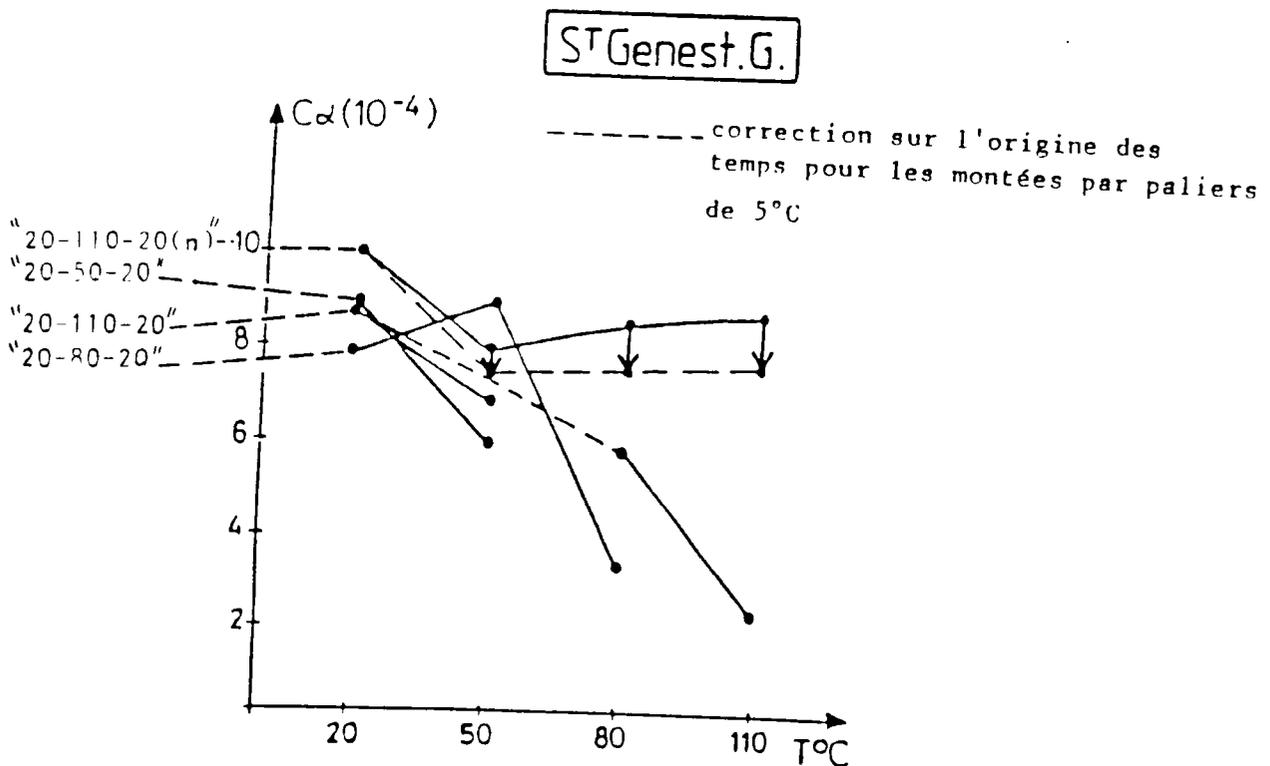


Figure 5.31 Evolution du $C\alpha$ avec des incréments de température de 30°C sur SAINT-GENEST G.

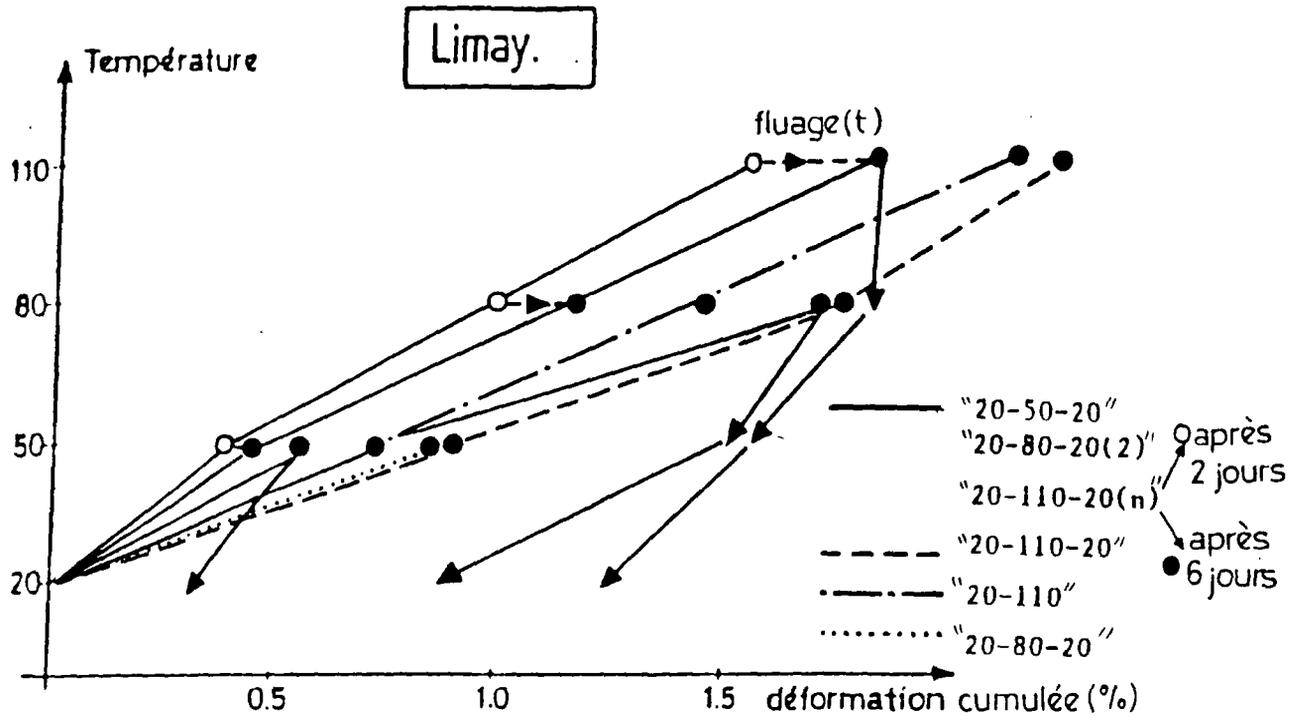


Figure 5.34 Evolution de la déformation verticale d'une éprouvette d'argile de LIMAY suite à une succession de montées en température de 30°C

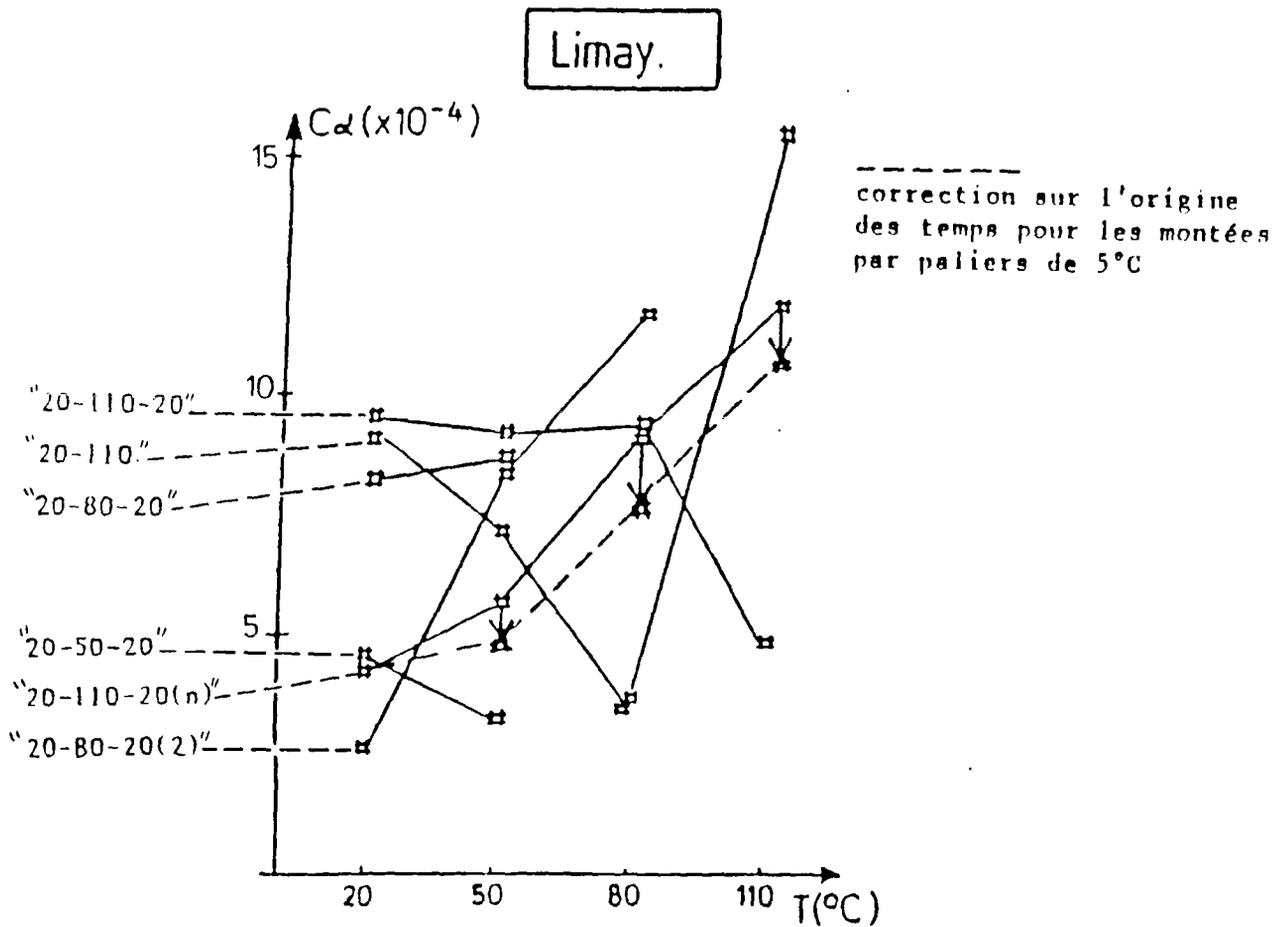


Figure 5.33 Evolution du $C\alpha$ avec des incréments de température de 30°C sur LIMAY

Le tableau 5.21 montre l'évolution de la déformation avec la température du palier après deux jours ou six semaines. Celle-ci est bien supérieure à celle des autres échantillons en raison de l'amplitude du tassement primaire. Sur la figure 5.35, on a tracé les courbes ($\epsilon_{cumulée-T}$).

essai	205020	208020	208020 (2)	2011020	2011020 (n)	20110
50°C dh $\left[\begin{smallmatrix} 2 \\ 2 \end{smallmatrix} \right]_{-6s}$	0,119 0,012	0,181 0,022	0,141 0,031	0,184 0,028	0,091 0,015	0,156 0,016
80°C dh $\left[\begin{smallmatrix} 2 \\ 2 \end{smallmatrix} \right]_{-6s}$	-	-	0,197 0,044	0,175 0,037	0,144 0,025	0,156 0,016
110°C dh $\left[\begin{smallmatrix} 2 \\ 2 \end{smallmatrix} \right]_{-6s}$	-	-	-	0,093 0,016	0,134 0,031	0,112 0,050

Tableau 5.21 : Tassements (mm) consécutifs aux différents paliers de 30°C des essais effectués sur LIMAY.

— On observe lors du refroidissement un gonflement de l'échantillon qui correspond à un déchargement pour un essai oedométrique classique. Ce gonflement pour un palier augmente quand la température diminue et on mesure un "taux de gonflement secondaire" par analogie avec un taux de compression secondaire qui n'est pas négligeable :

- $1,3 \cdot 10^{-4}$ mm pour 110-80
 - $4,3 \cdot 10^{-4}$ mm pour 80-50
 - $5,6 \cdot 10^{-4}$ mm pour 50-20
 - $3,0 \cdot 10^{-4}$ mm pour 50-20
- } essai "20-110-20(n)"
essai "20-50-20" (cf fig.5.36)

5.5. Conclusion

Nous avons dans cette partie étudié les courbes de consolidation thermique suite à un échauffement de 30°C sur quatre matériaux et à des températures initiales différentes. La comparaison des résultats nous amène à faire cinq observations :

1) La déformation mesurée sur l'argile de LIMAY est bien supérieure à celle de LAGNY ou ST GENEST d'un facteur de 2,5 à 3 pour des teneurs en eau initiales des échantillons proches. Cette différence doit avoir plusieurs causes qui agissent simultanément, et qui sont :

- une variation de la double couche avec la température d'autant plus importante que cette double couche, liée à la surface spécifique, est élevée;
- un indice de plasticité élevé, de 84 %, alors qu'il est plus faible pour LAGNY (35 %) et ST GENEST (49 %);
- une très faible perméabilité qui freine la dissipation des surpressions interstitielles lors de l'expansion thermique de l'eau. Ceci a pour conséquence un fort gonflement soit une forte perturbation ou dislocation du squelette solide suivi d'un réarrangement important.

2) Pour une même sollicitation thermique la déformation de LAGNY, après deux jours ou six semaines, est supérieure à celle de ST GENEST.N. Cette différence peut provenir en partie de la teneur en eau plus faible pour les échantillons de ST GENEST.N (aux alentours de 26%) que pour les échantillons de LAGNY (aux alentours de 30 %). En effet les résultats de l'essai "20-80-20" sur l'échantillon de ST GENEST.N ayant une teneur en eau initiale de 29 % indiquent à 80°C une valeur similaire à celles de LAGNY pour des teneurs en eau proches de 30 %.

3) La déformation observée sur ST GENEST.G est bien supérieure à celle observée sur ST GENEST.N et cette différence provient essentiellement de la phase primaire. Pour ces deux matériaux la double couche doit être à peu près la même et ne peut donc être la cause du tassement thermique primaire plus fort pour ST GENEST.G. L'explication réside vraisemblablement dans le gonflement libre initial pour ST GENEST.G qui a pour conséquence d'augmenter la porosité. La pression effective appliquée ne suffit pas à ramener cette porosité à sa valeur initiale; de plus elle entraîne un réarrangement structural qui n'est pas exactement le même que celui d'un échantillon intact replacé à sa pression de consolidation.

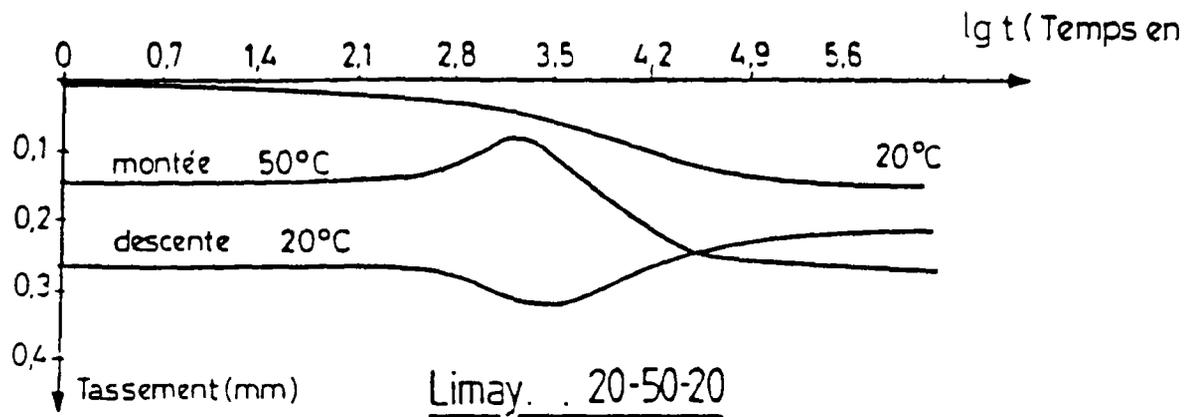


Figure 5.35 Courbe (dh - lg t) pour un cycle 20-50-20° sur LIMAY

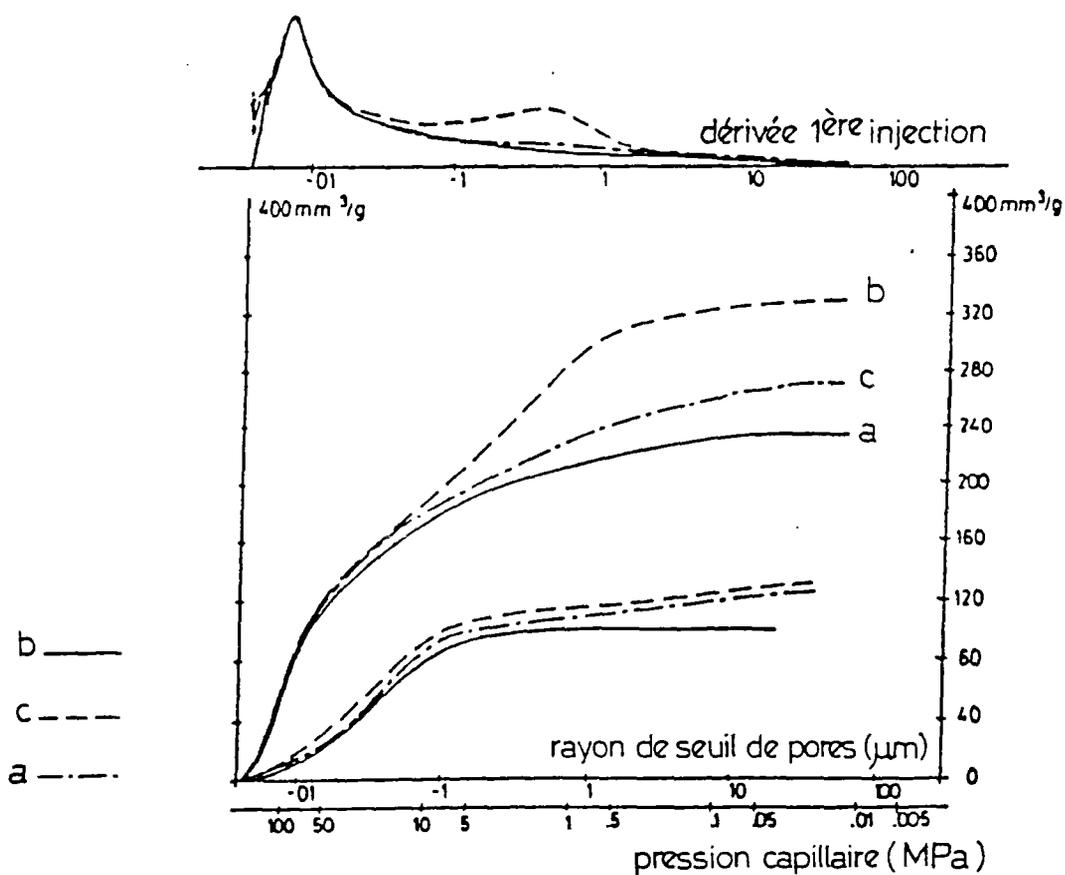


Figure 5.36 Courbes porosimétriques de l'argile de SAINT-GENEST : (a) intacte, (b) gonflée, (c) gonflée puis tassée

4) Les paliers à 50°C ont en commun pour tous les sols le fait qu'ils présentent un tassement supérieur à celui des paliers à 110°C. Or :

- on sait que le potentiel plastique évolue avec la température. Cette évolution peut jouer un rôle entre les états à 50 et 110°C.
- chaque incrément de température entraîne tout d'abord une dislocation partielle de la structure en détruisant de nombreux liens puis s'établit un nouvel état d'équilibre plus stable. Ce nouvel état plus stable sera moins sensible à un nouveau choc thermique de 30°C.
- d'autre part la viscosité diminue de $0,4556 \cdot 10^{-3}$ Pa.s entre 20 et 50°C, alors qu'elle diminue de $0,1013 \cdot 10^{-3}$ Pa.s entre 80 et 110°C. Or on sait que dans une consolidation mécanique cette viscosité joue un rôle primordial par l'intermédiaire du coefficient de perméabilité. Une perméabilité plus forte à 110°C permet une dissipation des surpressions interstitielles rapide et par suite un tassement primaire plus faible qu'à 50°C.

5) Le refroidissement permet de voir le caractère irréversible de la déformation induite par le chauffage. Les quatre matériaux présentent ce phénomène mais les résultats ne sont pas analogues. Pour LAGNY et ST GENEST le refroidissement est suivi d'un tassement nul ou très faiblement négatif et sans phase secondaire. Par contre pour LIMAY, on observe un gonflement primaire suivi d'une phase secondaire qui a une allure opposée à celle du fluage quand on chauffe, soit une droite dans un repère ($dh - \lg(t)$) de pente négative. Ce comportement particulier de LIMAY peut être attribué à la macroporosité plus importante de ce matériau.

6. ETUDE DE LA TEXTURE

La déformation unidimensionnelle des argiles dont on constate les effets macroscopiques, est due à des phénomènes qui se développent à l'échelle microscopique. Elle consiste en une réorganisation du squelette solide (donc du réseau poreux) constituant la texture du sol. Les variations de texture des argiles ont été étudiées à l'aide de trois techniques complémentaires :

- (1) la porosimétrie au mercure
- (2) le microscope électronique à balayage
- (3) la perméabilité

Pour les méthodes (1) et (2), deux échantillons ont été prélevés pour chaque matériau avant et après les essais de tassement. Les échantillons ont été déshydratés par lyophilisation (cf paragraphe 8 chapitre 3). Cette méthode permet d'éliminer l'eau du sol sans modifier la texture. Toutefois une remarque importante doit être faite sur ce point: lors du démontage de la cellule et malgré la rapidité à laquelle l'opération s'est effectuée, un gonflement instantané des échantillons se produit, d'autant plus important que la température est élevée. Il est vraisemblable que celui-ci affecte la représentativité de la classe de macroporosité.

Les mesures de perméabilité, effectuées au cours des essais, ont permis de suivre indirectement l'évolution texturale des échantillons.

Etudions les résultats obtenus par chaque technique.

6.1. Courbes de porosimétrie au mercure

La porosimétrie au mercure donne pour chaque sol à l'état initial et en fin d'essai le spectre des rayons d'accès des pores de 0,0035 à 50 μ m. Le problème rencontré lors de l'interprétation de certaines courbes est le suivant : certains essais arrivés à leur stade ultime ou presque ont subi de graves perturbations, sous forme de tassement élevé, en raison d'une surchauffe anormale des appareillages ou de chute de la pression interstitielle alors qu'ils étaient à 110°C. Ces essais d'une durée de 3 à 9 mois donnent une courbe de consolidation correcte et des mesures de perméabilité juste; c'est pourquoi nous ne les avons pas recommencés s'ils en étaient à leur dernier stade. Par contre l'observation de leur texture finale est faussée, les résultats seront mis entre parenthèses dans les tableaux.5.22 à 5.25 et pris uniquement à titre indicatif.

Nous rappelons brièvement les trois classes de pores déjà citées lors de la caractérisation des sols à l'état intact, cf chapitre 3:

- l'**ultraporosité** correspond aux pores dont le rayon d'accès est inférieur à 0,1 μm .
- la **microporosité** correspond aux pores dont le rayon d'accès est compris entre 0,1 et 1 μm .
- la **macroporosité** correspond aux pores dont le rayon d'accès est supérieur à 1 μm .

Les courbes de porosimétrie cumulées et dérivées sont présentées en ANNEXE. Les résultats obtenus sont regroupés dans les tableaux.5.22 à 5.25.

6.1.1. LAGNY

Dans le cas de cette argile, la coupure choisie n'est pas vraiment satisfaisante puisque la famille de pores principale a son mode compris entre 0,1 et 0,2 μm .

La porosité semble diminuer avec la température, ce qui serait normal puisque l'on a observé un tassement.

La proportion de la microporosité diminue avec le chauffage au bénéfice de l'ultraporosité, phénomène se traduisant aussi par une pente plus forte de la courbe (volume injecté - rayon d'accès des pores) pour les plus petits rayons d'accès. La microporosité pour le cycle "20-80-20" est en proportion plus importante (42,7 %) que pour la montée directe à 80°C (30 à 33 %).

Une deuxième famille de pores apparaît parfois dans l'ultraporosité pour des températures supérieures à 50°C.

6.1.2. ST GENEST.N

Le volume poreux total diminue avec la température alors que le volume de la macroporosité augmente, sans doute à la suite du démontage. On conclut par conséquent à une diminution de la porosité réelle avec la température. Il faut mettre de côté l'essai à 110°C qui a subi une chute rapide de sa pression interstitielle et un tassement consécutif important et irréversible.

On observe, dans tous les cas, une famille de pores dans l'ultraporosité vers 0,007 μm . Une deuxième famille apparaît dès 50°C avec un rayon plus élevé que la première mais toujours inférieur à 0,1 μm .

Cette deuxième famille présente un rayon plus fort pour une montée directe que pour un cycle. Il augmente très légèrement avec la température.

6.1.3. ST GENEST.G

On retrouve par rapport à ST GENEST.N la famille de pores aux alentours de 0,0075 μm , famille qui persiste malgré le gonflement, le fluage (cf fig.6.37) et le chauffage. Elle est caractéristique de cette argile.

Le gonflement libre concerne la microporosité qui passe de 15 à 30 %, et l'ultraporosité qui passe de 77 à 60 %. Ce gonflement est à l'origine d'une famille de pores dans la microporosité qui disparaît au dessus de 50°C. On la retrouve après un cycle 20-80-20.

En règle générale on observe une diminution de la proportion de microporosité avec la température au profit de l'ultraporosité, diminution qui s'estompe lors du retour à la température initiale.

6.1.4. LIMAY

On constate que pour certains essais le volume poreux injecté est aux alentours de 160 mm^3/g . Or pour une teneur en eau initiale de 30 % on devrait avoir un volume plus important de l'ordre de 300 mm^3/g . Le tassement dû à l'application de la pression et au chauffage est insuffisant pour expliquer cette différence. On en conclut que le spectre de porosimétrie au mercure tracé est très incomplet. Il existe une porosité plus petite, inférieure à 0,0035 μm , et une plus grande, supérieure à 50 μm , que celle à laquelle on a accès grâce à l'essai de porosimétrie au mercure.

nature de l'essai — LAGNY

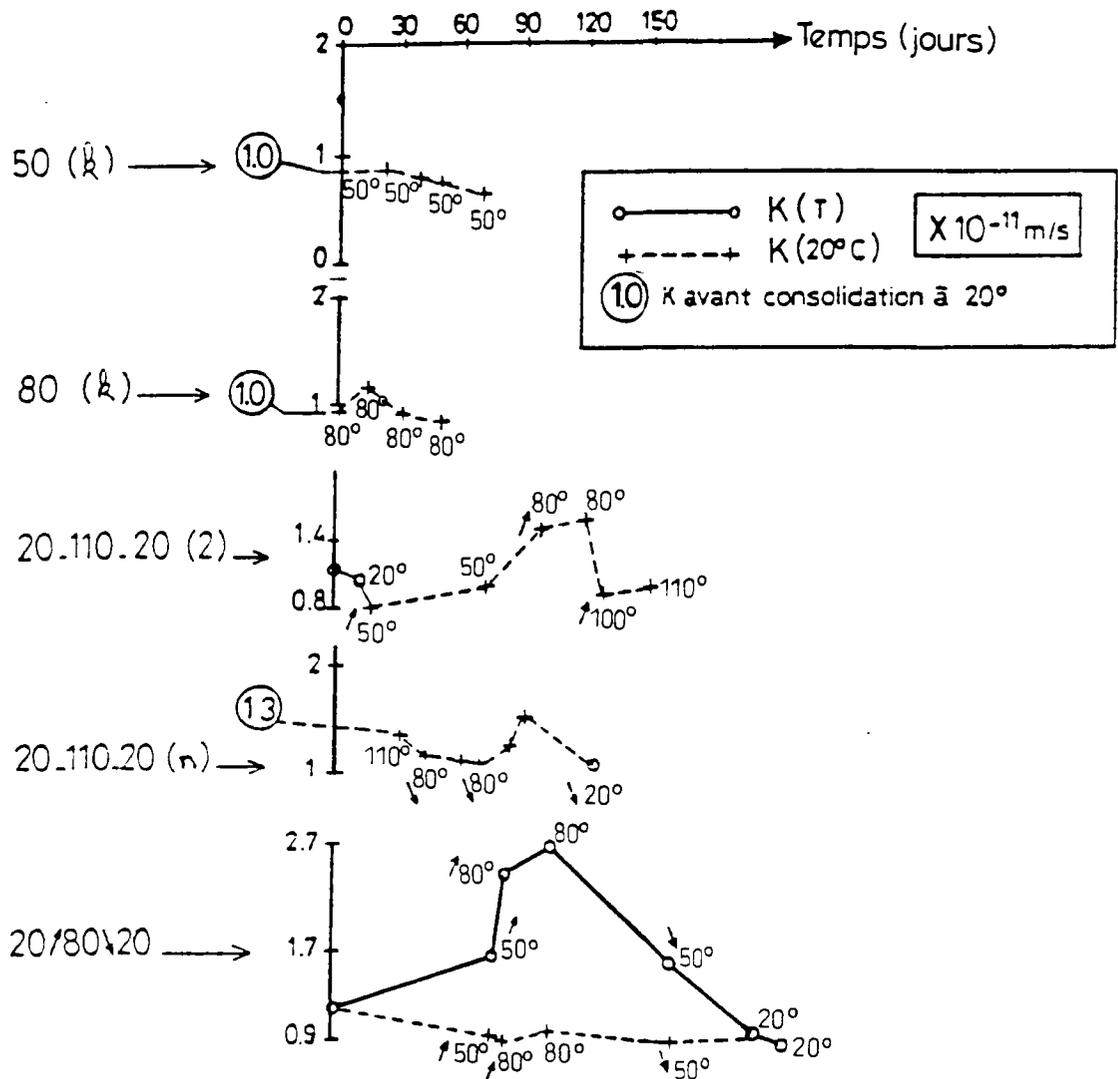
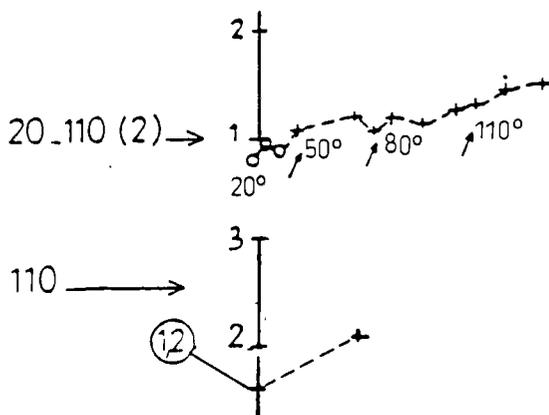


Figure 5.37 Evolution dans le temps des coefficients de perméabilité K_T et $K_{T 20}$ (à 20°C) lors des essais de fluage sur l'argile de LAGNY



nature de l'essai — S^t GENEST N

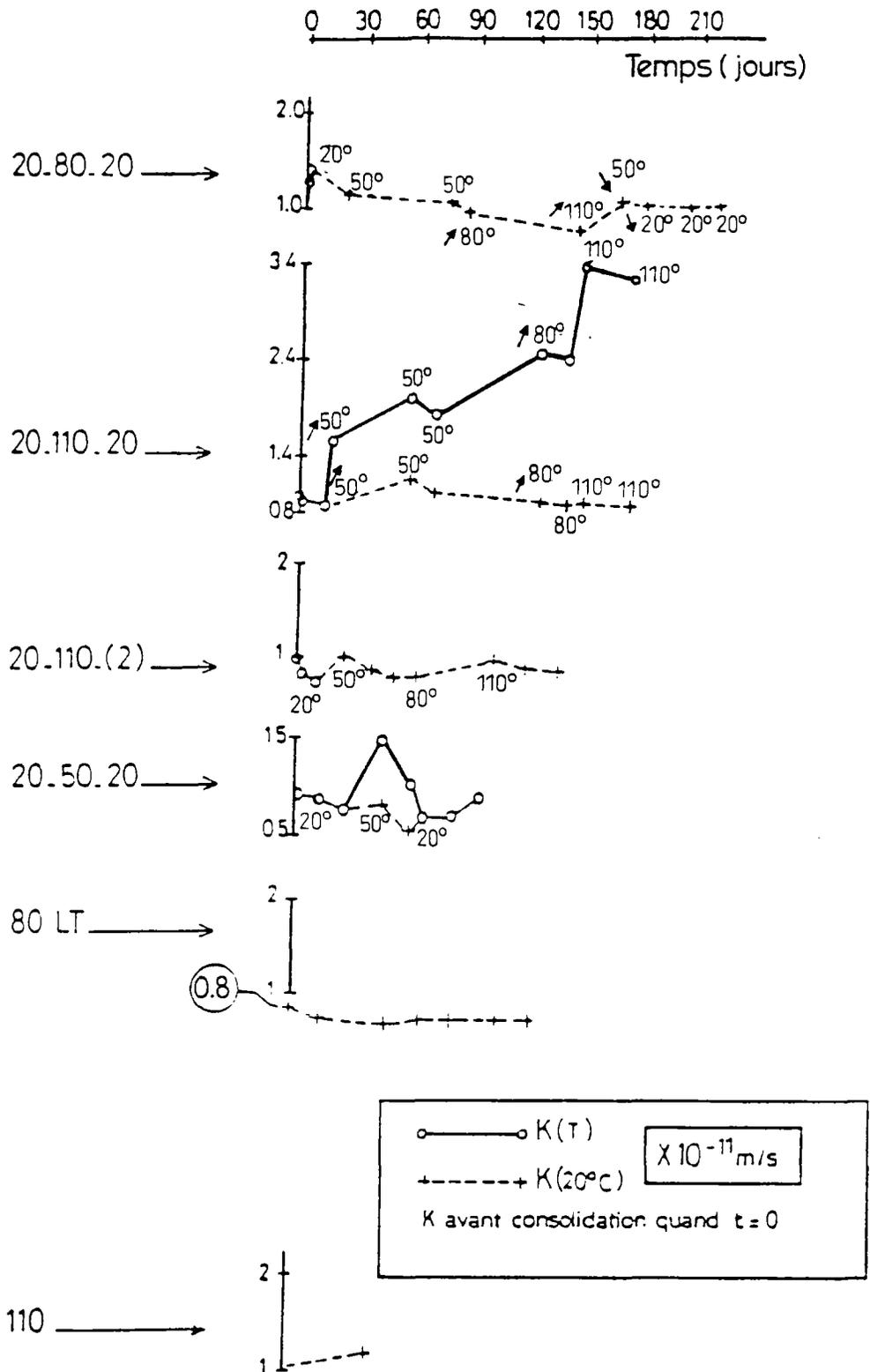


Figure 5.38 Evolution dans le temps des coefficients de perméabilité K_T et $K_T 20$ (à 20°C) lors des essais de fluage sur l'argile de SAINT-GENEST N

nature de l'essai — S^t GENEST G

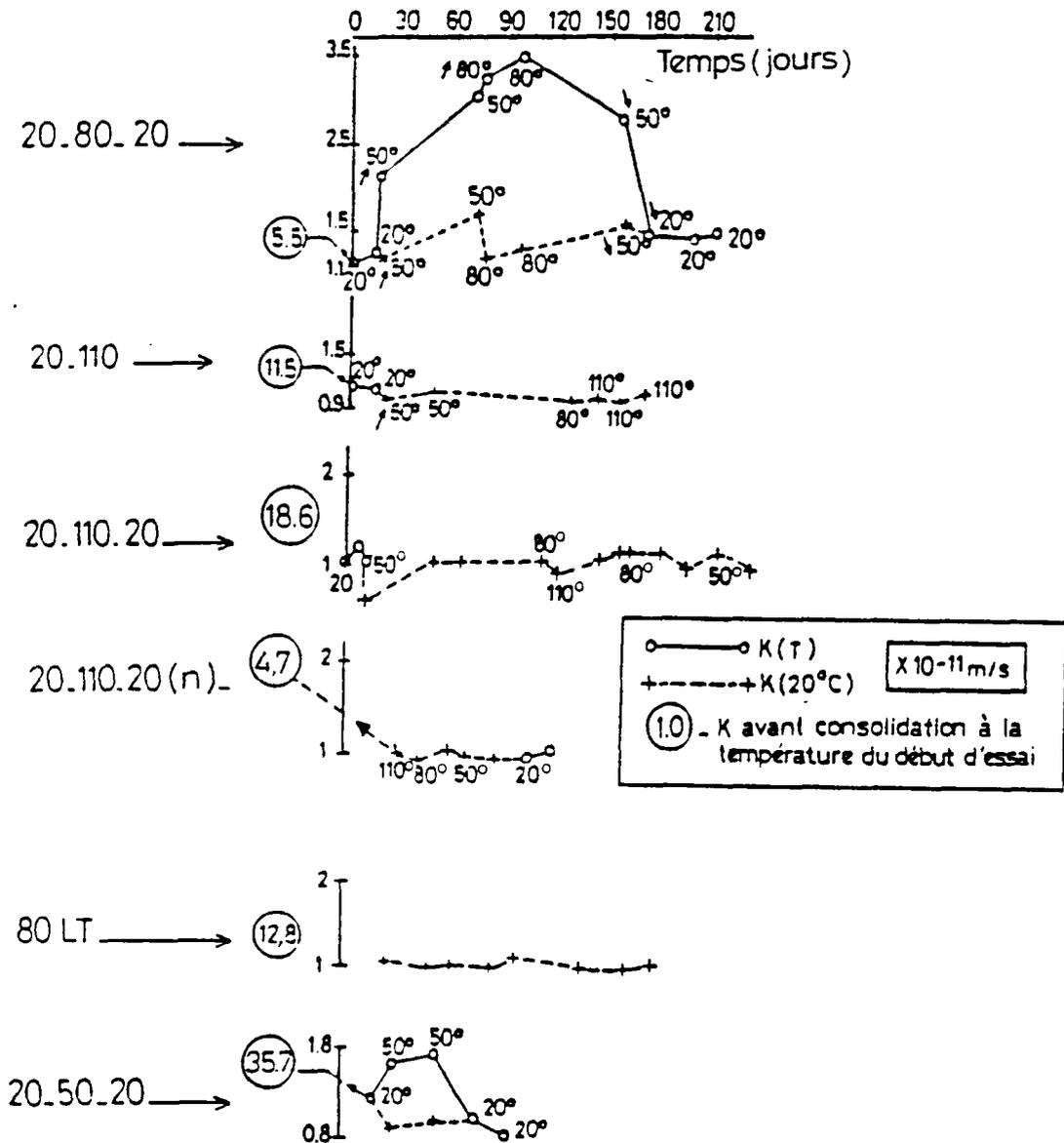


Figure 5.39 Evolution dans le temps des coefficients de perméabilité K_T et $K_T 20$ (à 20°C) lors des essais de fluage sur l'argile de SAINT-GENEST G

nature de l'essai — LIMAY

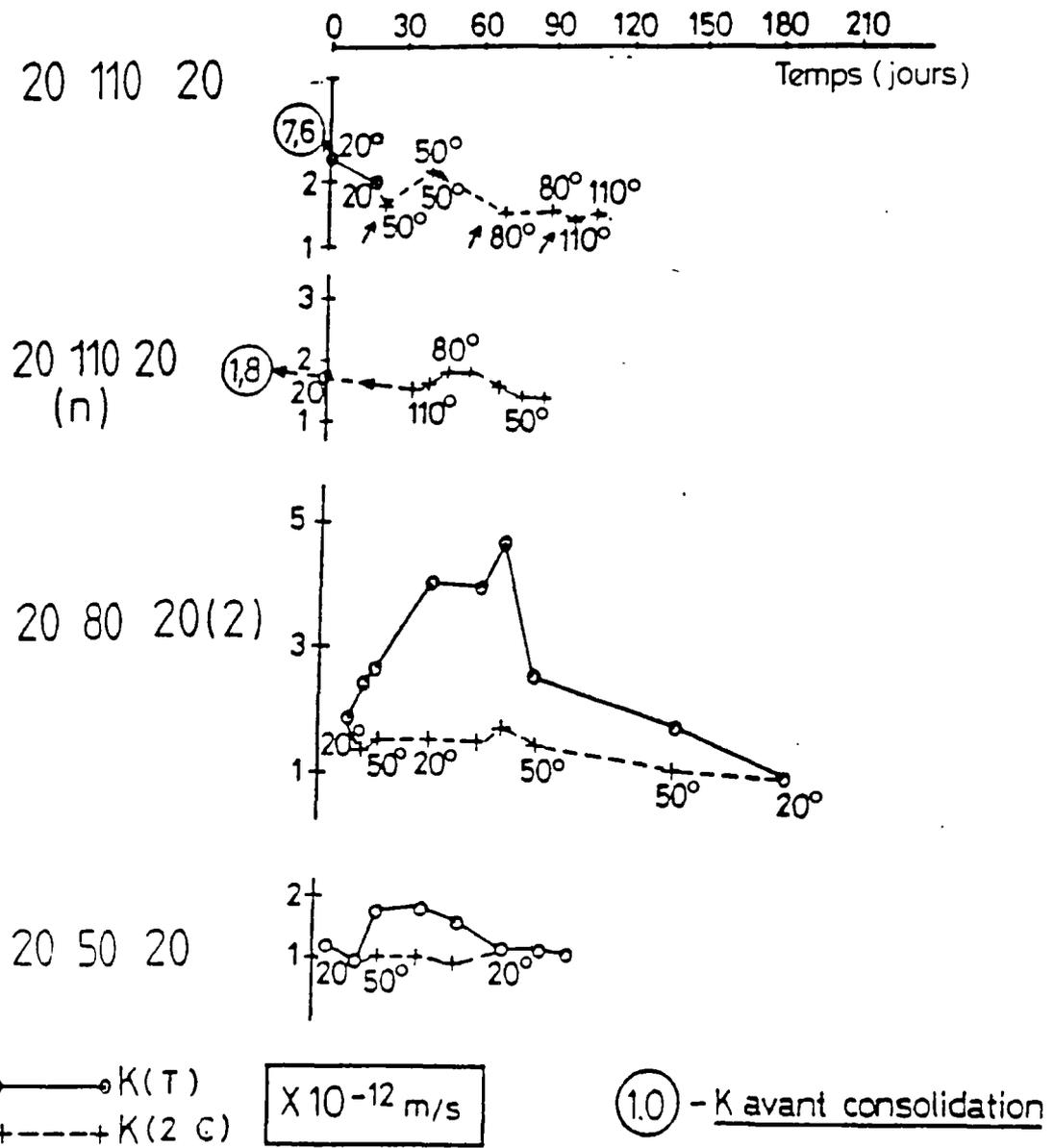


Figure 5.40 Evolution dans le temps des coefficients de perméabilité K_T et $K_T 20$ (à 20°C) lors des essais de fluage sur l'argile de LIMAY

A l'échelle macroscopique, on note que les échantillons sont très hétérogènes, et l'observation des courbes de porosimétrie le confirme. Ces courbes montrent l'existence d'une famille d'ultraporosité, d'une famille de microporosité et enfin d'une troisième famille de macroporosité qui n'existe pas pour les autres sols étudiés à l'état intact ou à 20°C. Cette famille correspond aux hétérogénéités sous forme de "nodules" plus ou moins silteux.

L'ultraporosité est très étalée et semble se prolonger en dessous de 0,0035 µm. Ceci nous fait penser que le défaut de porosité observé pourrait bien être essentiellement dû à une porosité inférieure à 0,0035 µm.

La famille de microporosité vers 0,2 µm disparaît au-dessus de 50°C. On la retrouve à la fin du cycle "20-80-20", c'est à dire à la suite d'un refroidissement. Le cycle "20-110-20" ne montre pas ce phénomène, car il a été interrompu à 80°C lors de la descente et est donc incomplet.

La microporosité représente une part importante de la porosité de ce matériau. Elle est sensible à la charge appliquée, et passe de 36 à 26 % lors de la mise sous charge à 20°C. Elle est encore plus sensible à la température car elle passe de 26 % à 20°C, à moins de 8 % à 80°C et plus. Cette diminution correspond à une migration vers une porosité inférieure dont on ne peut quantifier l'ampleur en raison des limites du spectre mesurable.

6.1.5. Conclusion

— Chaque sol se reconnaît par des familles de pores spécifiques:

- LAGNY : microporosité à 0,2 µm proche de l'ultraporosité
- ST GENEST.N : ultraporosité à 0,007 µm
- ST GENEST.G : ultraporosité à 0,007 µm + microporosité à 0,4 µm
- LIMAY : ultraporosité à 0,01 µm + microporosité à 0,2 µm + macroporosité à 8 µm

— En règle générale, après une élévation de la température et un laps de temps supérieur à six semaines (palier à la nouvelle température varie de six semaines à six mois), les familles décrites précédemment disparaissent ou migrent vers des rayons plus faibles. Ces changements importants ont lieu essentiellement entre 50 et 80°C et semblent partiellement réversibles.

- LAGNY : la famille de microporosité disparaît au profit d'une ultraporosité et réapparaît à l'issue d'un cycle.
- ST GENEST.N : la famille de rayon à 0,007 µm ne bouge pas; une deuxième famille d'ultraporosité de rayon supérieur apparaît avec la température et ne disparaît pas à l'issue d'un cycle (donc pas de phénomène réversible évident).
- ST GENEST.G : une microporosité apparaît avec le gonflement libre et disparaît avec la température au profit d'une deuxième famille d'ultraporosité lors d'un cycle "20-80-20", mais pas pour un cycle "20-50-20".
- LIMAY : une famille de microporosité disparaît avec la température et réapparaît à l'issue d'un cycle "20-80-20", mais représente une proportion du volume poreux total de 12 % ce qui est bien inférieur à 26 % à 20°C.

Ces comportements sont le signe d'un resserrement notable de la porosité.

— Les porosités de ST GENEST.N et ST GENEST.G sont bien différenciées jusqu'à 50°C. Au-dessus elles sont similaires.

— Le pourcentage du volume poreux de la microporosité sur le volume poreux total injecté est aussi un point repère qui distingue chaque matériau:

- pour LAGNY: il est élevé à 20°C (39 %) et sensible à la température puisqu'il descend à 30 % à 110°C.
- pour ST GENEST.N: il est bien moindre (de l'ordre de 10 à 11 %) et invariant dans l'ensemble avec la température.
- pour ST GENEST.G: après gonflement et tassement, il est de 23 % à 20°C et diminue avec la température jusqu'à 9 % à 110°C.

- pour LIMAY: il est de 26 % à 20°C et diminue jusqu'à 8 % à 80°C.

6.2. Observation au M.E.B.

Le Microscope Electronique à Balayage permet une bonne observation de chaque sol sur le plan minéralogique et textural. Un gonflement quasi-instantané lors du démontage de la cellule oedométrique à température élevée crée une macroporosité qui masque toute variation potentielle sur cette famille de pores durant le fluage. Seules l'ultraporosité et la microporosité ne semblent pas perturbées. Or ces dernières ne peuvent être observées au MEB dont la limite inférieure d'observation est de 0,3 µm.

Chauffée, puis mise sous charge la texture des quatre matériaux n'apparaît pas tellement différenciée de celle d'origine. Aucune différence nette, non plus, n'est observée entre les échantillons des différents essais. S'il en existe, elle doit être faible et de plus masquée par le gonflement instantané lors du démontage, gonflement d'autant plus important que la température est élevée.

6.3. Analyse des mesures de perméabilité en cours d'essai

6.3.1. Principe des mesures de perméabilité

Les coefficients considérés ici sont :

- k_T : la perméabilité intrinsèque du matériau (en m²) à la température T, qui ne dépend a priori que de la morphologie du squelette solide et pas des caractéristiques du fluide à la température considérée.
- K_T : le coefficient de perméabilité (en m/s) à la température T de l'essai au moment de la mesure.
- $K_{T,20}$: le coefficient de perméabilité mesuré ramené à la température de 20° C par la formule :

$$K_{T,20} = K_T \frac{\mu_T}{\mu_{20}} \frac{\rho_{20}}{\rho_T}$$

avec ρ la masse volumique de l'eau et μ sa viscosité dynamique. $K_{T,20}$ ne dépend pas des caractéristiques de l'eau à la température de la mesure et est donc proportionnel à k_T . Tous les $K_{T,20}$ sont directement comparables entre eux pour estimer une éventuelle modification de la texture de l'échantillon.

La mesure de perméabilité effectuée selon le principe d'un perméamètre à charge constante, est obtenue en créant à l'aide d'un contrôleur pression-volume GDS une différence de pression d'eau ($p_i - p_s$) constante entre la base et le sommet de l'échantillon. Le débit massique Q_T d'eau qui transite à l'intérieur de l'échantillon à la température T est égal au débit massique d'eau délivré par le GDS à 25°C.

$$Q_T = Q_{GDS} \frac{\rho_{20}}{\rho_T}$$

D'après la loi de DARCY, pour cet écoulement vertical ascendant,

$$Q_T = - \frac{k_T \cdot A}{\mu_T} \left(\frac{dp}{dz} + \rho_T \cdot g \right)$$

En négligeant le terme ($\rho_T \cdot g$) qui représente dans le cas considéré moins de 10 % du gradient de pression, on a :

$$Q_T = \frac{k_T \cdot A}{\mu_T} \cdot \frac{(p_i - p_s)}{H}$$

avec A l'aire d'une section horizontale de l'échantillon et H sa hauteur.

On a donc :

$$k = Q_{GDS} \frac{H}{A} \cdot \frac{1}{(P_1 - P_s)} \cdot \mu_T \cdot \frac{\rho_{20}}{\rho_T}$$

$$K_T = k \cdot \frac{\rho_T \cdot g}{\mu_T} = Q_{GDS} \cdot \rho_{20} \cdot g \cdot \frac{H}{A} \cdot \frac{1}{(P_1 - P_s)}$$

et

$$K_{T,20} = Q_{GDS} \cdot \rho_{20} \cdot g \cdot \frac{H}{A} \cdot \frac{1}{(P_1 - P_s)} \cdot \frac{\mu_T}{\mu_{20}} \cdot \frac{\rho_{20}}{\rho_T}$$

6.3.2. Résultats

Les figures.5.38 à 5.41 donnent pour différents essais sur les argiles de LAGNY, ST GENEST.N, ST GENEST.G et LIMAY l'évolution dans le temps du coefficient de perméabilité K_T , et celle de $K_{T,20}$ dont les variations sont directement comparables à celles de la perméabilité intrinsèque k.

a) LAGNY :

Pour les essais de mise en charge à une température supérieure à 20°C on observe, à la saturation, que la perméabilité k diminue dans l'ensemble entre 20°C et la température de l'essai (excepté si on est à 110°C).

Après mise sous charge et fluage, la perméabilité diminue avec le temps (cf les essais "50(k)" et "80(k)") ce qui n'est plus le cas à 110°C (cf les essais "110" et "20-110(2)").

Il n'y a pas de variation précise des mesures; on constate une quasi-constance de la valeur malgré le changement des conditions thermiques.

b) ST GENEST.N :

Les valeurs sont très proches, et diminuent très légèrement avec le temps (de l'ordre de l'imprécision des mesures).

On n'observe pas d'augmentation du $K_{T,20}$ pendant les paliers à 110°C.

Par contre ce coefficient augmente légèrement lors du refroidissement (cf le palier à 20°C pour l'essai "20-50-20" et le palier à 50°C pour l'essai "20-80-20").

c) ST GENEST.G :

Les perméabilités à saturation après 6 jours de gonflement libre sont dix fois plus élevées dans l'ensemble que pour ST GENEST.N.

Juste après mise sous charge, elles diminuent fortement; lors du fluage elles varient peu avec le temps et la température.

On constate à 110°C une légère augmentation du coefficient $K_{T,20}$ lors de l'essai "20-110-20" mais pas pour l'essai "20-110", ce qui ne nous permet pas de conclure.

Après la mise en charge, les perméabilités pour ST GENEST.N et ST GENEST.G sont similaires.

d) LIMAY :

Il n'y a pas de variation régulière et nette de la perméabilité $K_{T,20}$ excepté à la pression d'antigonflement, pour laquelle cette perméabilité diminue avec le chauffage pour des températures inférieures à 80°C, et reste constante à 110°C.

LAGNY

Echantillon	Teneur/eau		Volume poreux total (mm ³ /g)	Ultraporosité		Microporosité		Macroporosité		Porosité piégée			
	w _i %	w _f %		Volume_poreux (mm ³ /g)	Rayon moyen μm	%	Volume_poreux (mm ³ /g)	Rayon moyen μm	%	Volume_poreux (mm ³ /g)	Rayon moyen μm	%	
Intact			288,2	-	42,7	165	0,21	48,2	26,2	-	9,1	178,2	61,8
20° Vinc			270,1	-	54,8	122	0,125	34,8	28,1	-	10,4	125	46,3
20°	32,0	33,9	266,6	-	49,5	134	0,12	38,6	31,6	-	11,9	146,6	55
50°	50,0	32,0	254,3	0,042	46,4	136	0,12	45,2	21,3	-	8,4	146,3	57,5
50°(2)	34,5	35,1	266	0,033	56,8	115	0,1	36,8	17	-	6,4	174	65,4
50°(k)	36,0	35,7	279,1	0,042 0,095	56,6	121	-	34,4	25,1	5,4	9,0	171,1	61,3
80°	35,0	33,1	259,7	0,042 0,09	63,1	95	-	28,2	22,7	-	8,7	159,7	62,6
80°(k)	34,0	31,9	247,5	0,085	57,8	104	-	32,3	24,5	-	9,9	153,5	62
80 LT	31,0	31,8	270,4	0,08	56,6	117	-	30,7	34,4	-	12,7	157,9	58,4
20.80.20	31,0	31,5	273,9	-	46,7	145	0,12	42,7	28,9	6,5	10,6	167,9	61,3
(20.110.20)	32,7		233,6	0,032	53,9	107	0,11	33	30,6	11	13,1	150,6	64,5
(2).20.110	30,3	30,3	247,6	0,03	56,9	106	0,1	29,9	32,6	9,5	13,2	137,6	55,6

Tableau 5 -2-2. Résultats des courbes de porosimétrie au mercure sur des essais de fluage sous sollicitations thermiques diverses pour LAGNY

SAINT-GENEST N

Echantillon	Teneur/eau		Volume poreux total (mm ³ /g)	Ultraporeté		Microporosité		Macroporosité		Porosité piégée	
	Wl %	Wf %		Volume poreux (mm ³ /g)	Rayon moyen µm	Volume poreux (mm ³ /g)	Rayon moyen µm	Volume poreux (mm ³ /g)	Rayon moyen µm	Volume poreux (mm ³ /g)	%
Intect			234,8	180	0,0072	35	-	19,8	-	164,8	70
20° Vinc			264,3	194	0,0075	49	-	21,3	-	134,3	50,8
20°	25,8	27,6	242	178	0,0075	39	-	25	2	62	25,6
50°	27,6	27,0	245,4	191	0,0072 0,028	28	-	26,4	4,2	115,4	47
80°	28,9	26,6	223,7	162	0,0075 0,048	27	-	34,7	6	129,7	58
(110°)	28,7	29,4	225	169	0,0077	30	-	26	2,8	113	50,2
20.50.20	25,6	27,5	225,8	165	0,0073 0,015	40	-	20,8	3	95,8	42,4
20.80.20	29,0	28,6	222,5	170	0,0075 0,019	35	-	17,5	3	72,5	32,6
(20.110.20)	25,7	25,4	204,8	166	0,0077 0,020	14	-	24,8	9,5	78,8	98,5

Tableau 5.23 Résultats des courbes de porosimétrie au mercure sur des essais de fluage sous sollicitations thermiques diverses pour SAINT-GENEST N

SAINT-GENEST G

Echantillon	e0 après gonflement	Volume poreux total (mm ³ /g)	Ultra-porosité		Micro-porosité		Macro-porosité		Porosité plégée Volume poreux (mm ³ /g)	%
			Volume poreux (mm ³ /g)	Rayon moyen µm	Volume poreux (mm ³ /g)	Rayon moyen µm	Volume poreux (mm ³ /g)	Rayon moyen µm		
Intact		234,8	180	0,0072	76,7	35	-	19,8	-	8,4
Gonflement		330,2	200	0,0072	60,6	100	0,4	30,2	-	9,1
20° VInc		272,9	190	0,0071	69,6	48	0,25	34,9	-	12,8
20°	0,879	252,4	175	0,0074	69,3	57	0,3	20,4	-	8,1
50°	0,823	244,8	177	0,0075 0,029	72,3	47	0,3	20,8	-	8,5
80°	0,855	219,6	181	0,0075 0,030	82,3	15	-	23,6	6	10,7
80 LT	0,827	237,5	184	0,0077	77,5	32	-	25,5	4,3	10,7
(110°)	0,859	218,5	172	0,0075	78,5	20	-	26,5	6	12,1
20.50.20	0,826	236,1	181	0,0077	76,7	33	-	22,1	5,5	9,4
20.80.20	0,851	255,4	181	0,0077	70,9	58	0,12	16,4	-	6,4
(20.110)	0,819	213,1	170	0,0077	79,8	24	-	19,1	4,5	9
20.110.20(n)		230,6	163	0,0073	70,8	45	0,5	22,5	-	9,8

Tableau 5.24 Résultats des courbes de porosimétrie au mercure sur des essais de fluage sous sollicitations thermiques diverses pour SAINT-GENEST G

LIMAY

Echantillon	Teneur/eau		Volume poreux total (mm ³ /g)	Ultraporosité		Microporosité		Macroporosité		Porosité plégée				
	w _i %	w _f %		Volume poreux (mm ³ /g)	Rayon moyen μm	%	Volume poreux (mm ³ /g)	Rayon moyen μm	%	Volume poreux (mm ³ /g)	%			
Intact			225,7	96	0,0075	42,5	81	0,23	35,9	48,7	8	21,6	145,7	64,6
20°			244,6	116	0,01	47,4	63	0,18	25,8	65,6	11	26,8	164,6	67,3
20°	30,7	31,6	116,3	55	0,0046 0,012	47,3	14	-	12	47,3	10	40,7	81,3	69,9
50°	32,4	31,0	183	78	0,013	42,6	40	0,29	21,9	65	7,5	35,5	119	65
80°	32,4	29,2	174	75	0,0048 0,015	43,1	12	-	6,9	93	13,5	50	120	69
80(2)	29,5	31,0	165	71	0,011	43	13	-	7,9	81	12	49,1	112	68
20-80-20(2)	30,0	28,0	159	75	0,0125	47,2	19	0,117	11,9	65	14	40,9	98	62
(20-110-20)	29,1		159	76	0,011	47,8	15	-	9,4	68	24	42,8	96	60,4
(20-110)			154,8	84	0,014 0,0057	54,3	16	-	10,3	54,8	13	35,4	102,8	66,4

Tableau 5-25 Résultats des courbes de porosimétrie au mercure sur des essais de fluage sous sollicitations thermiques diverses pour LIMAY

On note que les perméabilités sont dix fois plus faibles pour ce matériau que pour les deux autres. Le débit d'eau enregistré par le GDS et qui nous permet de faire nos calculs est très faible, quelques fois à peine plus élevé que la précision des mesures de cet appareil. On ne peut augmenter le gradient hydraulique qui est déjà de 250. De plus au niveau des faibles débits il y a une distorsion (cf chapitre 1 paragraphe 3.5) par rapport à la loi de DARCY. Nous sommes donc en limite d'application de la loi de DARCY. Par conséquent nous concluons que la perméabilité de cette argile est très faible et sa valeur réelle est peut-être inférieure à celle mesurée.

e) Conclusion :

Pour le K_{T20} (ou pour k_T) les variations observées sont peu discernables de celles dues à la précision des mesures. On constate une quasi-constance des valeurs dès lors que l'on a appliqué la charge.

Les variations de K_T sont elles, identiques à celles de la viscosité de l'eau en fonction de la température.

On observe pour les montées par palier de 20 à 50° C une légère diminution de la perméabilité. Pour les paliers de montée en température, on peut observer des modifications successives dans les deux sens opposés en raison des deux phases suivantes :

- une phase de réarrangement primaire pouvant augmenter la perméabilité.
- une phase de fluage qui resserre les particules pouvant diminuer la perméabilité.

LAGNY présente un comportement particulier à 110°C : K_{T20} augmente avec le fluage. Ce comportement n'a pu être généralisé sur les autres sols et pourrait être le résultat d'une floculation à cette température. On rappelle que CITTANOVA (chapitre 1 paragraphe 1.2) avait obtenu de fortes modifications de la texture de smectites qui sont relativement nombreuses dans l'argile de LAGNY.

Le gonflement libre de l'argile de ST GENEST.N entraîne une augmentation de la perméabilité qui est multipliée par dix; mais cette différence disparaît dès l'application de la charge.

Les valeurs des perméabilités de ST GENEST et LAGNY sont proches tandis que celles de l'argile de LIMAY sont dix fois plus faibles, ceci en relation avec sa texture originale.

6.4. Conclusion

Pour bien comprendre l'évolution texturale des argiles lors des essais avec sollicitations thermiques de 20 à 110°C, il a paru nécessaire de faire une étude minéralogique aux rayons X de chaque sol après un passage prolongé à 110°C. Nous avons comparé les résultats avec ceux obtenus à 20°C (cf diagrammes en annexe) et nous en avons conclu :

- pour ST GENEST pas de changement,
- pour LIMAY un changement faible que nous attribuerons plutôt à une hétérogénéité de ce matériau qu'à une réelle modification minéralogique,
- pour LAGNY un resserrement de l'espace interfoliaire des smectites nombreuses dans ce sol avec une distance interfoliaire qui passe de 14 Å à 20°C à 10 Å à 110°C.

A la pression de préconsolidation, l'indice des vides du matériau est une fonction décroissante de la température ce qui entraîne une diminution de la porosité totale.

L'action de la température sur la porosité du matériau se traduit essentiellement par une baisse de la microporosité au profit de l'ultraporosité. Le refroidissement peut entraîner la réapparition incomplète d'une famille de pores disparue au cours du chauffage. D'où la confirmation du comportement partiellement à totalement irréversible de la texture à l'issue d'un cycle thermique.

La texture subit de fortes modifications lors de l'application de la pression et les changements dus à la température sont bien moindres mais réels. Ainsi pour chaque sol le chauffage génère un comportement spécifique :

- LAGNY : une migration de la microporosité vers l'ultraporosité.
- ST GENEST.N : une diminution de la porosité totale.

- ST GENEST.G : une disparition de la famille de microporosité sous forme de fissures ouvertes, engendrée par le gonflement libre, et qui a commencé dès l'application de la charge.
 - LIMAY : une diminution importante de la microporosité.
- Les mesures de la perméabilité intrinsèque sont conformes à ces résultats, c'est à dire qu'elles présentent de grandes variations avec :
- le gonflement libre au bout duquel elle est multipliée par dix,
 - la mise sous charge, essentiellement dans les cas de LIMAY et ST GENEST.G.

Lors du fluage et sous l'effet des diverses sollicitations thermiques appliquées, elle ne montre pas d'évolution générale particulière si ce n'est une légère augmentation à 110°C pour LAGNY. L'évolution de la microporosité ne perturbe pas la perméabilité k_T . LAGNY présente un comportement particulier qui pourrait être relié à la transformation des smectites en illites entraînant une augmentation de l'espace interparticulaire.

Si la perméabilité intrinsèque ne présente pas de variations avec la température, le coefficient de perméabilité K_T lui est fortement variable sous l'effet de la variation de la viscosité de l'eau avec la température. La principale conséquence en est une forte diminution des coefficients c_v lors de la consolidation primaire.

Chapitre 6

CONCLUSION GENERALE

Ce travail a été consacré à l'étude des variations de volume de différents matériaux argileux, à moyen et long terme, et à l'évolution en parallèle de la texture sous des sollicitations thermiques diverses entre 20 et 110°C. Du point de vue expérimental, il s'est appuyé sur trois sols sélectionnés en raison de leur composition minéralogique et de la diversité de leurs caractéristiques géotechniques permettant ainsi d'étudier une large gamme de matériaux argileux. L'un d'entre eux a été étudié à l'état intact et après gonflement libre dans le but d'appréhender le rôle du remaniement.

Au niveau expérimental, nous avons conçu une cellule oedométrique spécifique pour effectuer des essais de fluage à long terme (plusieurs mois) avec une température imposée dans la gamme 20-110°C. Le mode opératoire est analogue à celui défini par le L.C.P.C. pour les essais oedométriques classiques auxquels on a superposé ou substitué une succession de sollicitations thermiques. Ces essais simples permettent de mesurer directement la variation de volume de l'échantillon sous l'effet d'une sollicitation mécanique ou thermique. De plus, ils permettent de suivre régulièrement l'évolution de la perméabilité par des essais à charge constante concomitants. Le point faible de ce dispositif expérimental est la sollicitation thermique limitée à 110°C pour les études à long terme et à 130°C pour des études à court terme, en raison d'une faiblesse d'étanchéité à cette température de la membrane "Bellofram" incluse dans la cellule. Par contre ses atouts sont un frottement latéral négligeable au niveau du piston de chargement et une minimisation des corrections à effectuer en fonction de la température sur la mesure de la hauteur de l'échantillon en raison du choix des matériaux de la cellule.

L'analyse des résultats expérimentaux a permis de mettre en évidence les comportements suivants :

(1) sous l'effet d'une augmentation de température :

- un comportement dilatant ou compactif fonction de la charge initiale, de l'incrément de température appliqué ainsi que la durée de l'essai : une charge initiale et un incrément de température faibles ainsi qu'une durée courte de l'essai favorisent l'apparition d'un gonflement. On note qu'à la pression de préconsolidation le comportement a toujours été compactif, et le tassement observé bien supérieur à celui dû au fluage si on avait laissé l'échantillon à sa température initiale.
- la nécessité de considérer une sollicitation thermique comme un essai à part entière et donc d'effectuer une remise à zéro du temps, comme on le fait pour un palier de chargement dans un essai oedométrique classique.
- l'existence de trois phases:
 - une phase de gonflement de l'échantillon pendant les premières minutes liée à la dilatation de l'eau interstitielle et favorisée par la faible perméabilité du matériau. Son amplitude augmente avec l'incrément de température et est à l'origine d'un remaniement "instantané" de la texture.
 - une phase de dissipation des surpressions interstitielles, générées par la première phase, qui se termine au bout de quelques heures et qui conduit à un nouvel arrangement textural, plus stable que l'état initial.
 - une phase de fluage dont la cinétique apparaît nettement quand on effectue le changement d'origine des temps décrit précédemment.
- le coefficient de consolidation secondaire augmente avec l'incrément de température pour les argiles de LAGNY et ST GENEST; ceci est à mettre en relation avec la présence non négligeable de smectites dans ces sols. Toutefois la différence de tassement due au fluage pour des incréments de température différents, reste largement inférieure à la différence due à la consolidation primaire.
- l'absence de variation notable de la perméabilité intrinsèque si ce n'est peut être à 110°C, mais ceci est à confirmer.
- plusieurs facteurs ont une influence sur le tassement thermique. Celui-ci sera d'autant plus élevé (et positif) que :
 - la plasticité du sol est élevée ;
 - sa teneur en eau et son indice des vides sont élevés;
 - la durée de l'essai est longue;
 - l'incrément de température est important ;
 - la charge appliquée est également importante.

(2) sous l'effet d'une diminution de température :

- pas de tassement ou un très léger gonflement pour les argiles de LAGNY et ST GENEST. Le chauffage semble avoir renforcé la texture de ces matériaux.
- un gonflement primaire et secondaire pour l'argile de LIMAY à mettre en liaison avec sa plasticité particulièrement élevée.

(3) en parallèle on a suivi l'évolution de la perméabilité intrinsèque et on a constaté qu'elle ne variait pas de façon notable dans la gamme des sollicitations thermiques étudiées. Nous concluons donc à une conservation de l'intégrité de la texture des matériaux.

La comparaison des résultats des essais de montée directe entre 20°C et une température finale T_f , avec ceux des essais de montée progressive par paliers de 30°C jusqu'à la même température finale, a mis en évidence que la déformation résultante, dans le premier cas est plus élevée que dans le deuxième. Ceci est dû à l'importance du remaniement "instantané". Par conséquent si on veut effectuer des prévisions sur le tassement suite à un cheminement quelconque entre 20°C et une température finale T_f , on se mettra du côté de la sécurité (pessimiste) en prenant le résultat d'une montée directe. Dans le cas d'une baisse de température, on prendra en compte une déformation nulle.

L'ensemble des comportements observés permettent d'établir un très bon analogue entre sollicitation thermique et sollicitation mécanique et ce quelque soit le mode de la sollicitation appliquée.

Il nous semblerait intéressant par la suite de procéder à des essais avec des températures supérieures à 110°C (130 à 150°C) : d'une part, pour observer si l'augmentation de la perméabilité intrinsèque constatée pour l'argile de LAGNY à 110°C est un cas particulier ou si ce phénomène s'accroît et se généralise au delà de 110°C et, d'autre part, pour étudier le domaine des transformations minéralogiques et leurs conséquences sur le comportement d'un matériau argileux.

BIBLIOGRAPHIE

AMAR S., MAGNAN J.P. (1980)

"Essais de mécanique des sols - AIDE mémoire"
LCPC, juillet.

AUDIGUIER-MARCEL M., GAUDON P., PELLERIN F.M. (1985)

Recueil des modes opératoires des essais d'identification les plus courants en géologie de l'ingénieur.
ENSMP, CGI.

AUDIGUIER-MARCEL M., DELAGE P. (1987)

"Etude microscopique et porosimétrique des sols fins naturels dans une perspective géotechnique".
Micromorphologie des sols.

ARNOULD M., AUDIGUIER M., DELAGE P., PELLERIN F.M., STRULLOU R., VAYSSADE B. (1980)

"Etude des sols argileux par la porosimétrie au mercure, contrôle des variations de texture sous divers conditions".
Bulletin de l'A.I.G.I. n°22, p 213-223.

BALDI et al (ASCARI P., BALDI G., PEANO A., PELLEGRINI R.) (1988)

"Modelling and testing of heated clay behaviour (with emphasis on Boom clay)".
Periodic report, contract n°FI1W/0150(A).

BARDEN L. (1965)

"Consolidation of clay with non linear viscosity".
Geotechnique, vol.15, 4, déc. 1965, p.345-362.

BAUDET (1981)

"Le mécanisme de la défloculation"
Bulletin de la société française de céramique

BJERRUM L. (1967)

"7th Rankine lecture: engineering geology of normally consolidated marine clays as related to settlements of buildings".
Geotechnique, 17, n°2, p.82-118.

BOOKER J.R., SARVIDOU C. (1985)

"Consolidation around a point heat source".
Journal for numerical and analytical methods in geomechanics, vol.9, p 173-184.

BORJA R.J., KAVAZANJIAN E. (1987)

"A constitutive model for the stress-strain-time behaviour of wet clays".
Geotechnique 37, n°1, p 119-125.

BRGM, ENSMP, Ecole Polytechnique, ANDRA (1984)

"Journées sur les argiles".

BRGM

Cartes géologiques de la France au 1/50 000e.
Lagny (184)
Mantes la Jolie (151)
Provins (260)

- BUISMAN A.S.K. (1956)**
 "Results of long duration settlements tests".
 Compte rendu. I conférence internationale MSTF, Cambridge Massachusetts, U.S.A., vol.1, F7,
 p.103-106.
- CAILLERE S., HENIN S. (1963)**
 "Minéralogie des argiles"
 MASSON et Cie.
- CAMPANELLA R.G., MITCHELL J.K. (1968)**
 "Influence of temperature variation on soil behavior"
 Proceedings of the civil engineers. Journal of the soil mechanics and foundation division, NEW
 YORK, vol.94 (SM3), p.709-734.
- CARSLAW H.S., JAEGER J.C. (1980)**
 "Conduction of heat in solids".
 Oxford Science Publication, 2ème édition
- CITTANOVA J.P. (1970)**
 "Physico-chimie appliquée aux argiles: contribution à l'étude de leurs propriétés mécaniques".
 These doct. ing., université de Grenoble, juin 1970.
- COMMISSION DES COMMUNAUTES EUROPEENNES (1982)**
 "La charge thermique admissible en formations géologiques - Conséquences sur les méthodes
 d'évacuation des déchets radioactifs".
 Série Sciences et techniques nucléaires, vol 14: formations argileuses
- CTORI P. (1989)**
 "The effects of temperature on the physical properties of cohesive soil".
 Ground engineering, july, p 26-27
- DEMARS K.R., CHARLES R.D. (1982)**
 "Soil volume changes induced by temperature cycling".
 Canadian geotechnical journal, vol.19.
- DESPAX D. (1976)**
 "Etude de l'influence de la température sur les propriétés mécaniques des argiles saturées".
 Thèse de docteur ingénieur de l'Ecole Centrale des Arts et Manufactures.
- DUNOYER de SEGONZAC G. (1970)**
 "The transformation of clay minerals during diagenesis and low-grade metamorphism".
 Sedimentology, 15, p.281-344.
- FEDA J. (1989)**
 "Interprétation of creep of soils by rate process theory".
 Geotechnique vol.39, n°4, p 667-677.
- FELIX B. (1980)**
 "Le fluage des sols argileux. Etude bibliographique".
 Rapport de recherche LCPC n°93.
- FELIX B. (1980)**
 "Le fluage et la consolidation unidimensionnelle des sols argileux".
 Rapport de recherche LCPC n°94.
- FELIX B. (1981)**
 "Fluage héréditaire et consolidation d'un sol quasi saturé".
 Revue française de géotechnique, n°14, février.

FINN F.N. (1951)

"The effects of temperature on the consolidation characteristics of remolded clay".
Symposium consolidation testing of soils. ASTM, technical publication n° 126.

FLEUREAU J.M. (1979)

"Influence d'un champ thermique ou électrique sur les phénomènes d'interaction solide-liquide dans les milieux poreux".

These de docteur ingénieur de l'Ecole Centrale des Arts et Manufactures.

GHAZZALI A. (1990)

"Influence de la température et de ses variations sur la consolidation de trois sols argileux"
DEA commun ENSMP/ENPC/PARIS VI/BORDEAUX I.

GIBSON R.E., LO K.Y. (1961)

"A theory of consolidation for soils exhibiting secondary compression".
Norwegian Geotechnical Institut publication n° 41, p3-15.

GRABOWSKA-OLSZEWSKA B., OSIPOV V., SOLOKOV V. (1984)

Atlas of the microstructure of clay soils
Panstowe Wydawnictwo Nankowe, Warszawa 1984.

GRIFFITHS F.J., JOSCHI R.C. (1990)

"Clay fabric response to consolidation".
Applied clay science, n° 5, p 37-66.

GRIM R.E. (1968)

"Clay mineralogy".
Frank Press, Mc Graw Hill international series in the earth and planetary Sciences.

HELMI EL RAMLI A. et al (SAID YOUSSEF M., SABRY A.) (1961)

"Temperature changes and their effects on some physical properties of soils".
Proc., V.I.C.S.M.F.E., vol.1, p.419-425.

HENLEY J.J. (1959)

"Some mineralogical equilibria in the system $K_2O-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$ ".
U.S. Geol. Surv. Prof. paper 424-D, 338-340.

HOUSTON S.L.

"Thermomechanical behavior of seafloor sediments".

HURET C. (1985)

"Influence de la température (5 à 80°C) sur les propriétés mécaniques d'un loess remanié".
Thèse de docteur ingénieur: ENSMP et université de Paris VI.

JURAN I., BERNARDET A. (1986)

"La consolidation unidimensionnelle sous charge cyclique".
Revue française de géotechnique, n° 36.

KOPPEJAN A.-W. (1948)

"A formula combining the terzaghi's load compression relationship and the Buisman's secular time effect".

Compte rendu 2ème congrès international MSTF, Rotterdam, vol.3, p.32-37.

LAGURO J.G. (1969)

"Effect of temperature on some engineering properties of clays soils".
48ème congress of the Highway Research Board, Washington janvier.

MC. KINSTRY (1965)

"Thermal expansion of clay minerals"
The American Mineralogist, vol.50, janvier-février p 212-222.

MAGNAN J.P., BAGHERY S., BRUCY M., TAVENAS F. (1979)

"Etude numérique de la consolidation unidimensionnelle en tenant compte des variations de la perméabilité et de la compressibilité du sol, du fluage et de la non saturation".
Bulletin de liaison des ponts et chaussées 103, sept-oct 1979, ref 2371.

MAGNAN J.P., BAGHERY S. (1981).

"Une méthode approchée pour la prévision des vitesses de tassement des sols fins doués de fluage".
Bulletin de liaison des laboratoires des Pts et Ch, n°111, janv-fev.

MAGNAN J.P., MIEUSSENS C., SYEZ B., VAUTRAIN J. (1985)

"Essais oedométriques".
Méthodes d'essai LCPC n°13.

MARSILY (de) G. (1981)

"Hydrogéologie quantitative".
Collections sciences de la terre. Edition Masson, 215 p.

MIEUSSENS C., MAGNAN J.P., SOYEZ P. (1985)

"Essai de compressibilité à l'oedomètre - Procédures recommandées par les laboratoires des ponts et chaussées".
Bulletin de liaison des laboratoires des Pts et Ch, n°139, sept-oct 1985, ref 3034.

MITCHELL J.K. (1964)

"Shearing resistance of soils as a rate process".
Proc. of A.S.C.E., Journ. of soil mechanics and foundation division, vol. 90, n°S.M.1, janv. 1964, p.29-61.

MITCHELL J.K. (1969)

"Temperature effects on the engineering properties and behavior of soils".
48ème congrès of the Highway Research Board, Washington janvier.

MITCHELL J.K. (1976)

"Fundamentals of soil behavior".
Wiley and Son, New York.

Mode opératoire du L.C.P.C. (1970)

"Essai de compressibilité à l'oedomètre".
Dunod, Paris, 1970.

MURAYAMA S., SHIBATA T. (1961)

"Rheological properties of clays".
5ème congrès international de mécanique des sols et des fondations, Paris, 1981, p.269-273.

MURAYAMA S., SHIBATA T. (1964)

"Flow and stress relaxation of clays".
Compte rendu du symposium: rhéologie et mécanique des sols, Grenoble, p.99-129.

MYER L.R. (1985)

"Electro servo control system for thermomechanical properties testing".
Geotechnical testing journal vol 8, n°4, dec 1985, p 171-178.

NOBLE C.A., DEMIREL T. (1972)

"Effect of temperature on strength behavior of cohesive soil".
48ème congrès of the highway Research Board, Washington janvier.

OKA F., LEROUEIL S., TAVENAS F. (1986)

"Consolidation of natural clays and laboratory testing".
ASTM special technical publication, n° 892, p 378-404.

PAASWELL R.E. (1967)

"Temperature effects on clay soil consolidation".
Journal of the soil mechanics and foundation division. Proceedings of the American Society of Civil Engineers, may, p 9-22.

PAASWELL R.E. (1969)

"Transient temperature influences on soil behavior".
48ème congress of the Highway Research Board, Washington janvier.

PARCEVAUX P. (1980)

"Etude microscopique et macroscopique du gonflement de sols argileux".
Thèse de docteur ingénieur: ENSMP et université de Paris VI.

PHILIPPONNAT G. (1977)

"Mesure de la compressibilité des sols par un essai oedométrique accéléré".
Annales de l'I.T.B.T.P., fevrier, n° 347.

PLUM R.L., ESRIG M.L. (1969)

"Some temperature effects on soil compressibility and pore water pressure".
48ème congress of the Highway Research Board, Washington janvier.

REBOUR V. (1988)

"Caractérisation préliminaire d'argiles en vue de l'étude de leur comportement thermomécanique".
DEA commun ENSMP/ENPC/PARIS VI/BORDEAUX I, 50p.

ROSENBAUMS M.S., CLARKE B.A. (1987)

"The design of a high pressure and temperature oedometer".
Quarterly journal of engineering geology, London, vol 20, p 245-249.

ROSENQVIST TH. (1959)

"Physico-chemical properties of soils: soil-water systems".
Journal of the soils mechanics and foundation division. Proceedings of the American Society of Civil Engineers, avril.

ROWE P.W., BARDEN L. (1966)

"A new consolidation cell".
Geotechnique n° 16, june, p 162-170.

SCHIFFMAN L.

"Secondary consolidation of clay, a visco elastic analysis. Advances in consolidation theories for clays".
Compte rendu 7ème congrès international de mécanique des sols et des travaux de fondations, p.60-73.

SCHNEEBELI (1966)

"Hydraulique souterraine".
Eyrolles, éditeur.

SERGEEV E.M. (1971)

"Les forces de cohésion et l'eau liée dans les argiles".
Bulletin du B.R.G.M. 2ème série, section II, n° 1.

SHERIF M.A., BURROUS C.M. (1972)

"Temperature effect on the unconfined shear strenght of saturated cohesive soil".
48ème congress of the Highway Research Board, Washington janvier.

VAYSSADE B. (1978)

"Gonflement interparticulaire des sols argileux".
These de docteur ingénieur: E.N.S.M.P. et Université de Paris 6.

VERCAMER P. (1985)

"Thermique du sol utilisé comme source de chaleur".
These de docteur ingénieur: E.N.S.M.P. et Université de Paris 6.

YONG R.N., WARKENTIN B.R. (1975)

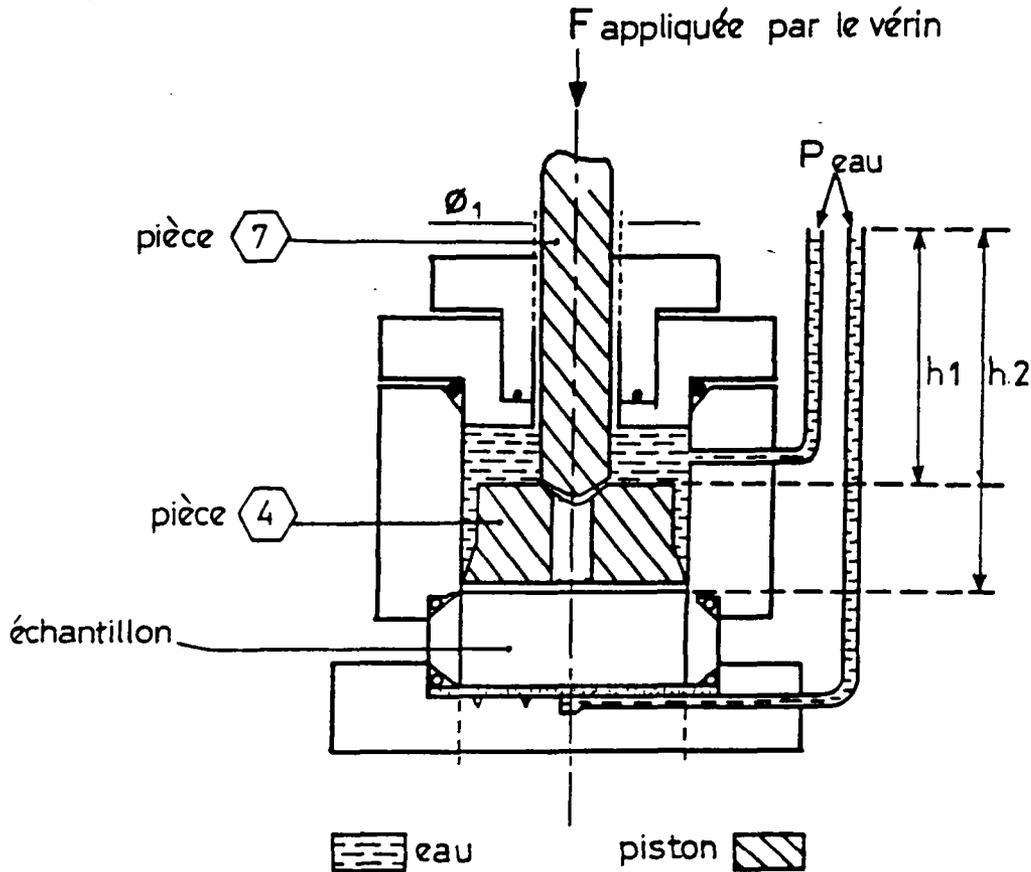
"Soil properties and behaviour".
Elsevier, Amsterdam, the Netherlands.

ANNEXE A

CORRECTION C3 SUR LES MESURES DU CHARGEMENT

CALCUL DES COURBES (pression d'air appliqué/pression sur l'échantillon)

Sur le schéma suivant figure la cellule et les forces extérieures qui lui sont appliquées, c'est à dire une force mécanique, notée F, exercée par le vérin et une contrepression, notée P_{eau}, imposée par un cylindre eau-air.



Les forces s'appliquant sur la face supérieure de l'échantillon sont au nombre de quatre, elles sont notées positivement dans le sens de l'axe z:

.1. force mécanique exercée par le vérin et transmise par les pièces (4) et (7) de la cellule oedométrique. Cette force est contrecarrée par l'eau sous pression qui s'applique sur la membrane Bellofram. La résultante transmise à l'échantillon est:

$$F' = F - (P_{eau} + \rho g h_1) \pi \phi_{memb}^2$$

ϕ_{memb} = diamètre de la membrane (2,5 cm)
 $h_1 = 100$ cm

.2. poids des pièces notées (4) et (7) qui reposent sur l'échantillon. Le poids de la pierre poreuse est négligeable devant celui des pistons (4) et (7). Cette force est notée Poids.

.3. force exercée par l'eau sur le sol qui s'écrit:

$$P_i = (P_{eau} + \rho g h_2) \pi \phi^2$$

ϕ : diamètre de l'échantillon (7 cm)
 $h_2 = 102,4$ cm

La pression totale s'exerçant sur la face supérieure de l'éprouvette est la somme de ces forces divisée par la surface de l'échantillon soit:

$$\sigma = \frac{(F' + Poids)}{\pi \phi^2} + \rho g \frac{(h_2 \phi^2 - h_1 \phi_{memb}^2)}{\phi^2} + P_{eau} \frac{(\phi_{memb}^2 - \phi^2)}{\phi^2}$$

— Quand il n'y a pas d'eau dans l'échantillon la pression σ_0 est égale à:

$$\sigma_0 = (F' + \text{Poids}) / \pi \varnothing^2$$

— Quand la pression de l'eau dans la cellule est de 3 bars ($P_{\text{eau}} = 2,9$ bars et $P_i = 3$ bars), la pression σ s'écrit:

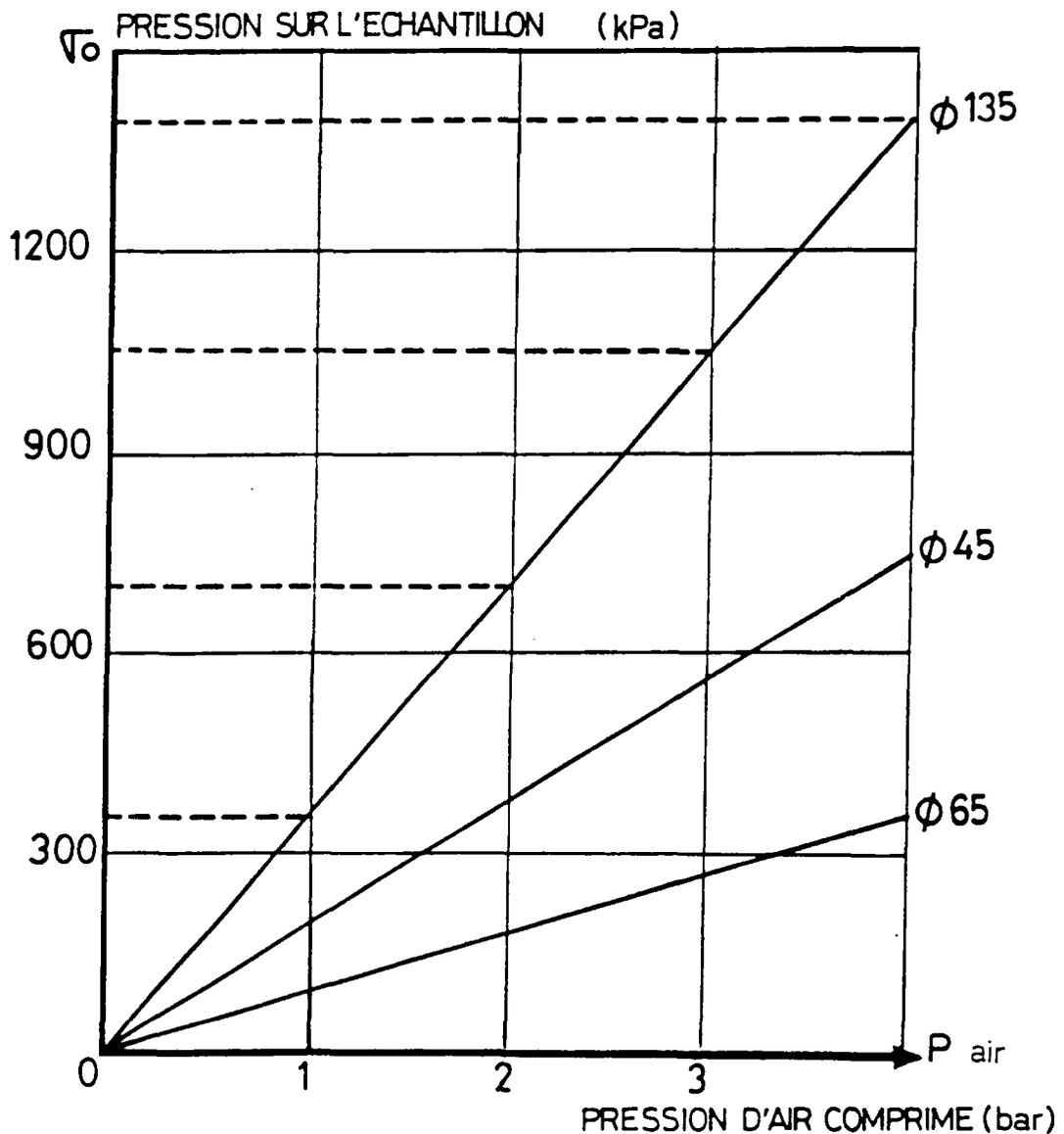
$$\sigma = \sigma_0 + 10 + 270 \text{ (kPa)}$$

$$\sigma = \sigma' + P_i$$

$$\Rightarrow \sigma' = \sigma_0 - 20 \text{ (kPa)}$$

Pour une pression d'air donnée, la pression effective appliquée sur l'échantillon sous 3 bars de pression d'eau est la pression appliquée à l'échantillon en absence d'eau diminuée de 20 kPa.

COURBES D'ÉTALONNAGE DES VERINS



ANNEXE B

MODELISATION DU FLUAGE PAR FELIX

DETERMINATION DES PARAMETRES α , β et ε_f DES COURBES THEORIQUES DU FLUAGE

La méthode présentée a été établie par FELIX (1981). L'équation de la courbe théorique du tassement en fonction du temps s'écrit:

$$c(t) = \varepsilon_f [1 - \exp(-\alpha.t^\beta)]$$

La déformation finale ε_f est déduite de la dernière valeur du tassement mesurée ε_n au cours de l'essai et de la première, mesurée juste après la fin de la consolidation primaire. (t_n) et (t_1) sont les termes correspondants:

$$\varepsilon_f = \varepsilon_1 + (\varepsilon_n - \varepsilon_1) \frac{\lg t_\infty - \lg t_1}{\lg t_n - \lg t_1}$$

t_∞ est fixé arbitrairement à 100 ans.

Les paramètres α et β sont déterminés à partir des déformations mesurées ε_i , et des temps t_i correspondants, après transformation par une fonction logarithmique suivant les formules:

$$\varepsilon_i = \ln \left[\ln \frac{\varepsilon_f}{\varepsilon_f - \varepsilon_i} \right] \quad \text{et} \quad t_i = \ln t$$

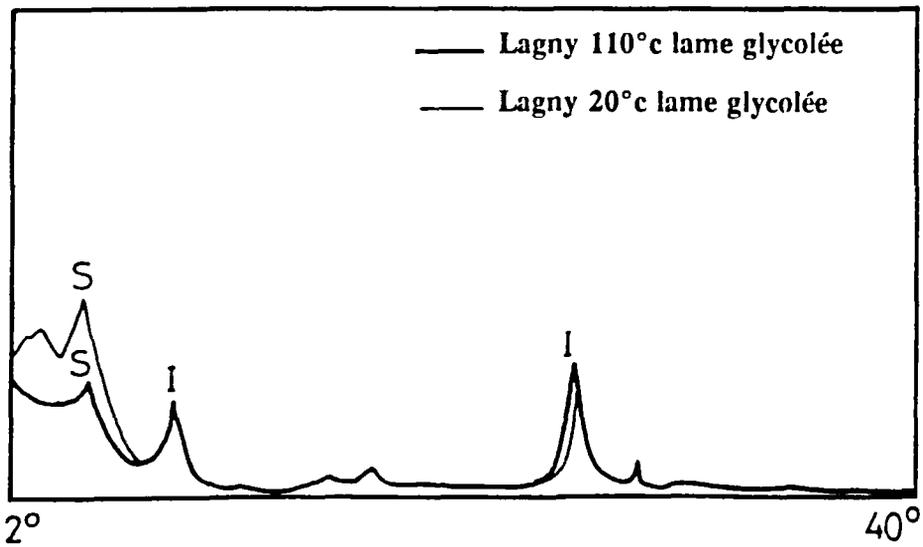
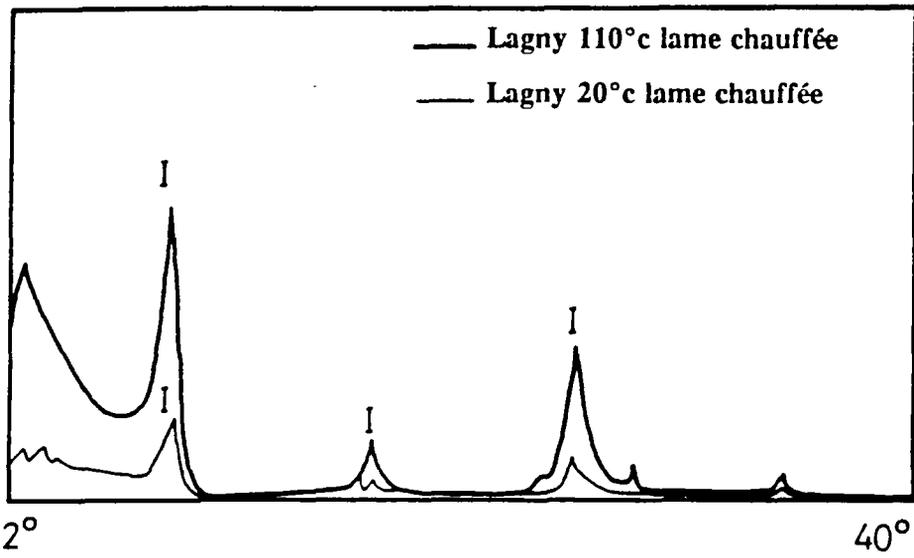
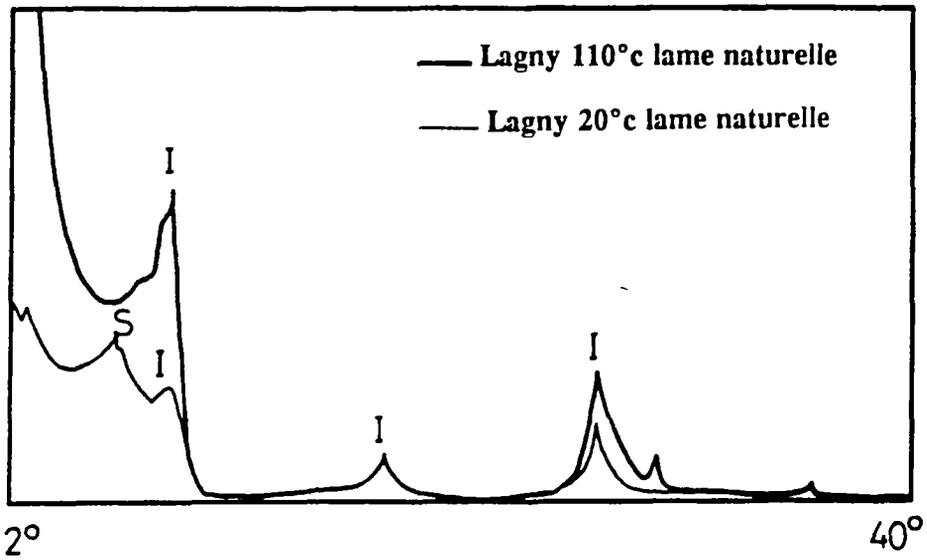
β : pente de la droite des moindres carrés qui lie ces points (t_i, ε_i)

α : ordonnée à l'origine de cette droite

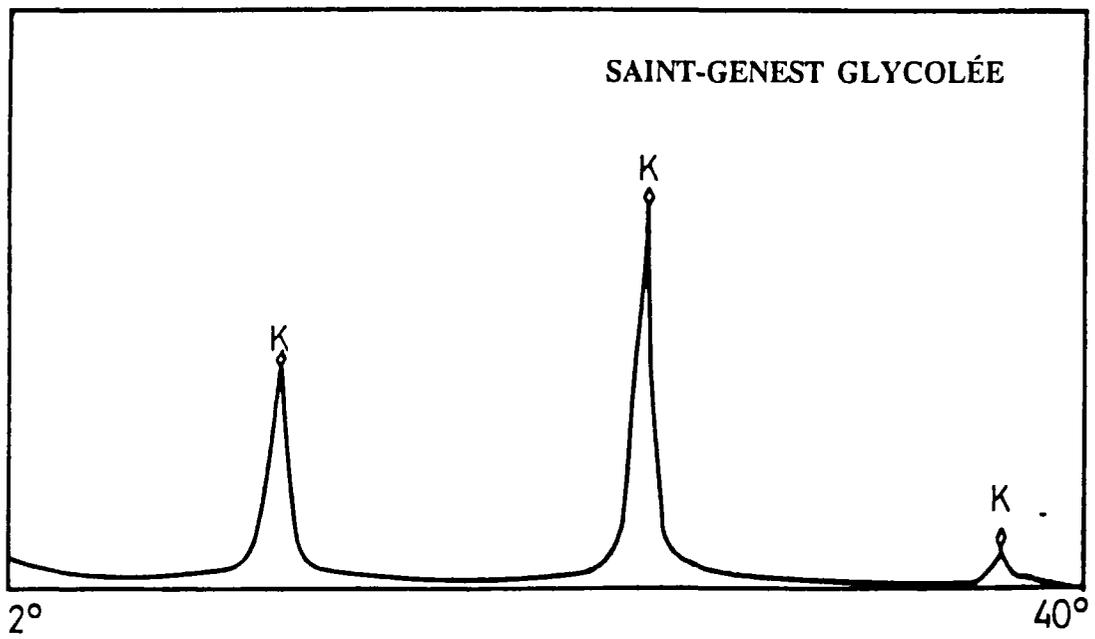
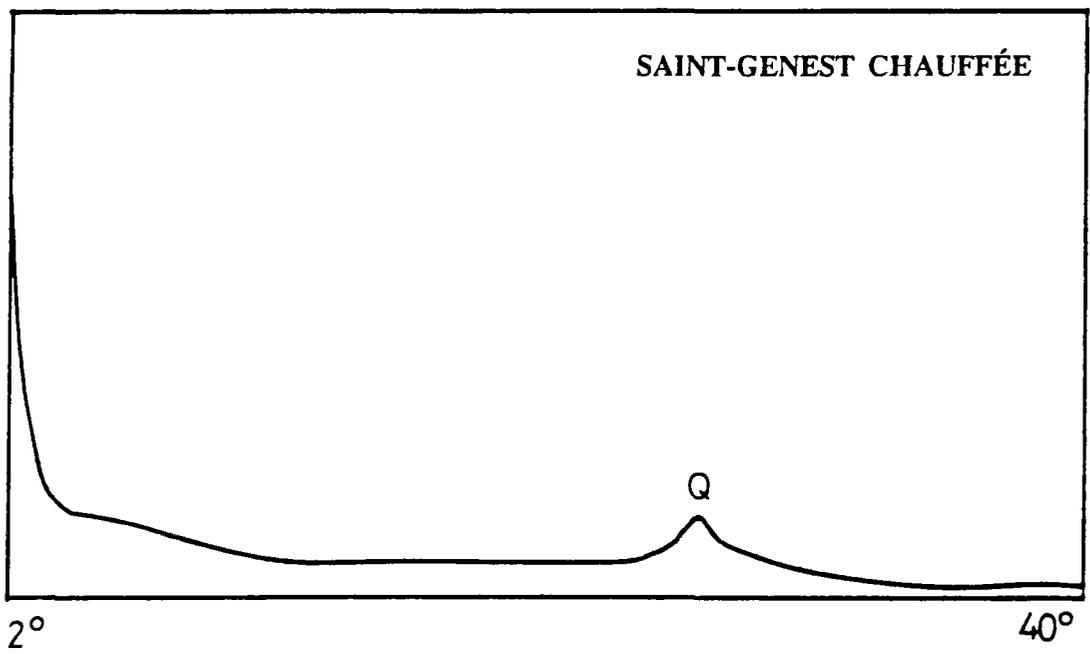
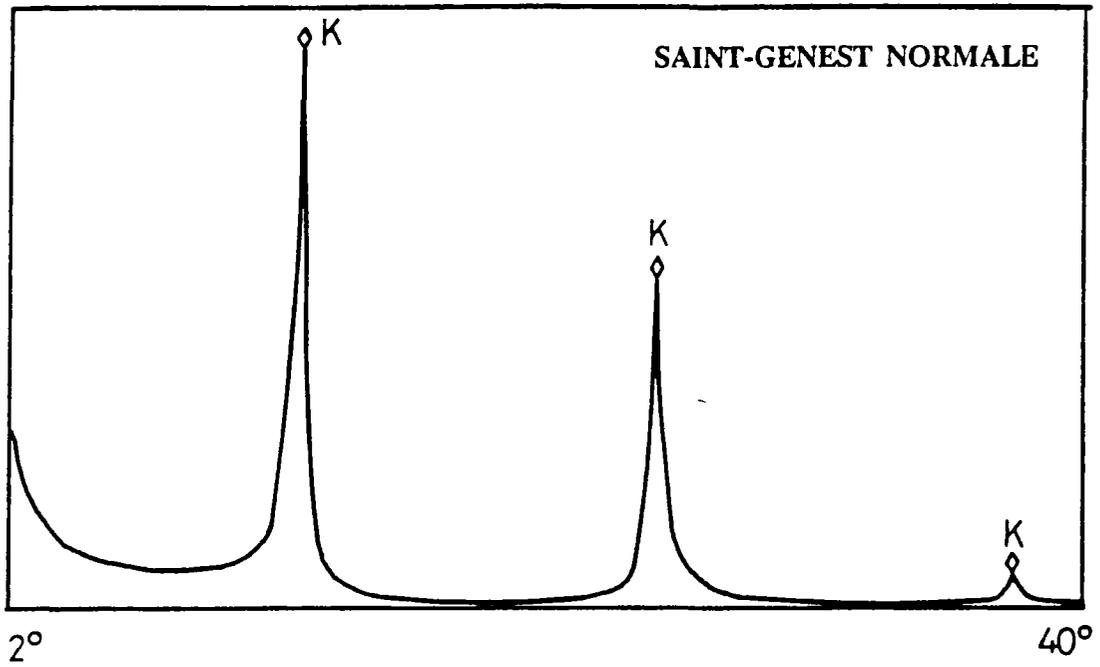
ANNEXE C

RAYONS X

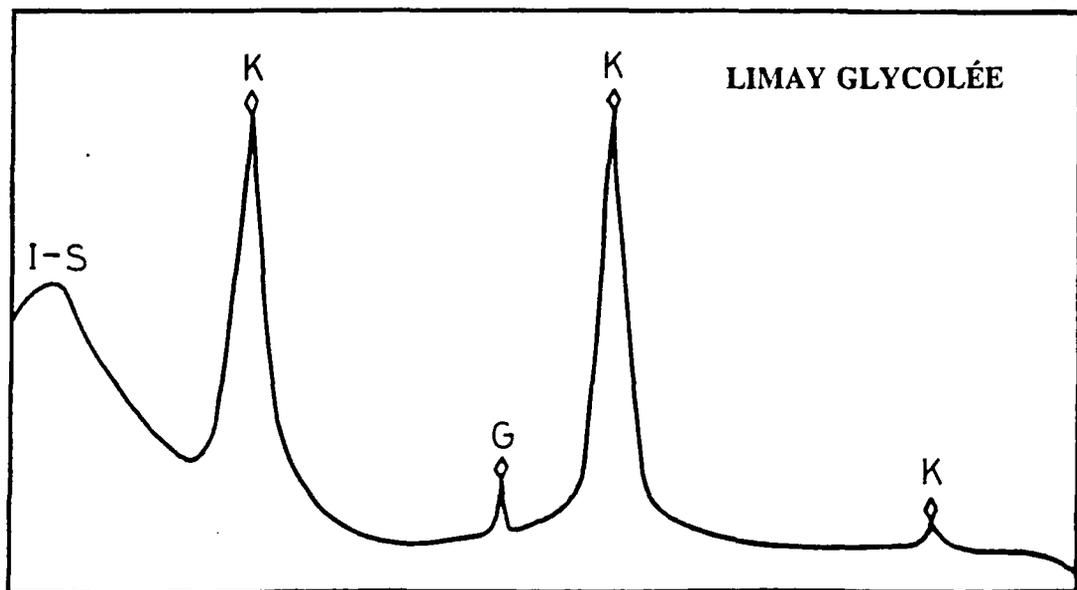
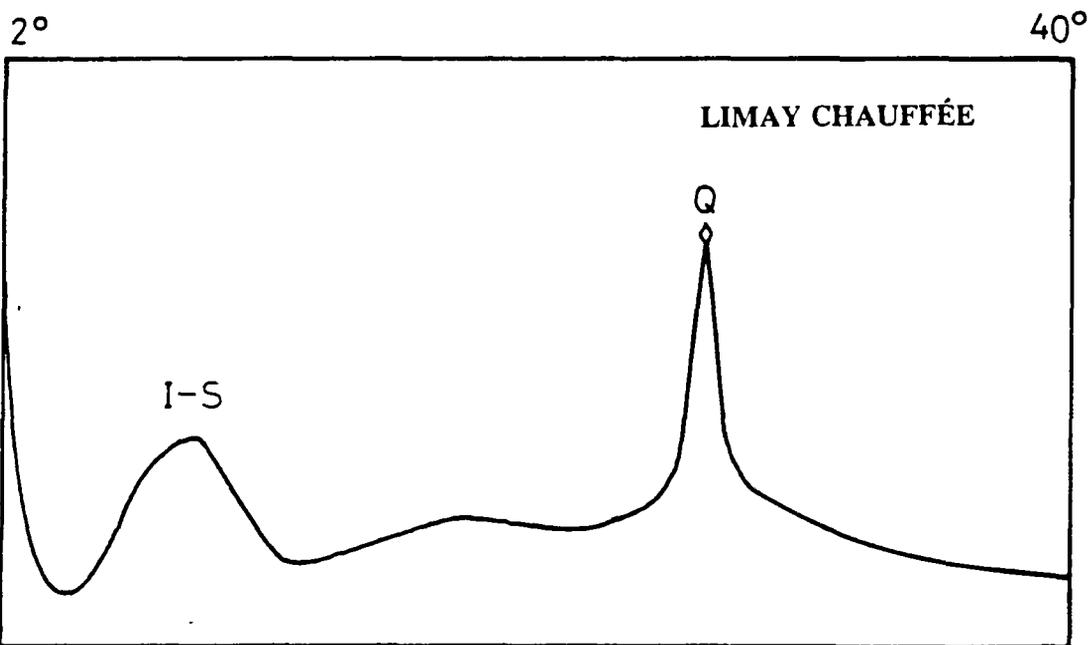
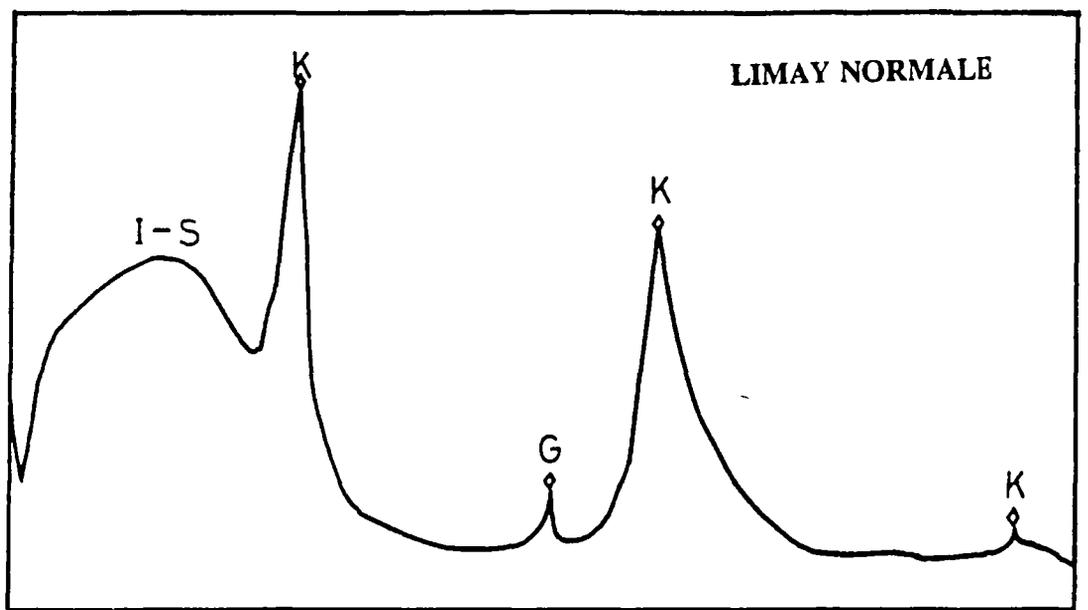
LAGNY : 110°C - 20°C



Diffractométrie aux rayons X : SAINT-GENEST 20°C



Diffraction aux rayons X : LIMAY 20°C



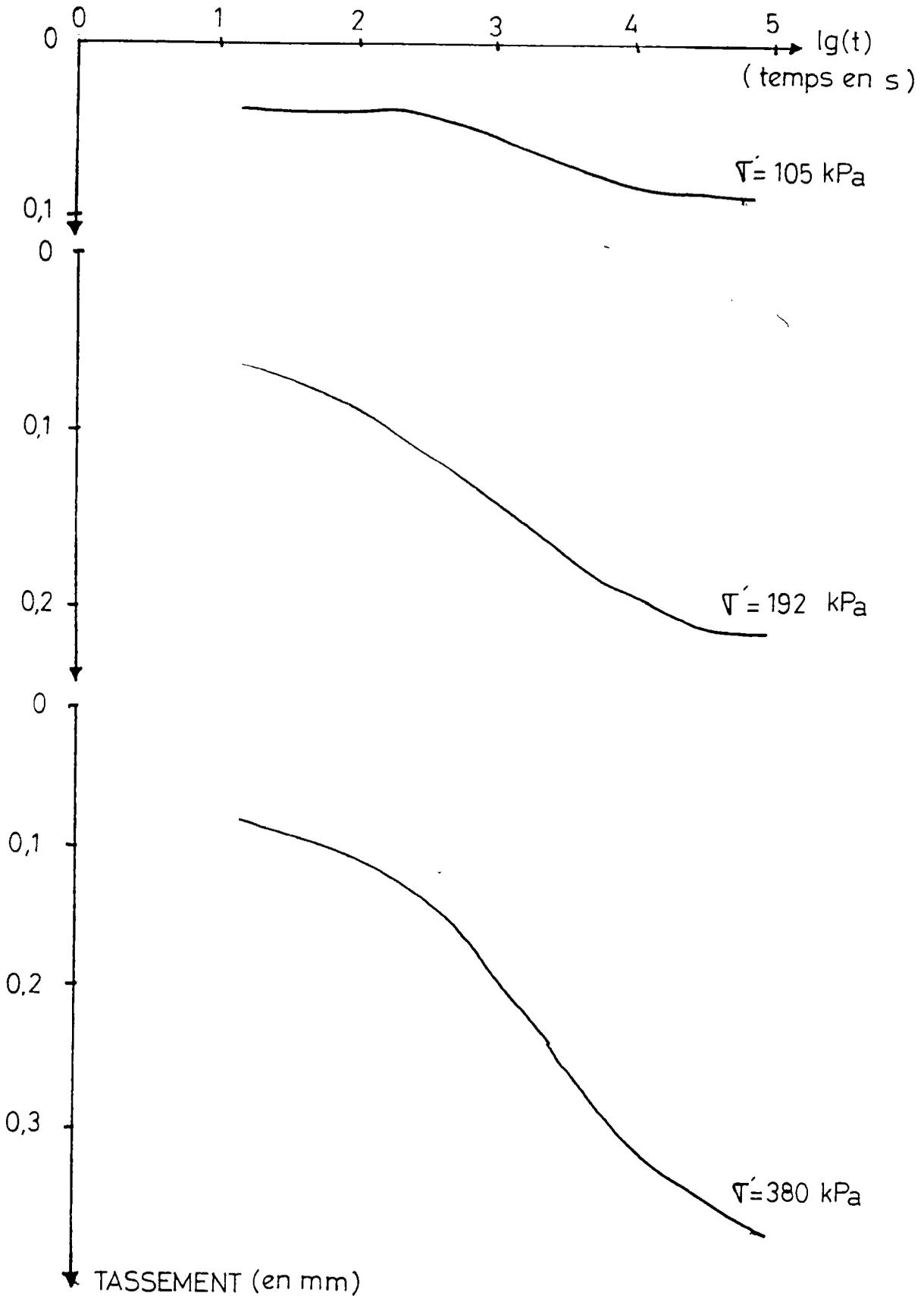
2° 40°

ANNEXE D

**COURBES DE CONSOLIDATION CORRESPONDANT AUX
DIFFERENTS PALIERS DES ESSAIS OEDOMETRIQUES
DECRIIS AU PARAGRAPHE 5.1.**

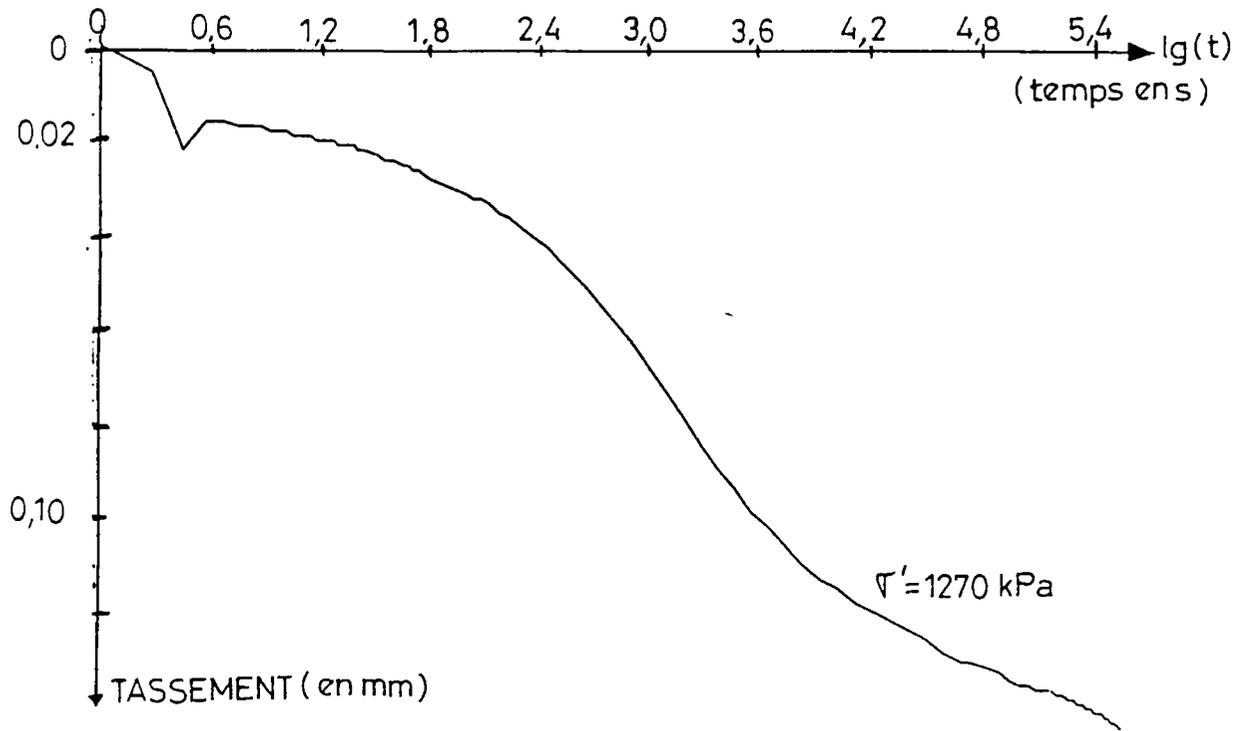
ESSAIS OEDOMETRIQUES : COURBES (dh-lg(t))

LAGNY 20°C (w=33,5% - e₀=0,920)



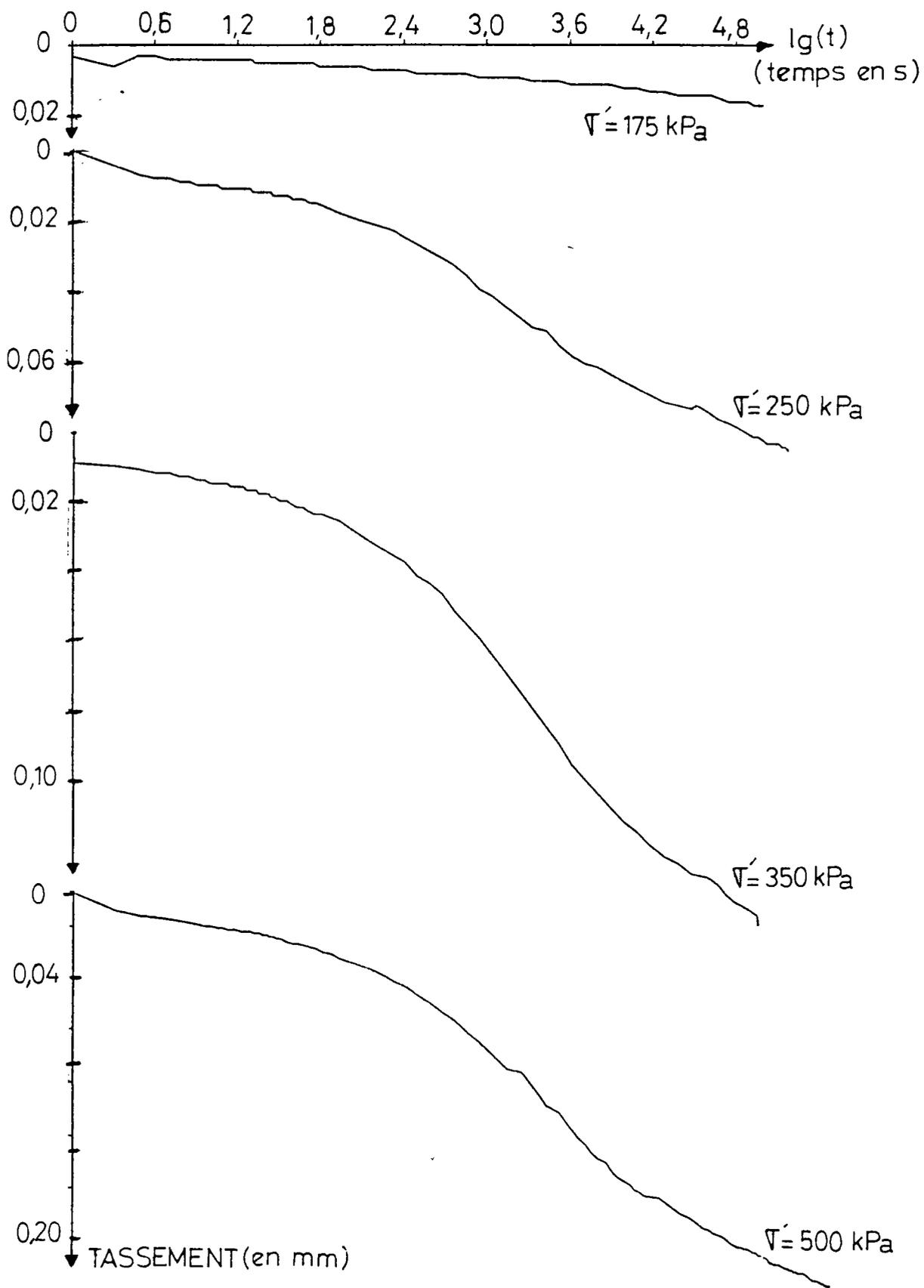
ESSAIS OEDOMETRIQUES : COURBES (dh-lg(t))

LAGNY 20°C (suite)



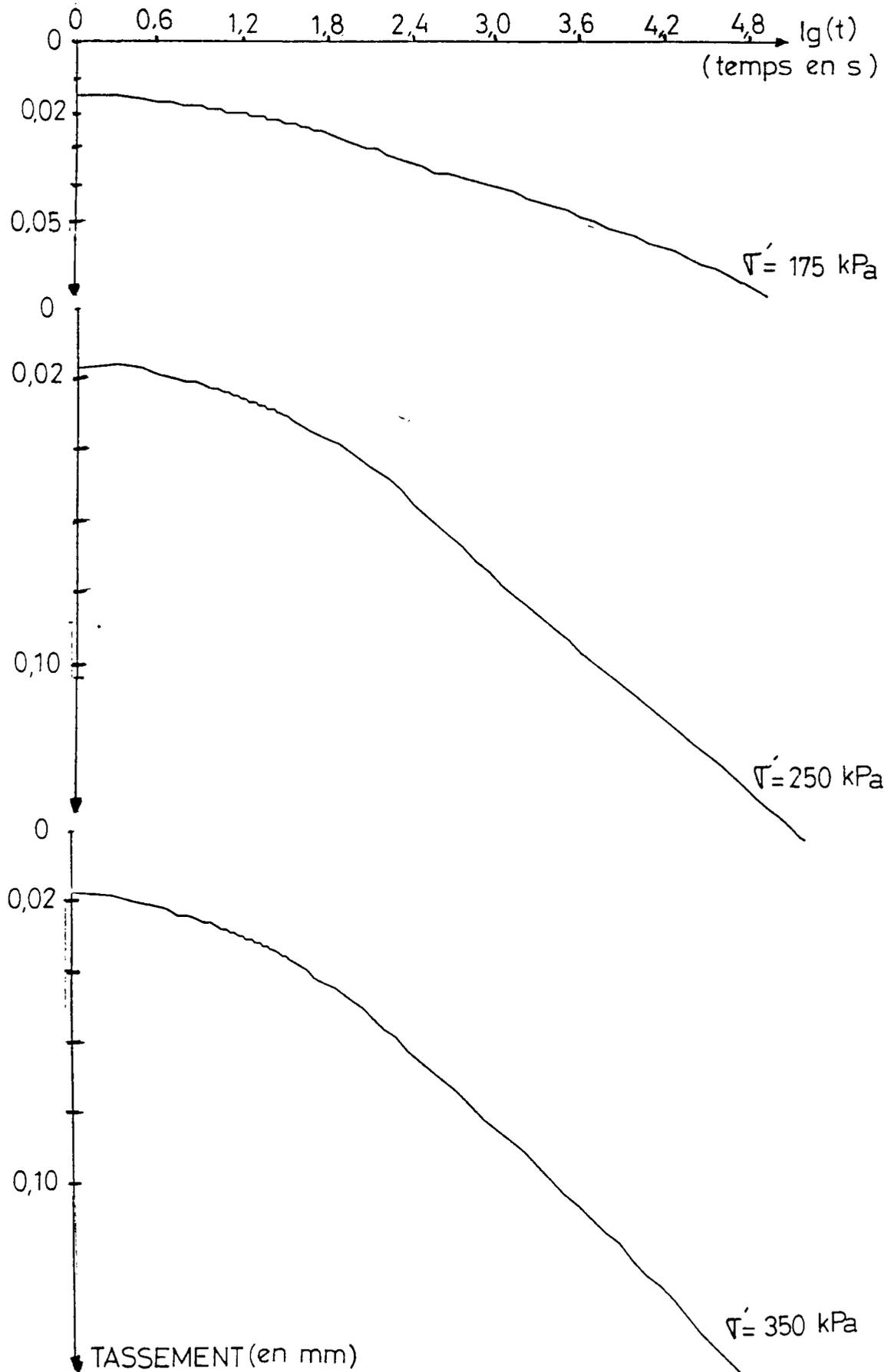
ESSAIS OEDOMETRIQUES : COURBES (dh-lg(t))

LAGNY 50°C (w=30,6% - e₀=0,827)



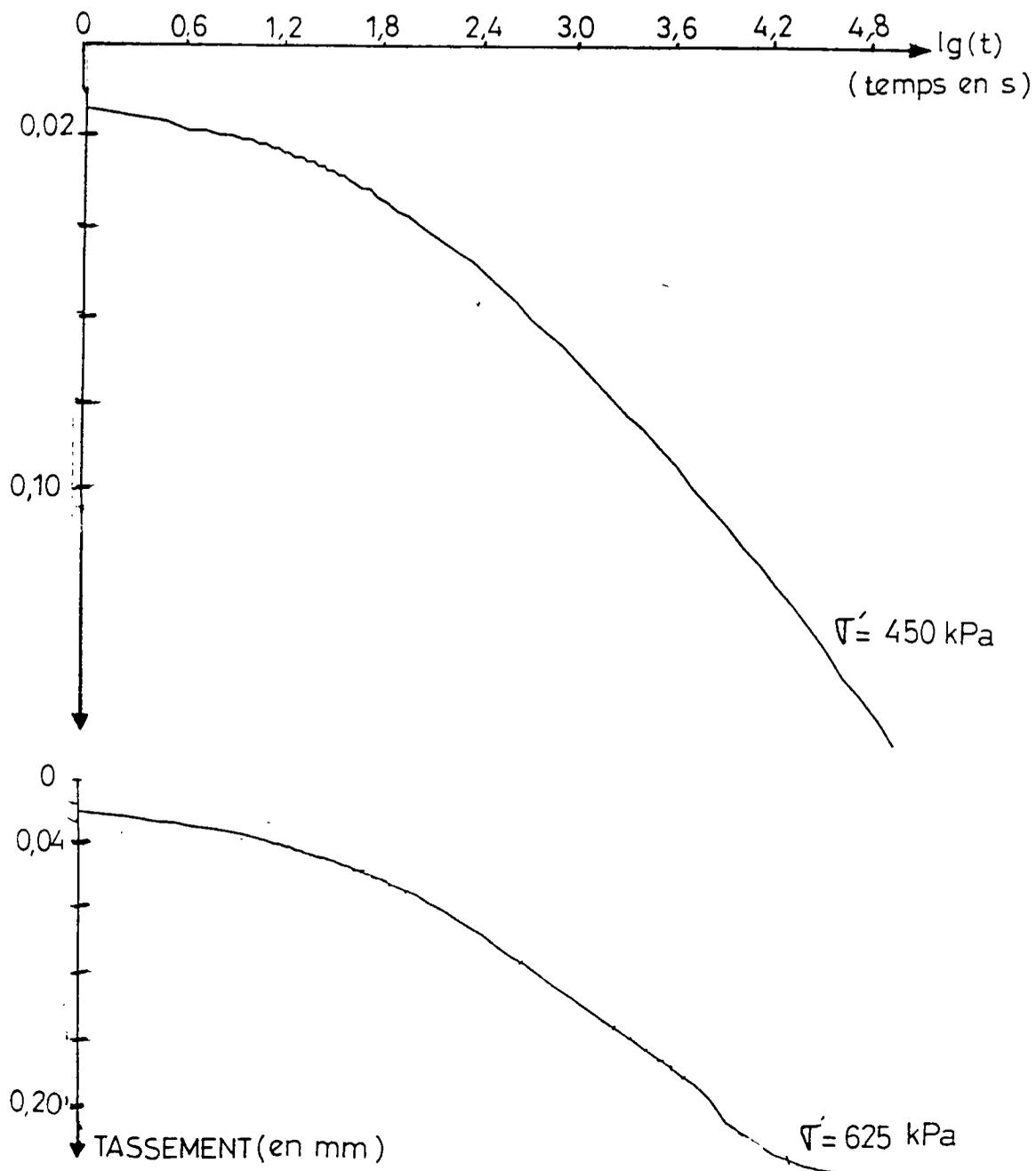
ESSAIS OEDOMETRIQUES : COURBES (dh-lg(t))

LAGNY 110°C (w=30,2% - e₀=0,824)



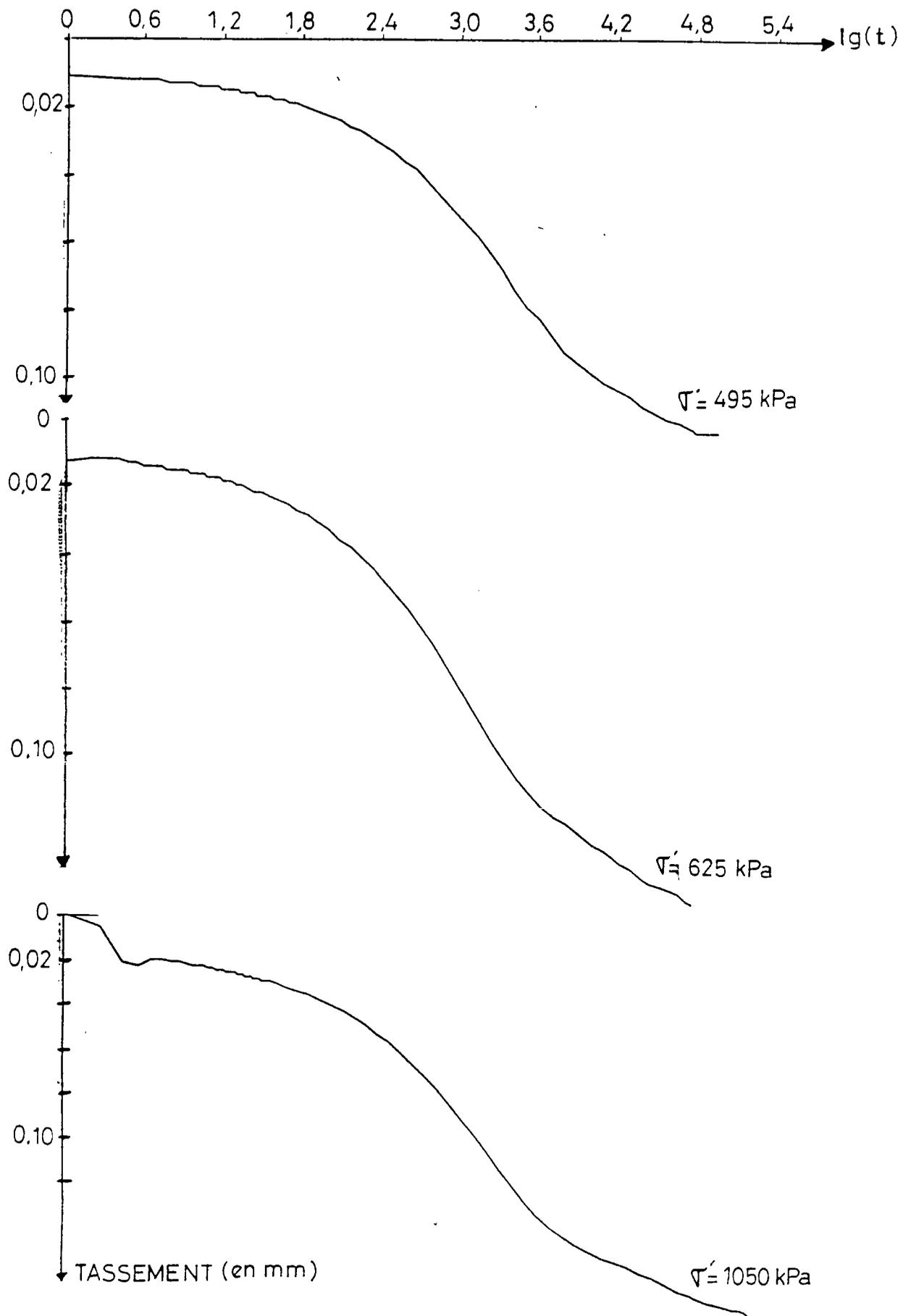
ESSAIS OEDOMETRIQUES : COURBES (dh-lg(t))

LAGNY 110°C (suite)



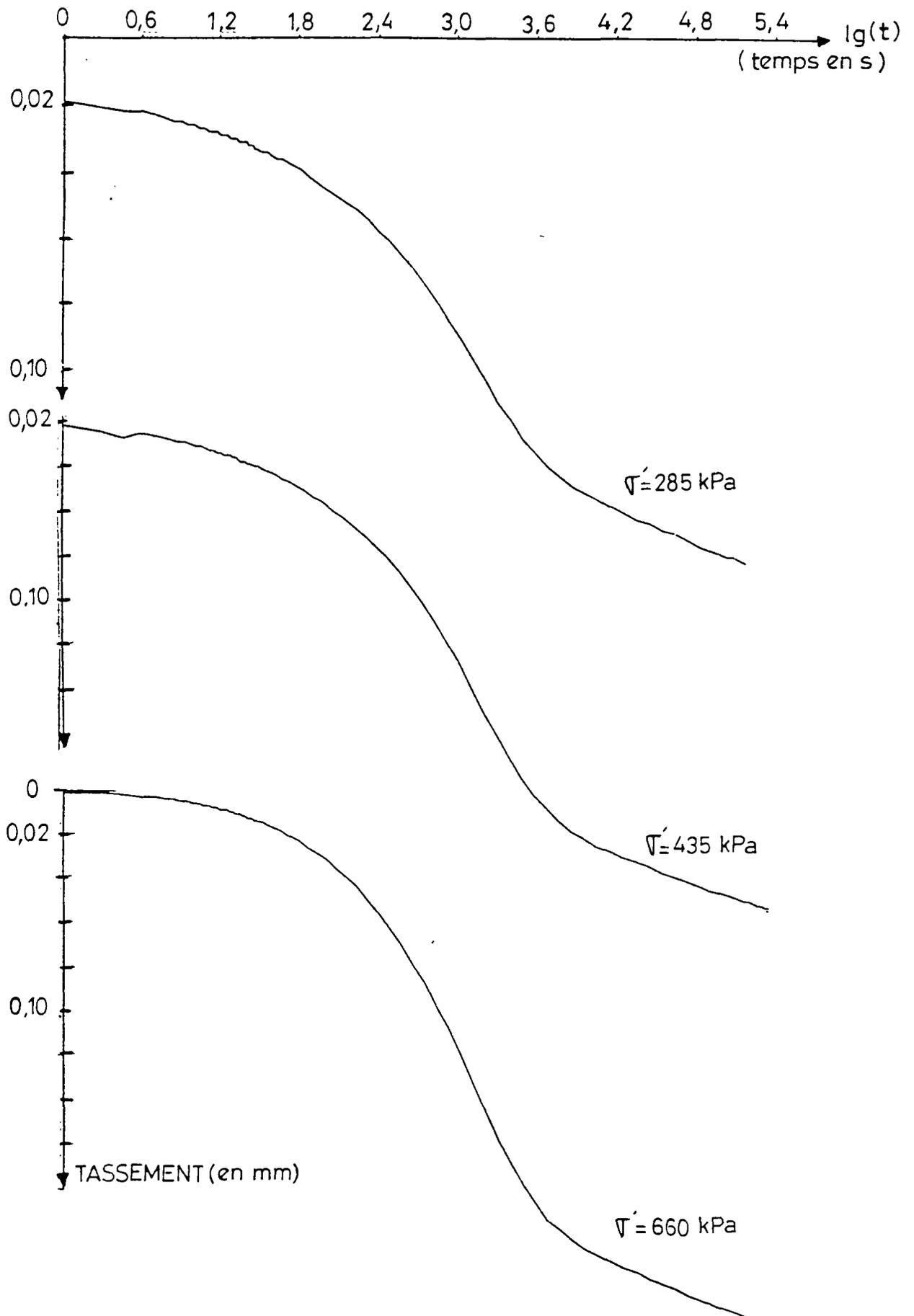
ESSAIS OEDOMETRIQUES : COURBES (dh-lg(t))

ST GENEST 27°C (w=24,9% - e₀=0,650)



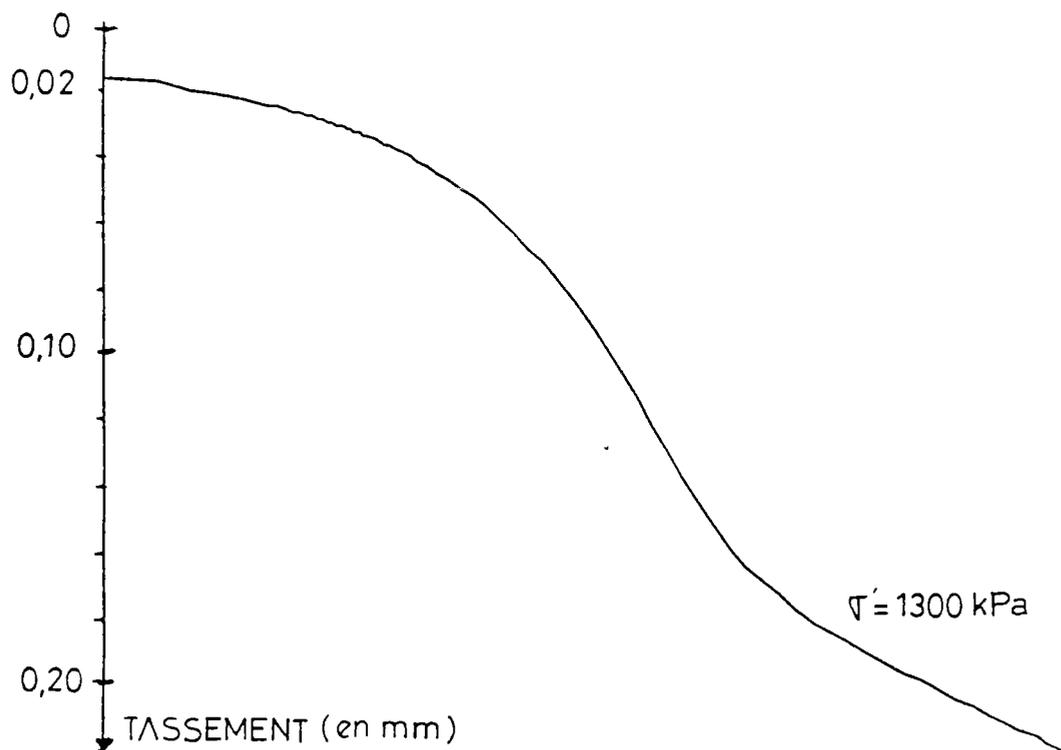
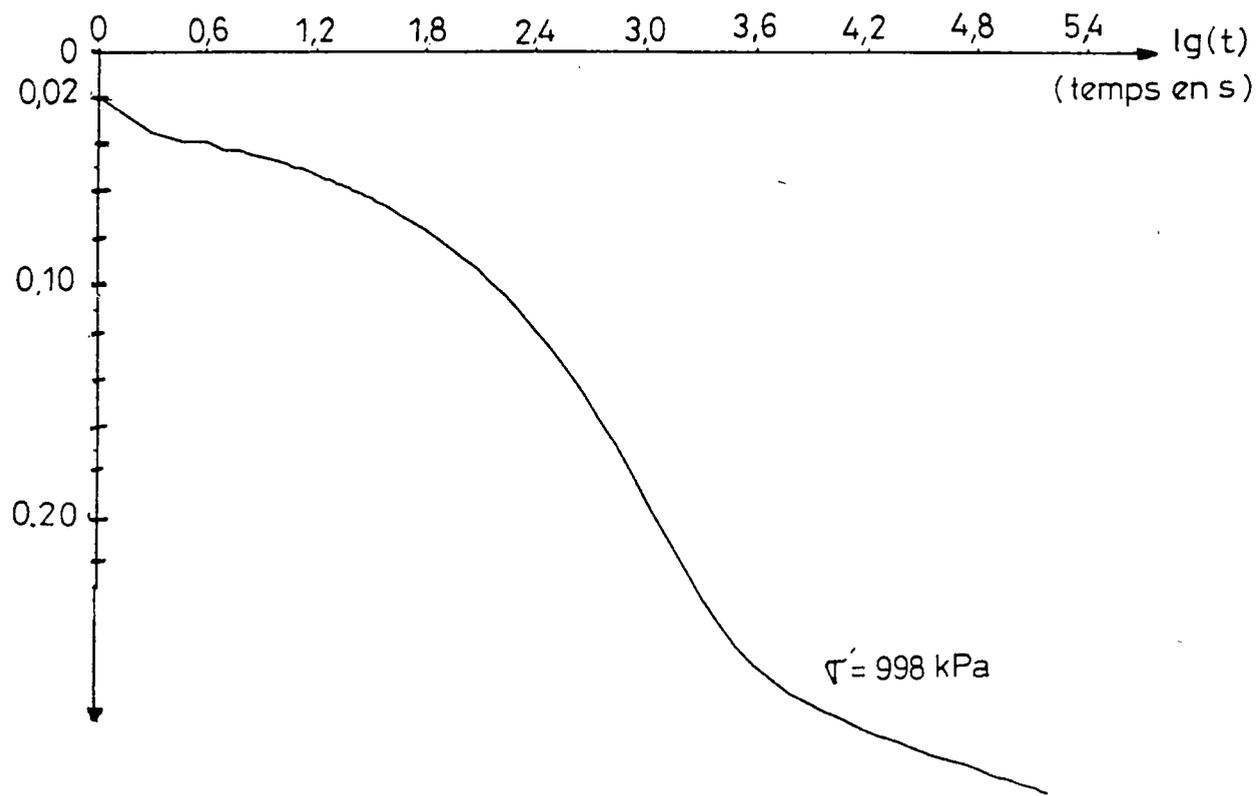
ESSAIS OEDOMETRIQUES : COURBES (dh-lg(t))

ST GENEST 50°C (w=27,5% - e₀=0,708)



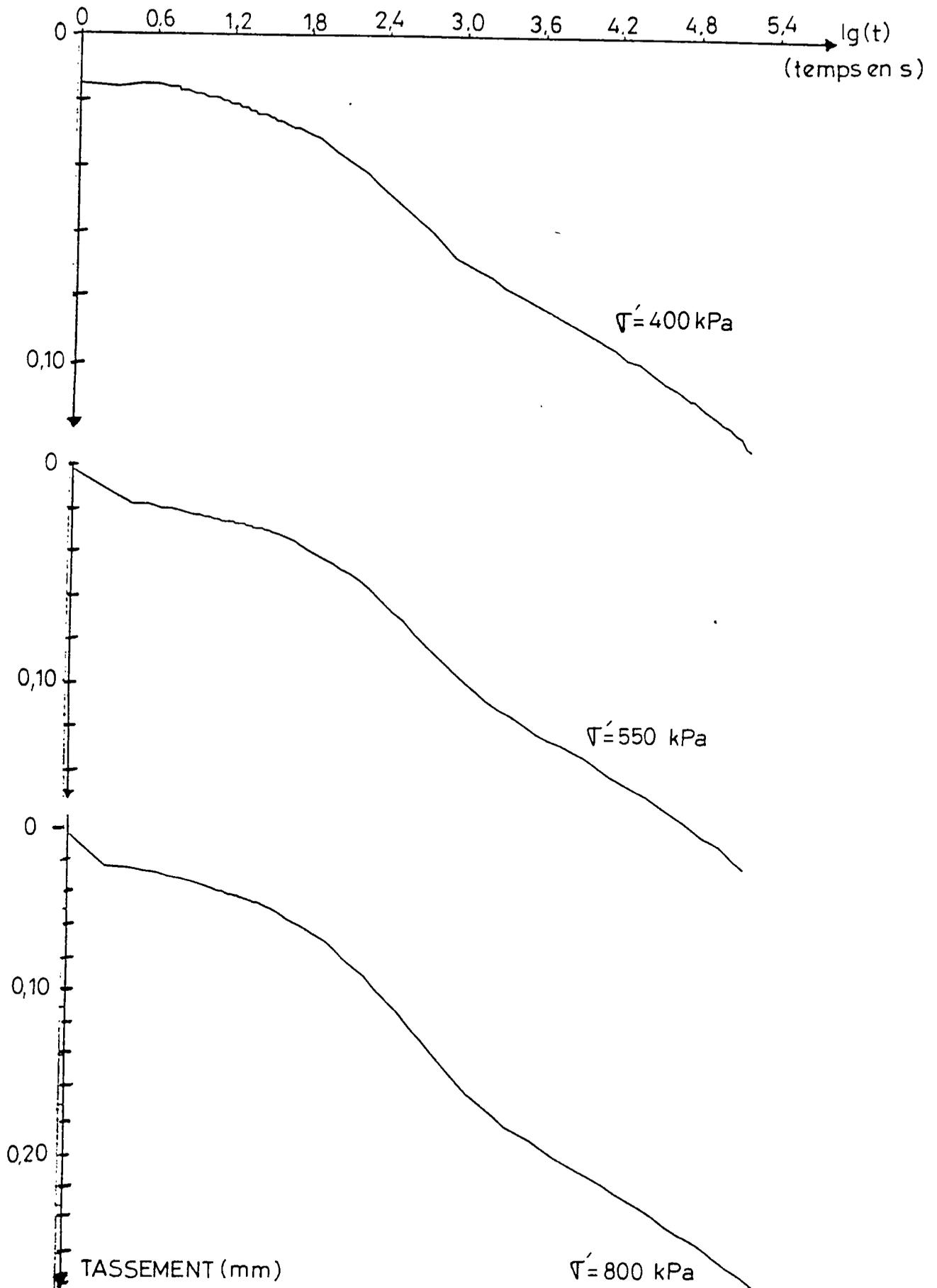
ESSAIS OEDOMETRIQUES : COURBES (dh-lg(t))

ST GENEST 50°C (suite)



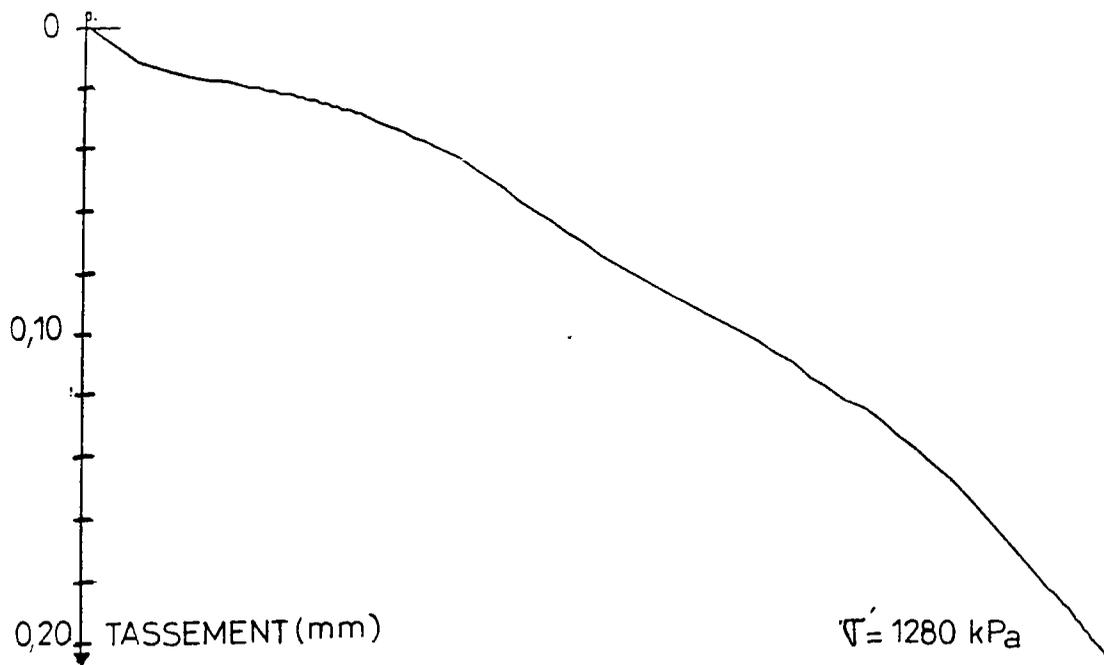
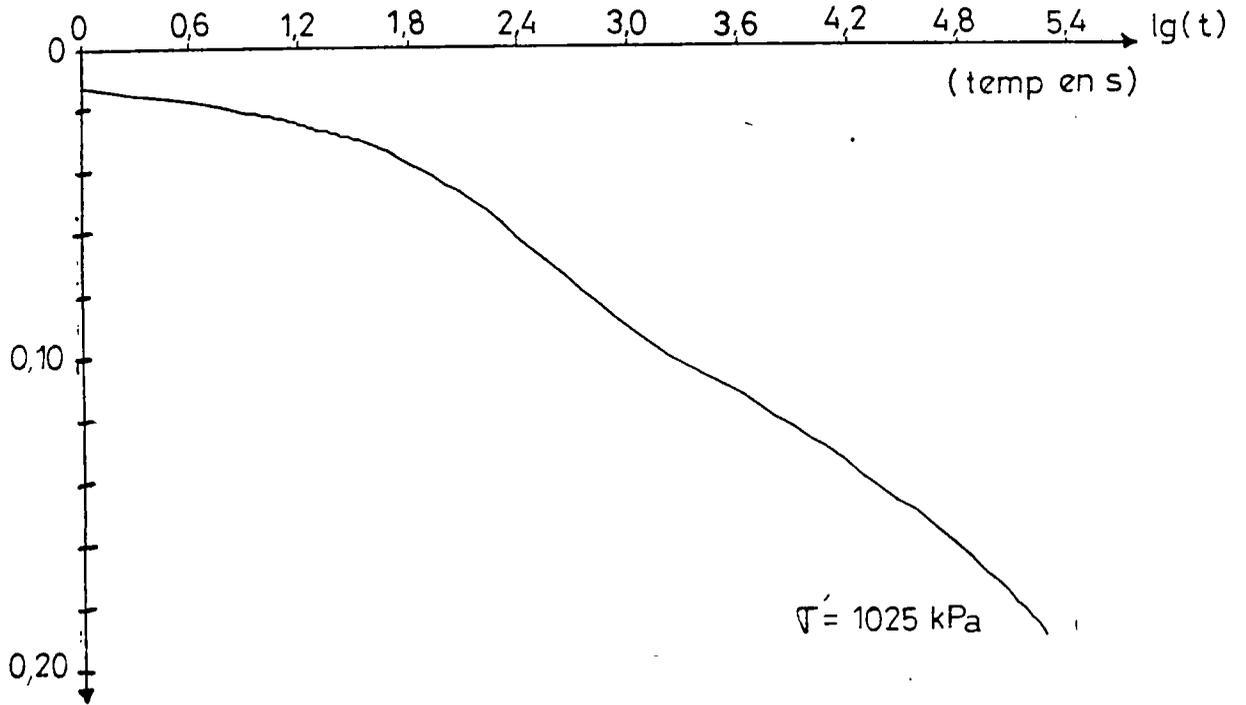
ESSAIS OEDOMETRIQUES : COURBES (dh-lg(t))

ST GENEST 110°C (w=25,4% - e₀=0,668)



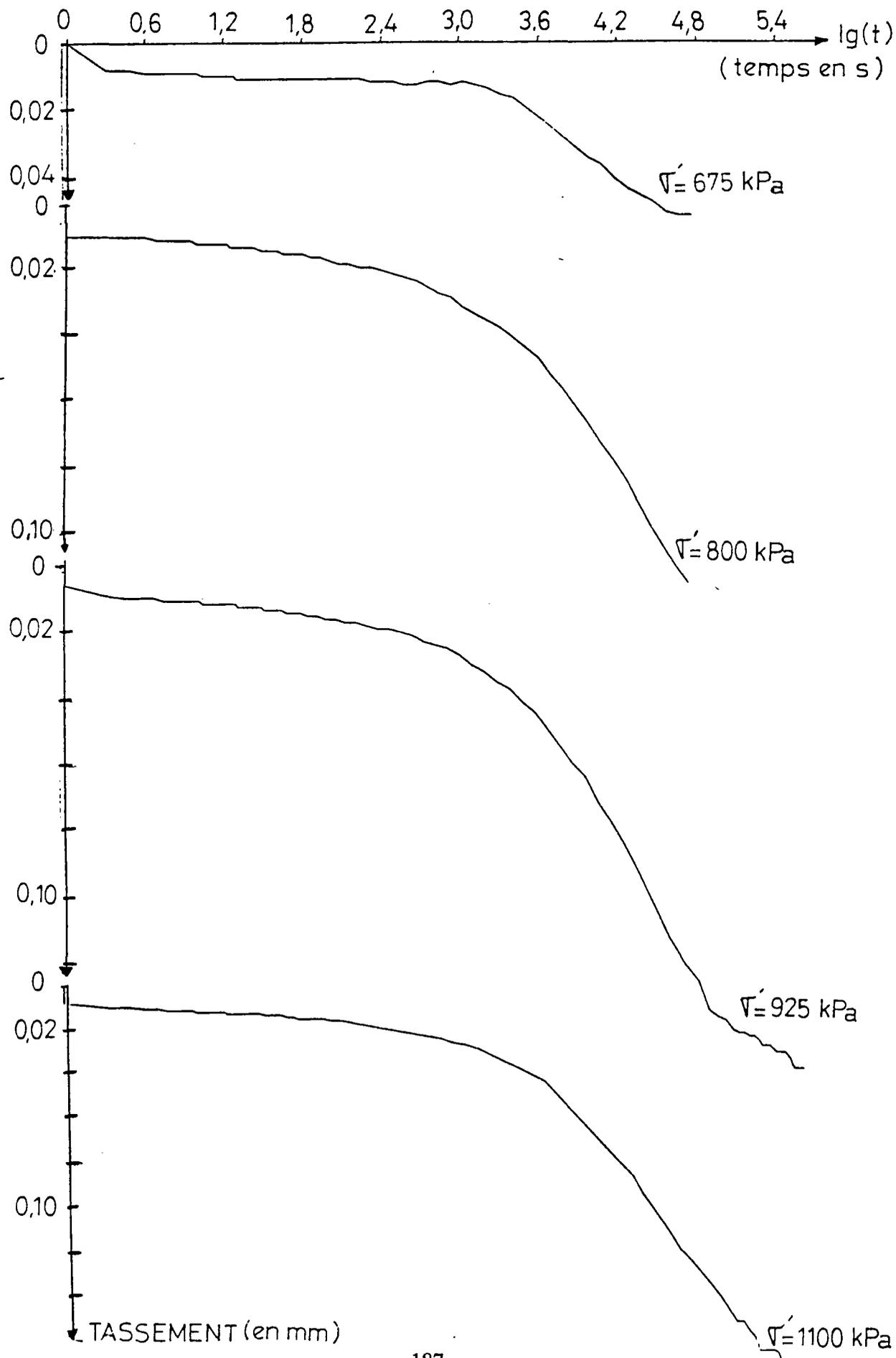
ESSAIS OEDOMETRIQUES : COURBES (dh-lg(t))

ST GENEST 110°C (suite)



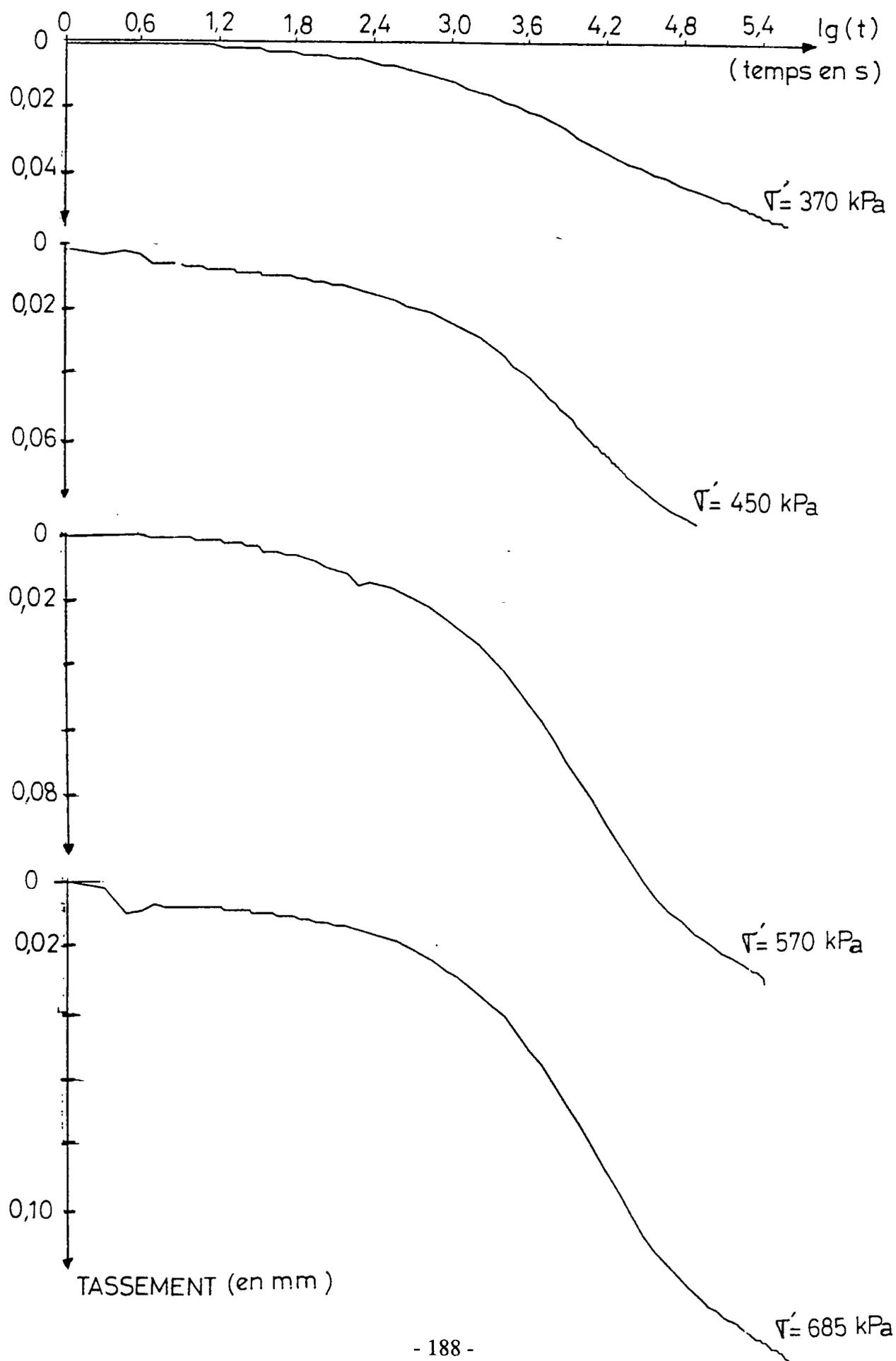
ESSAIS OEDOMETRIQUES : COURBES (dh-lg(t))

LIMAY 20°C (w=28,6% - e₀=0,787)



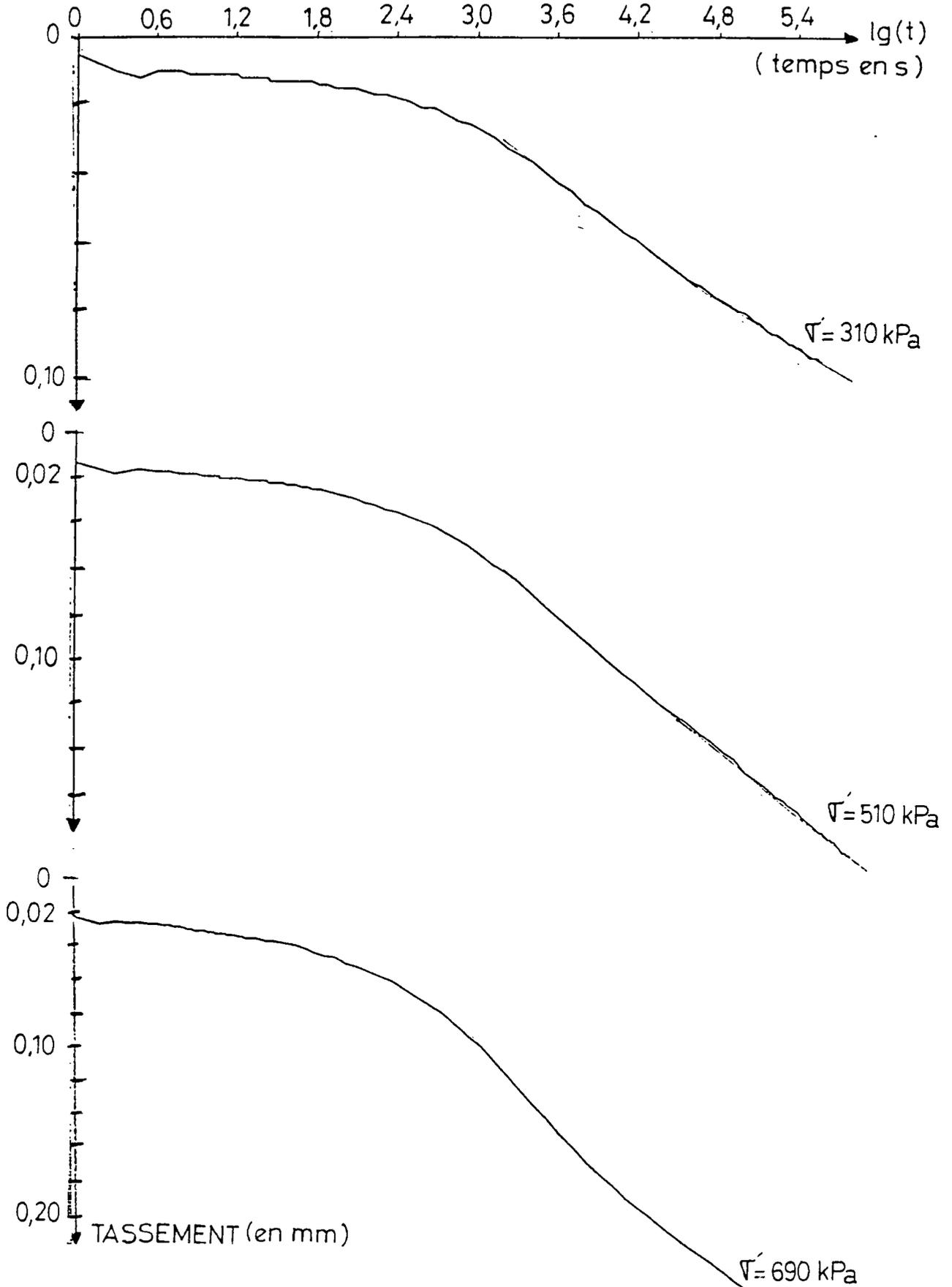
ESSAIS OEDOMETRIQUES : COURBES (dh-lg(t))

LIMAY 50°C (w=28,3% - e₀=0,757)



ESSAIS OEDOMETRIQUES : COURBES (dh-lg(t))

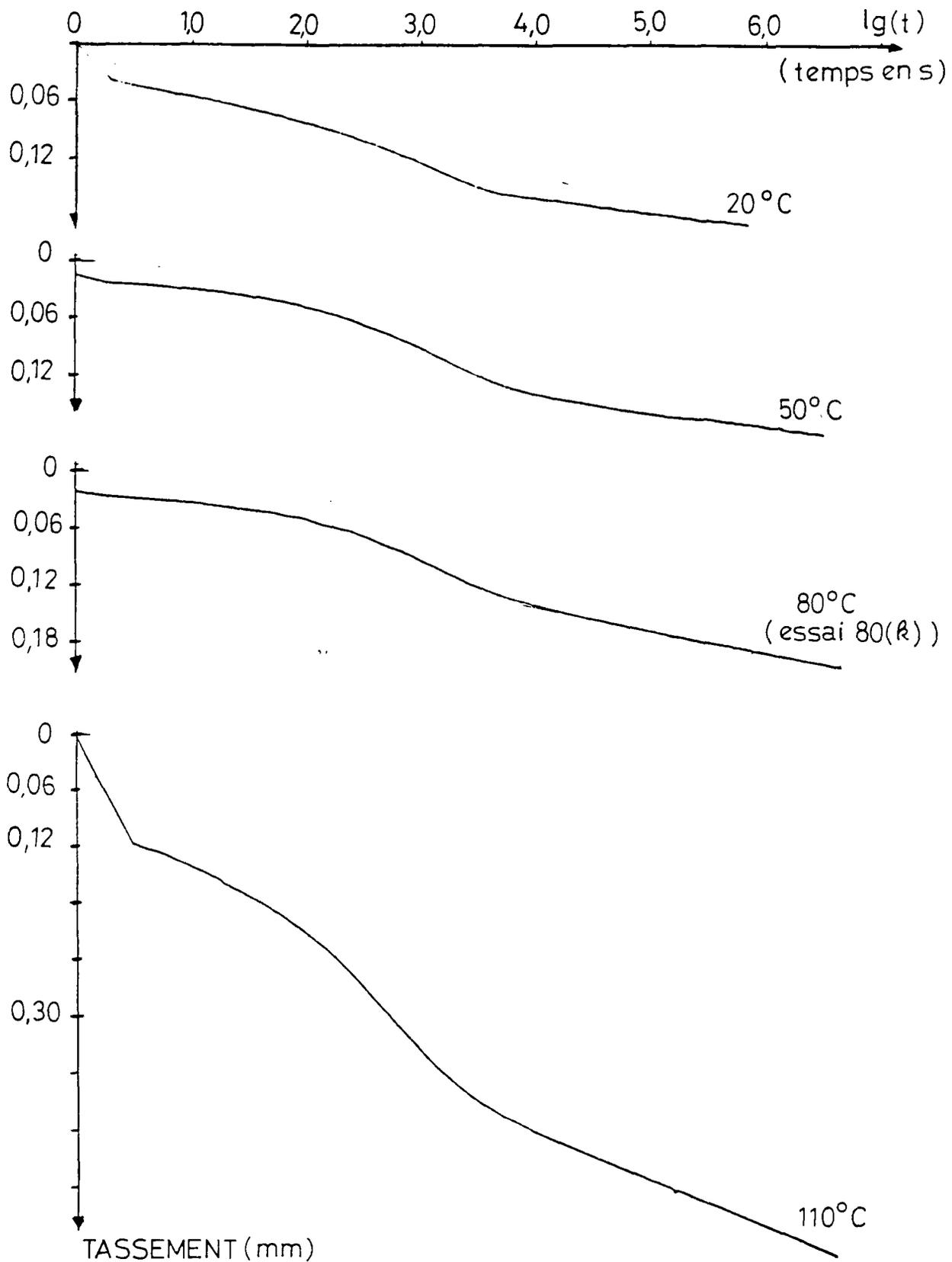
LIMAY 110°C (w=29,2% - e₀=0,793)



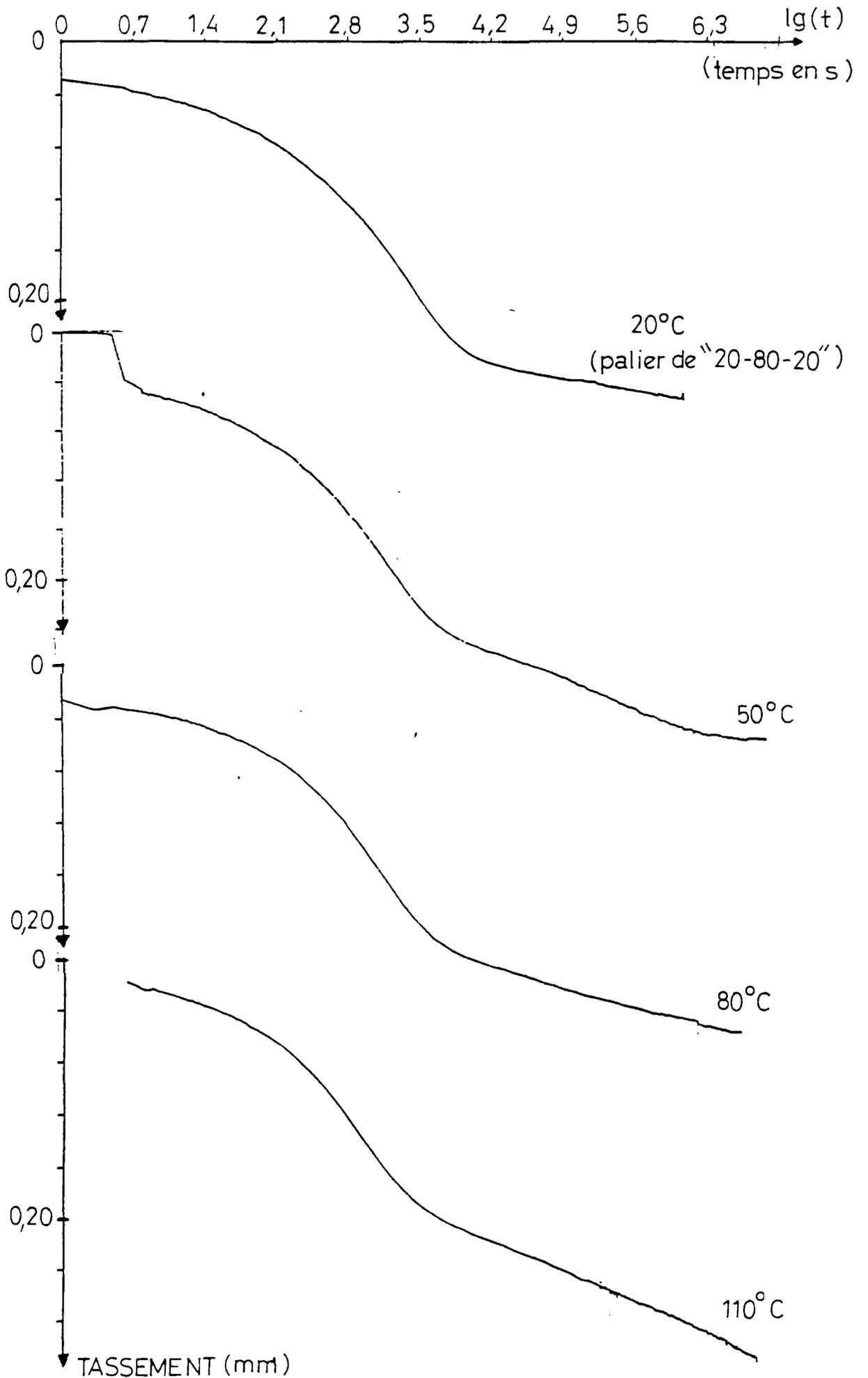
ANNEXE E

**COURBES DE CONSOLIDATION POUR LES ECHANTILLONS
MIS SOUS CHARGE A UNE TEMPERATURE CONSTANT DE
20, 50, 80 ou 110°C.**

COURBES (dh-lg(t)) : LAGNY

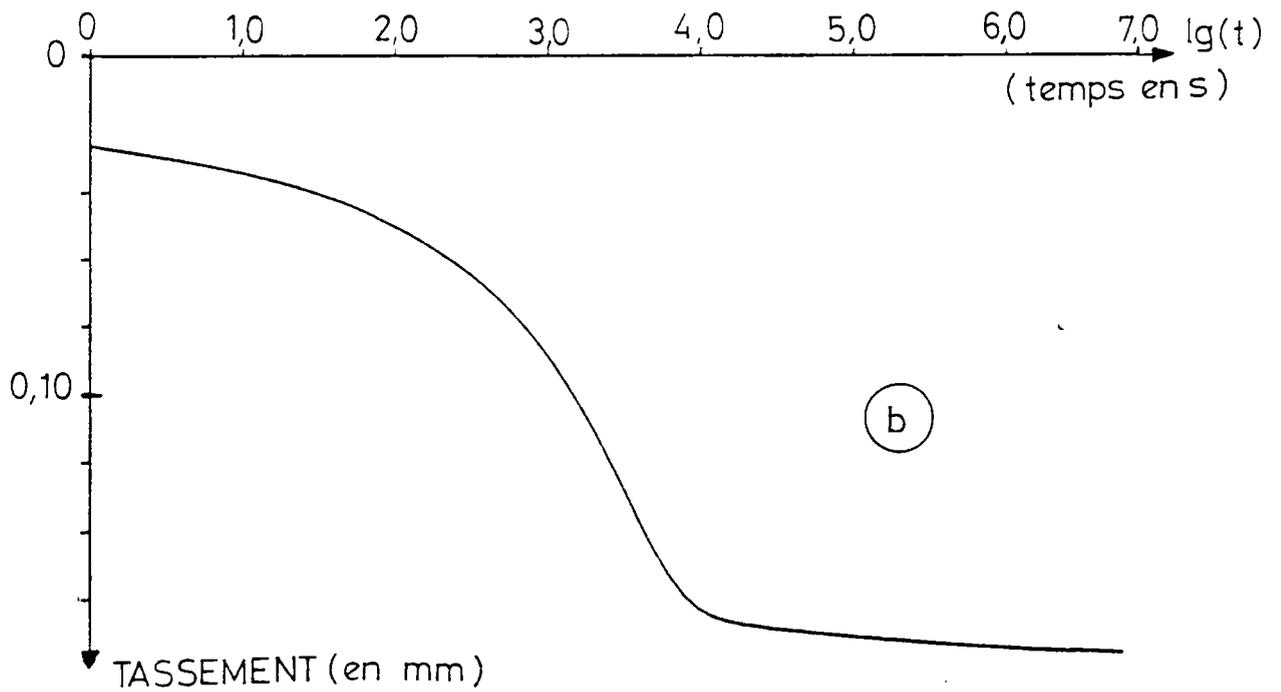
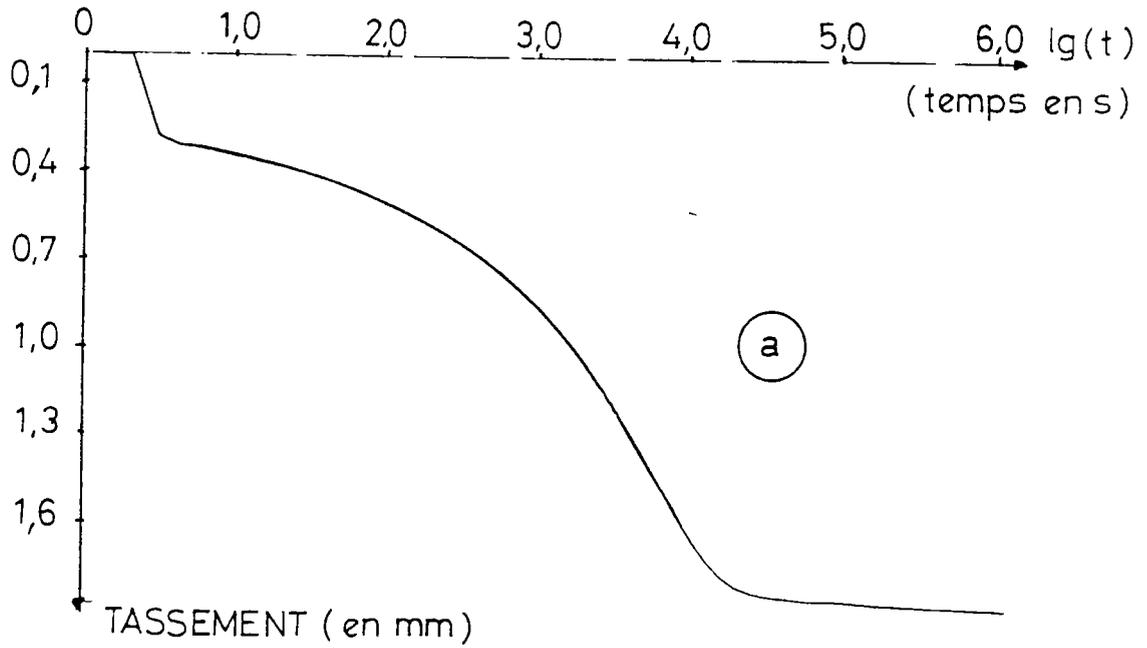


COURBES (dh-lg(t)) : ST GENEST.N



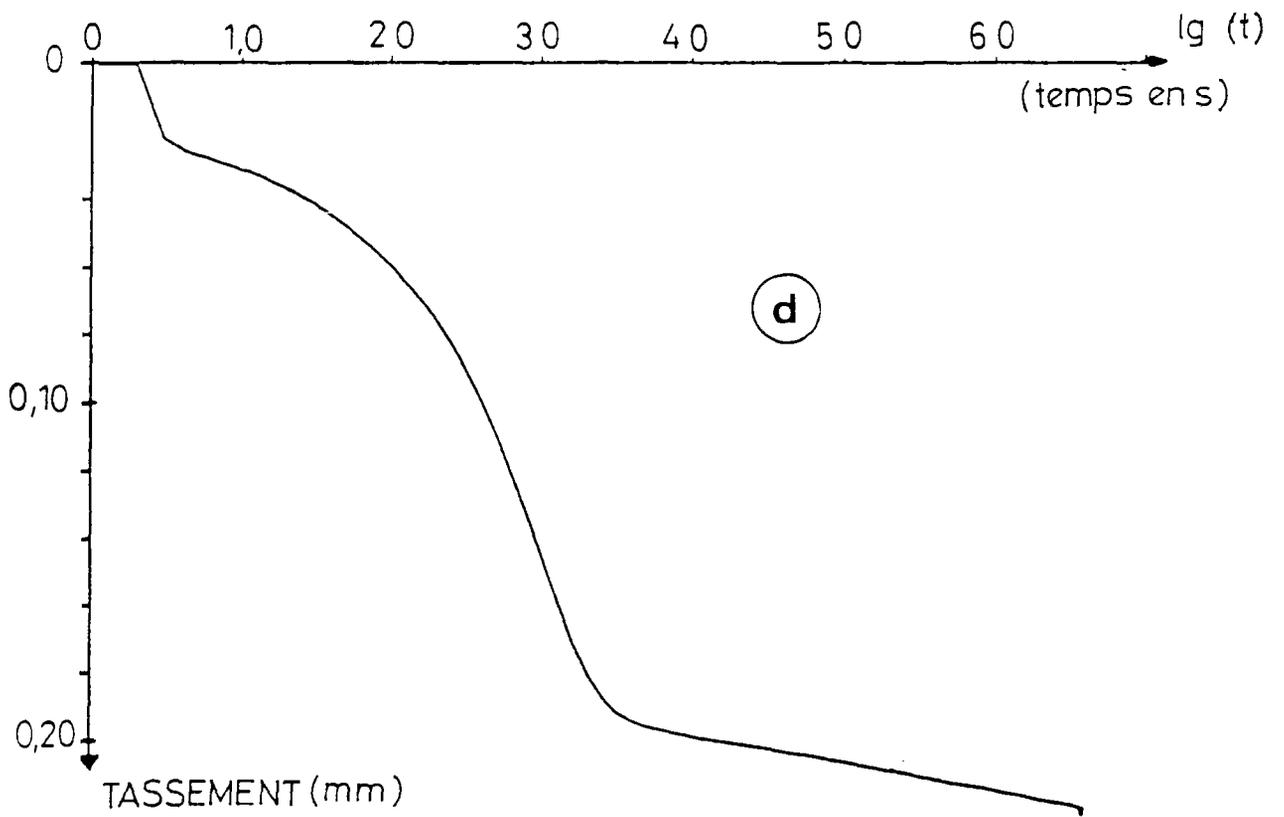
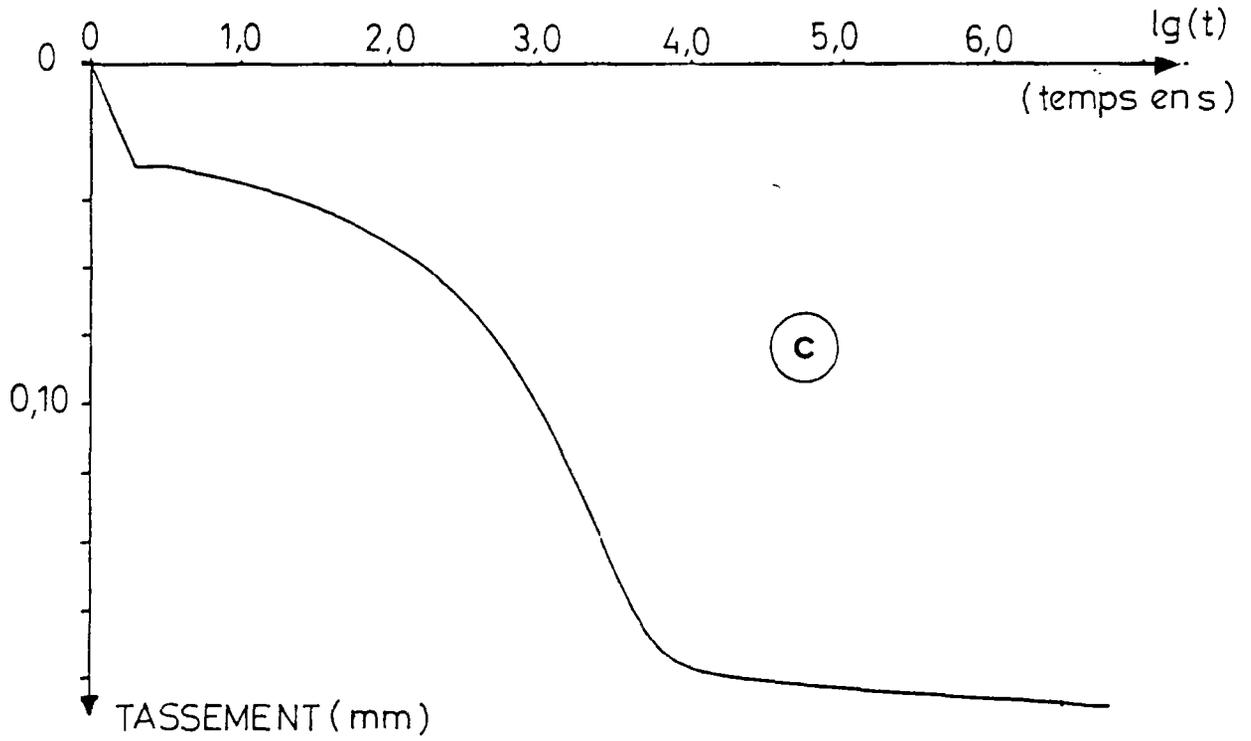
COURBES (dh-lg(t)) : ST GENEST.G

(a) 20°C (palier de essai "20-110-20")
(b) 50°C

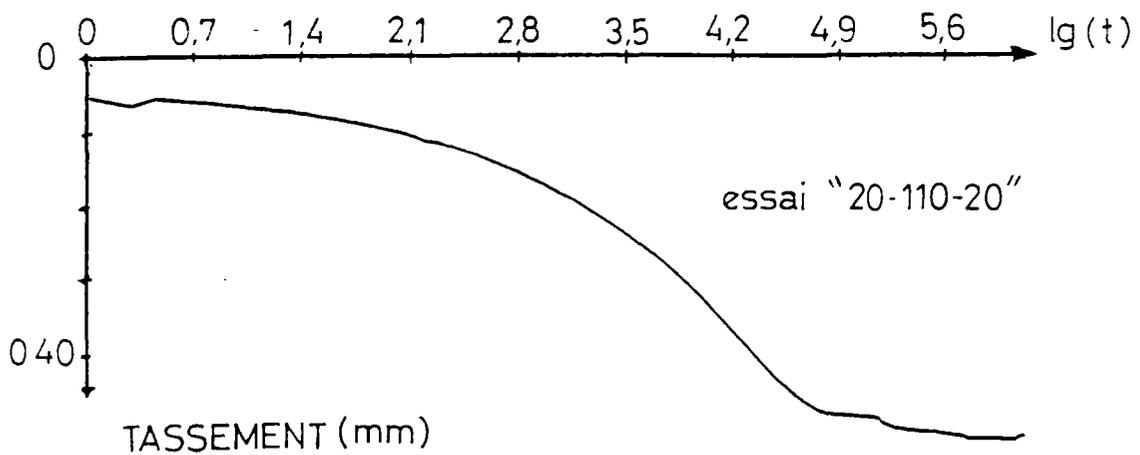
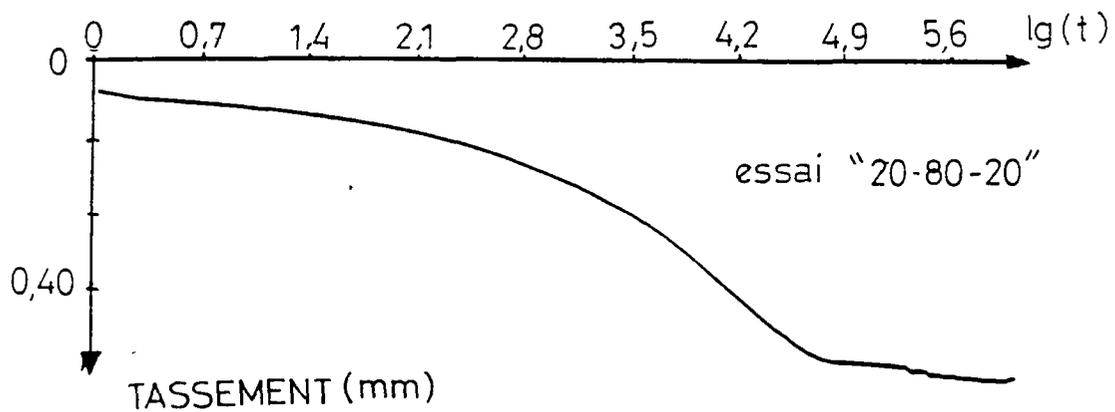
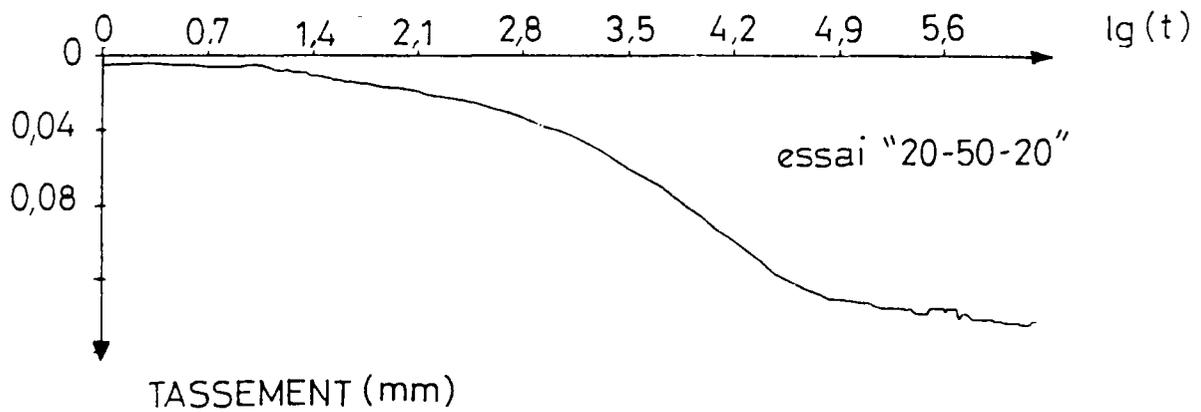
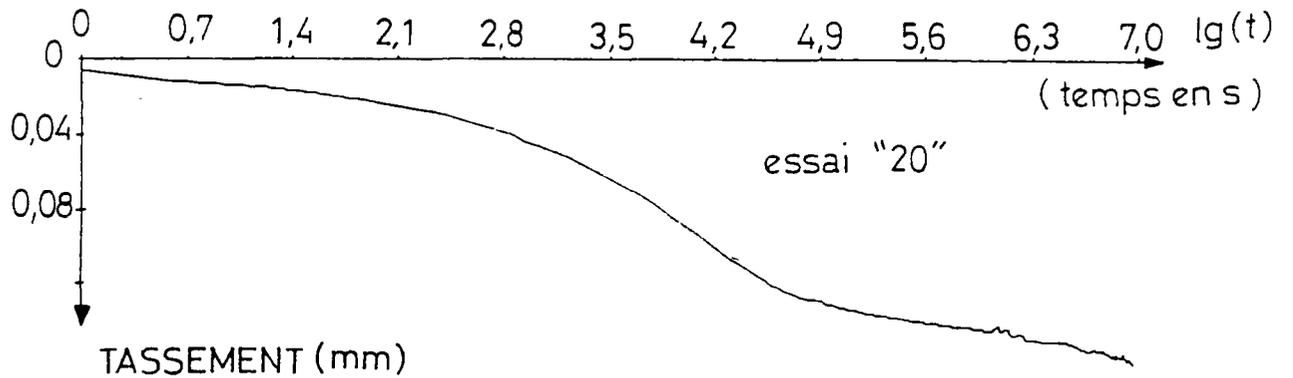


COURBES (dh-lg(t)) : ST GENEST.G

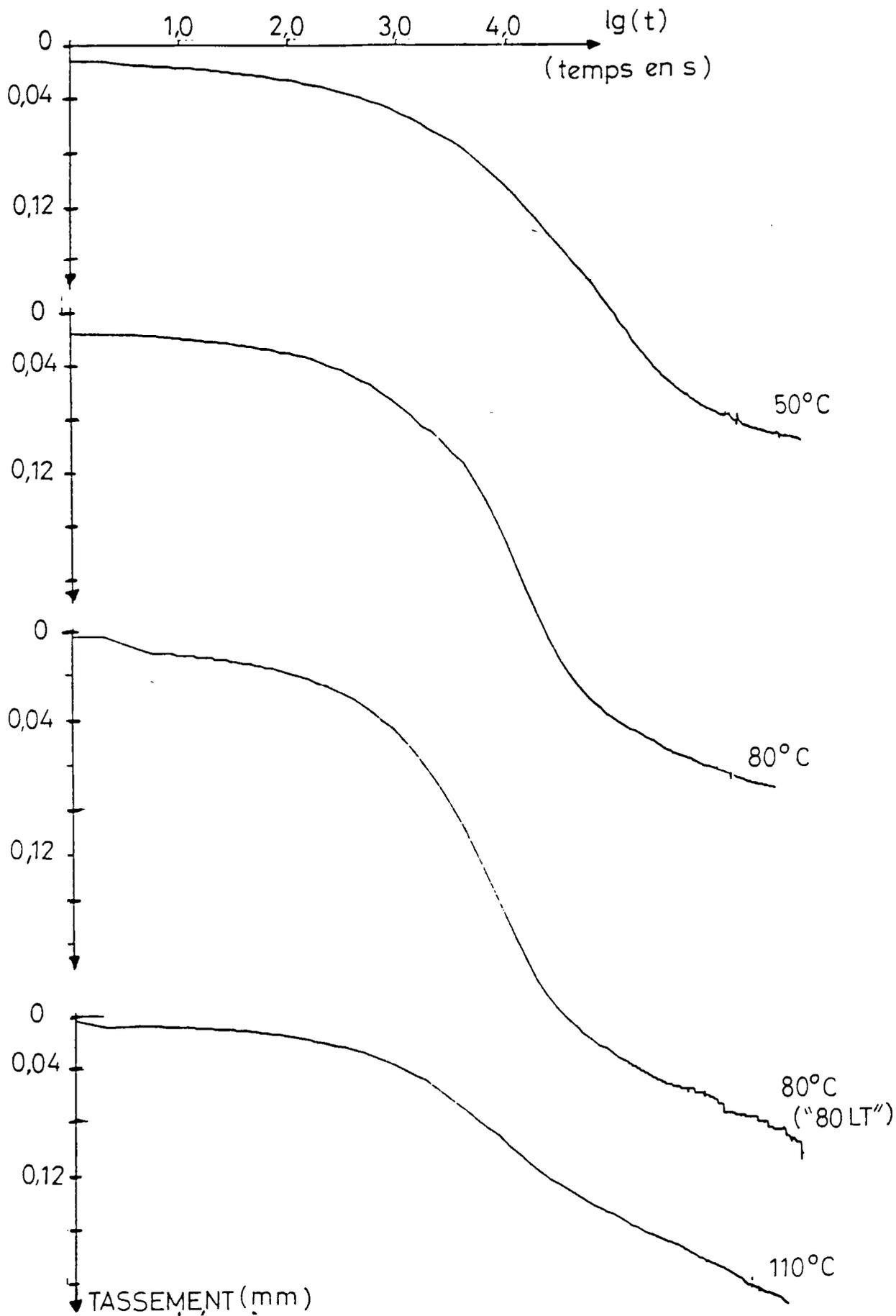
(c) 80°C
(d) 110°C



COURBES (dh-lg(t)) : LIMAY (palier à 20°C)



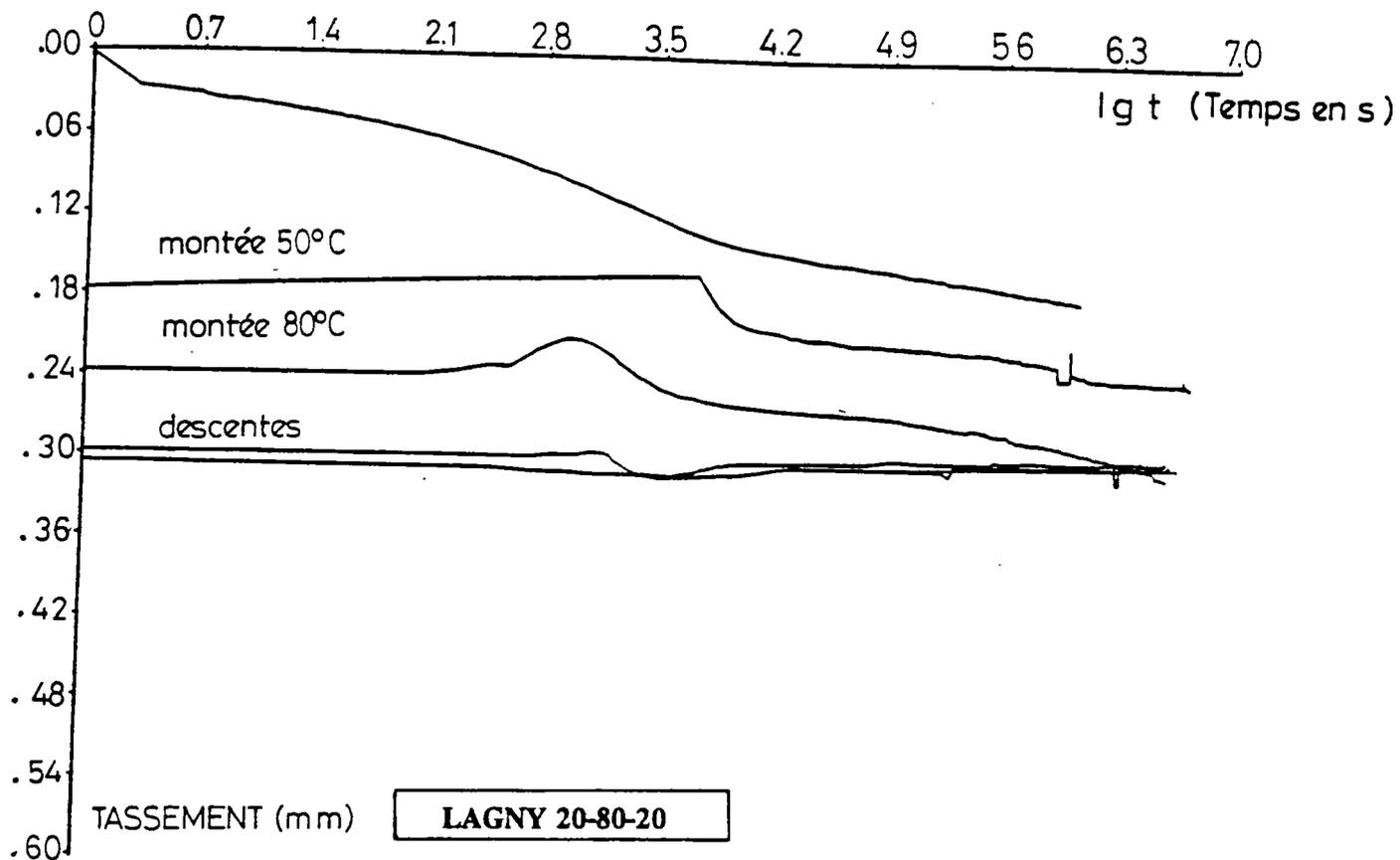
COURBES (dh-lg(t)) : LIMAY



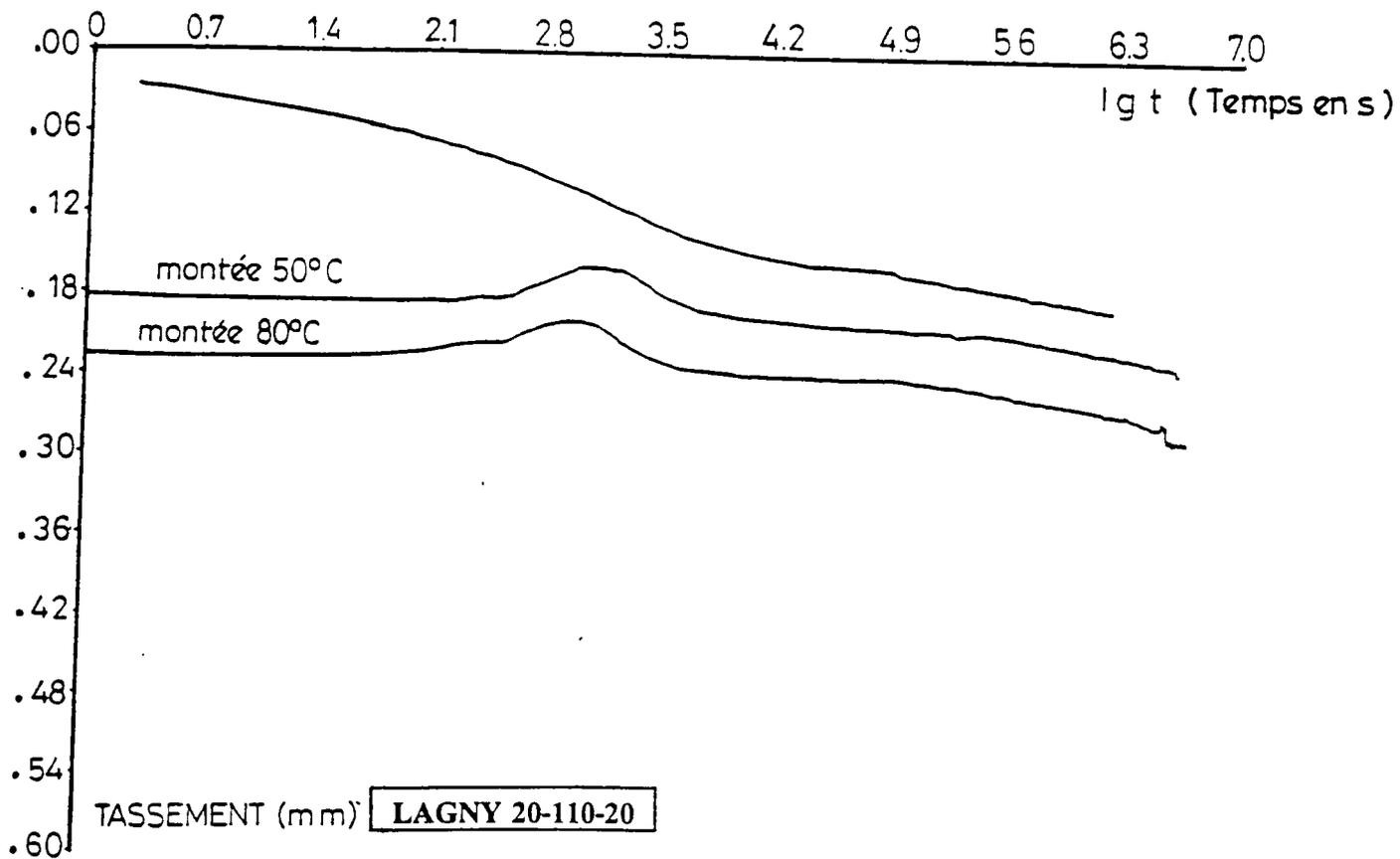
ANNEXE F

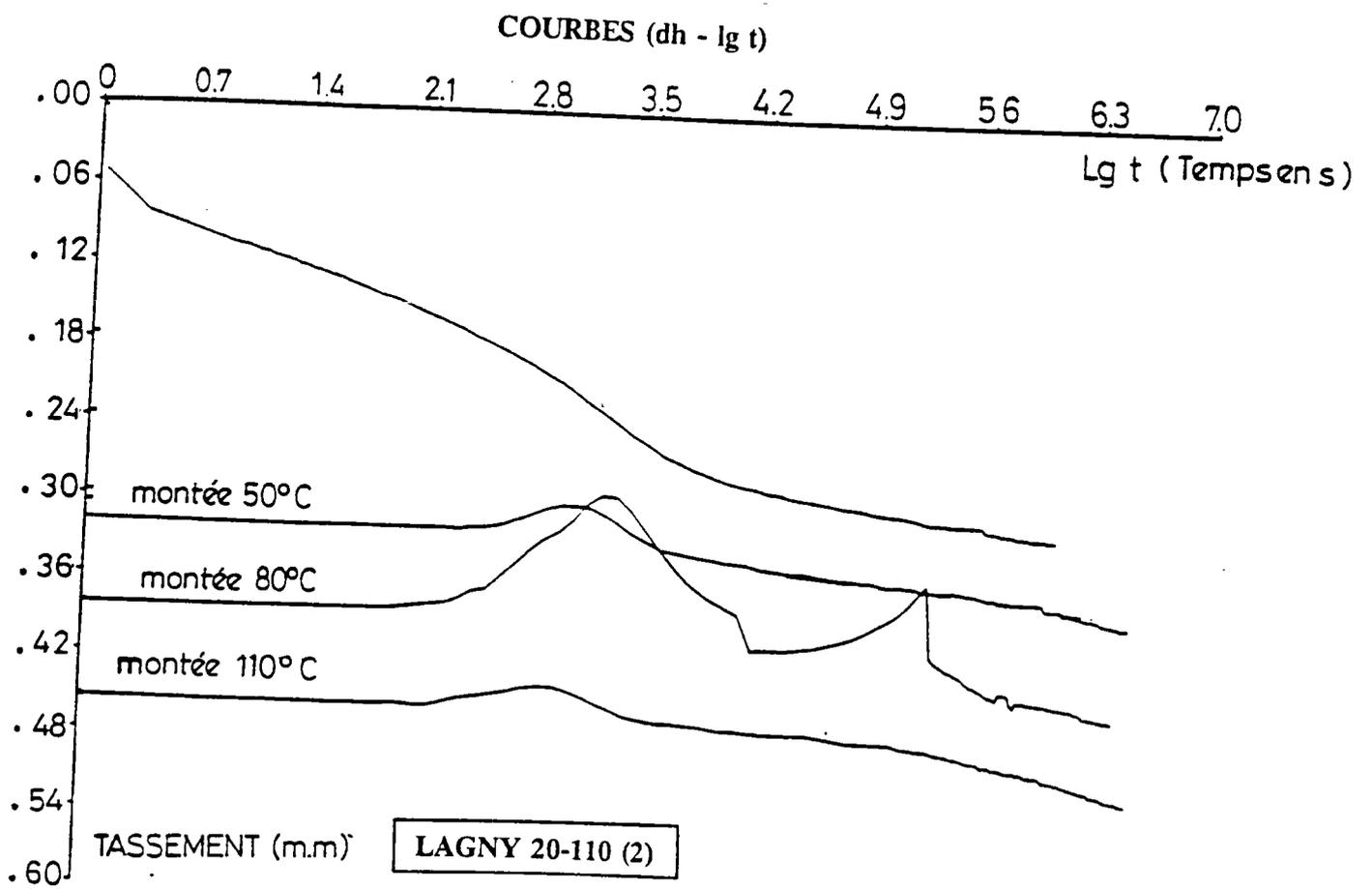
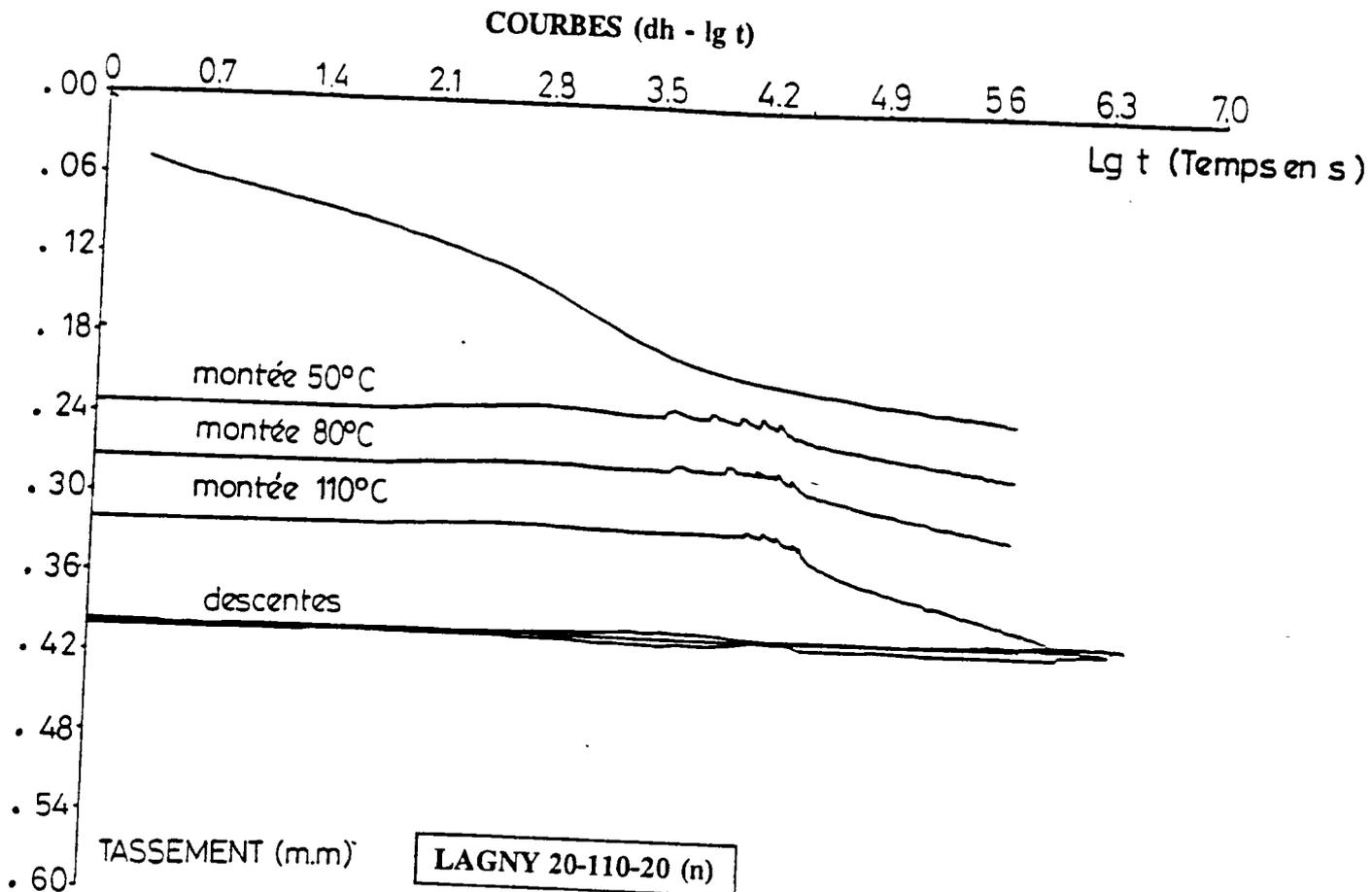
COURBES DE CONSOLIDATION POUR LES MONTEES PROGRESSIVES ET DESCENTES PROGRESSIVES PAR PALIER DE 30°C

COURBES (dh - lg t)

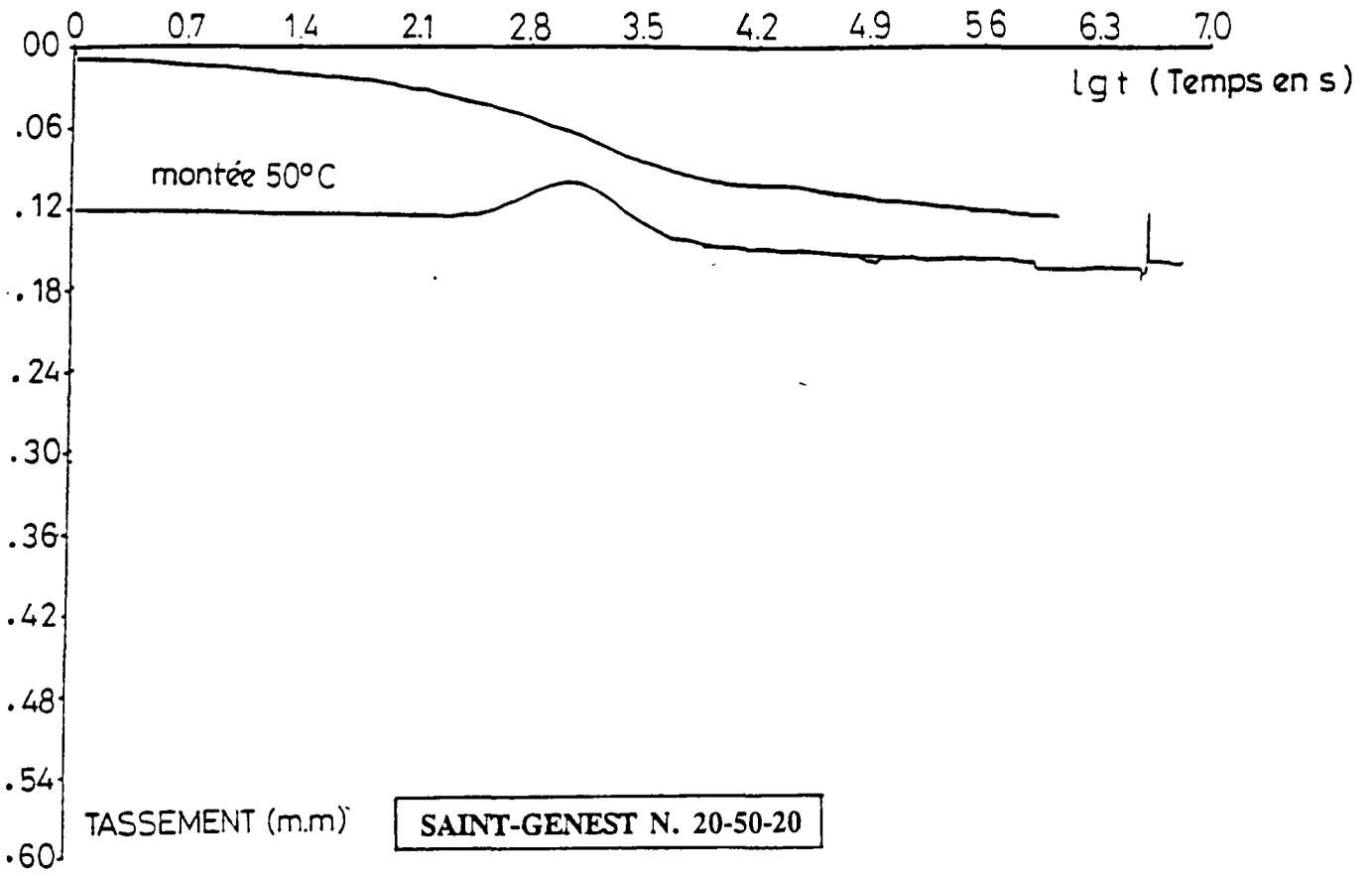


COURBES (dh - lg t)

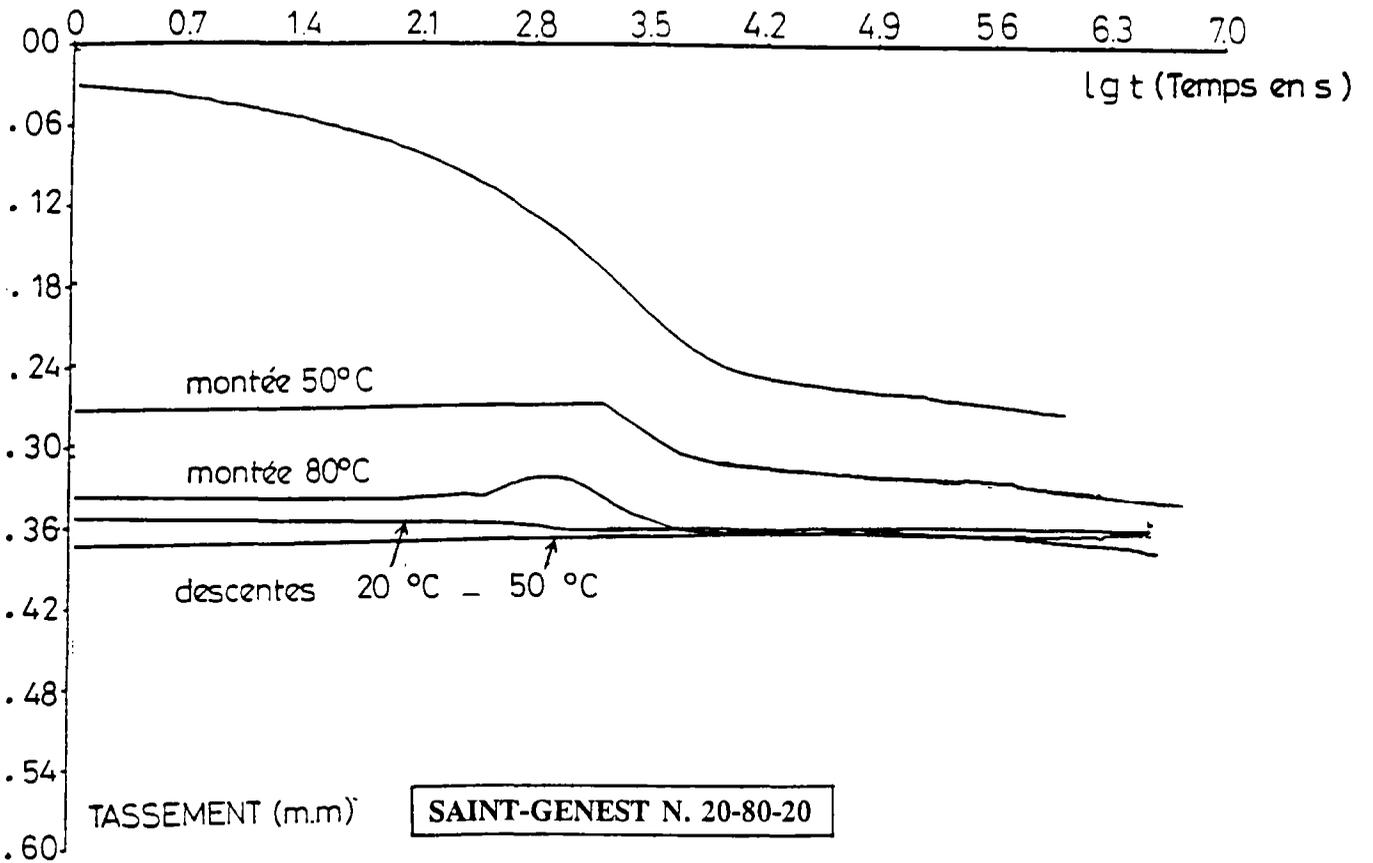




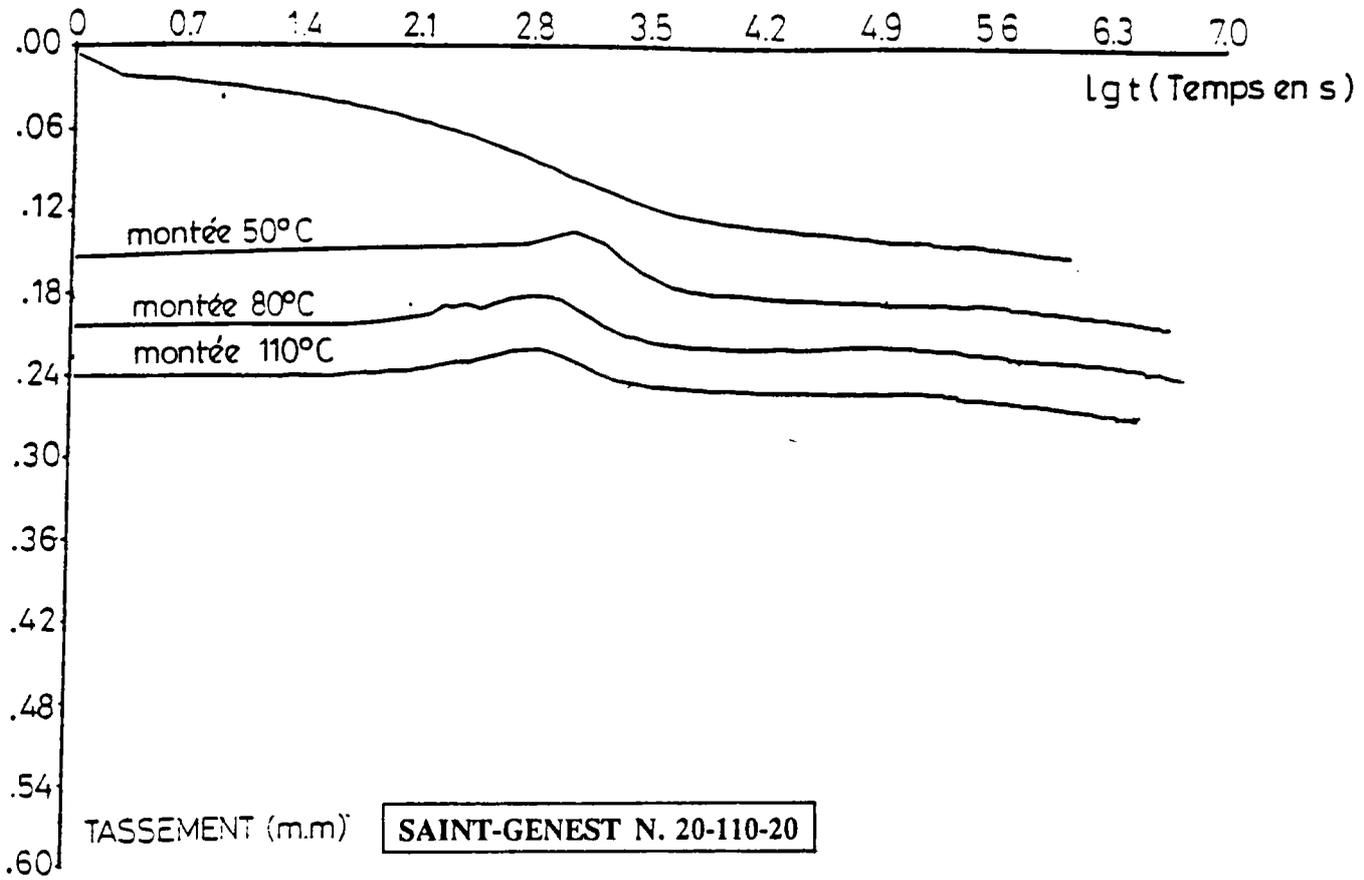
COURBES (dh - lg t)



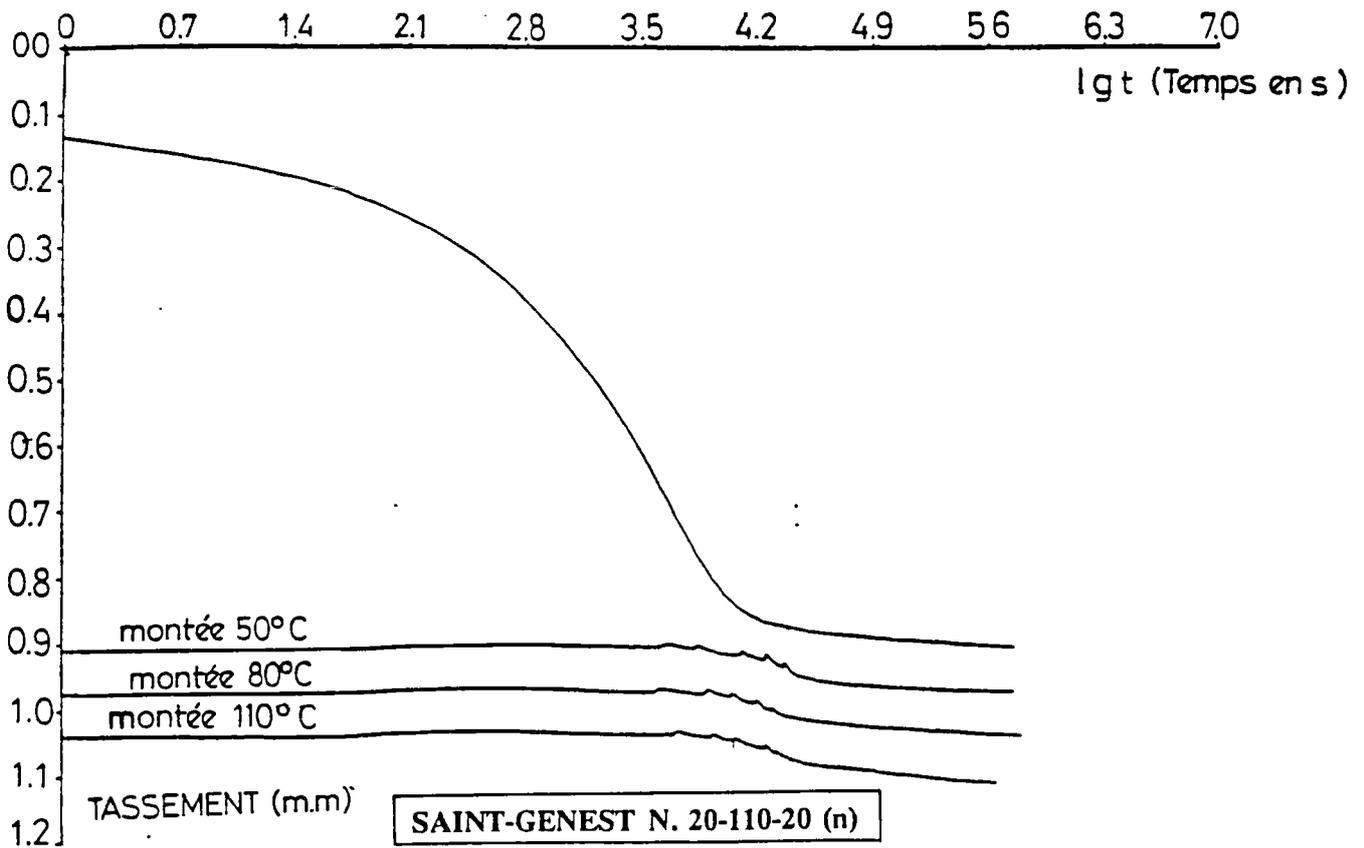
COURBES (dh - lg t)



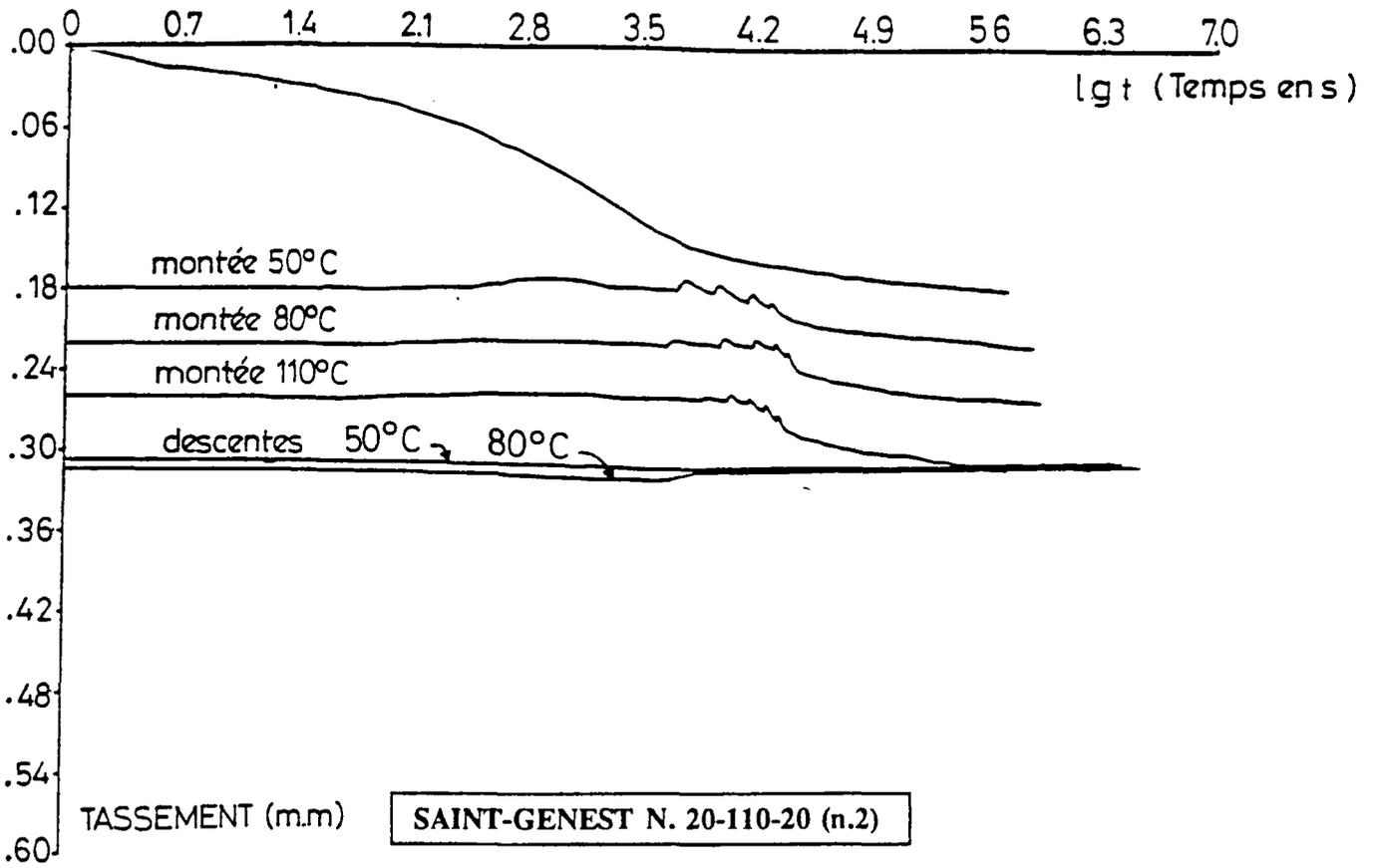
COURBES (dh - lg t)



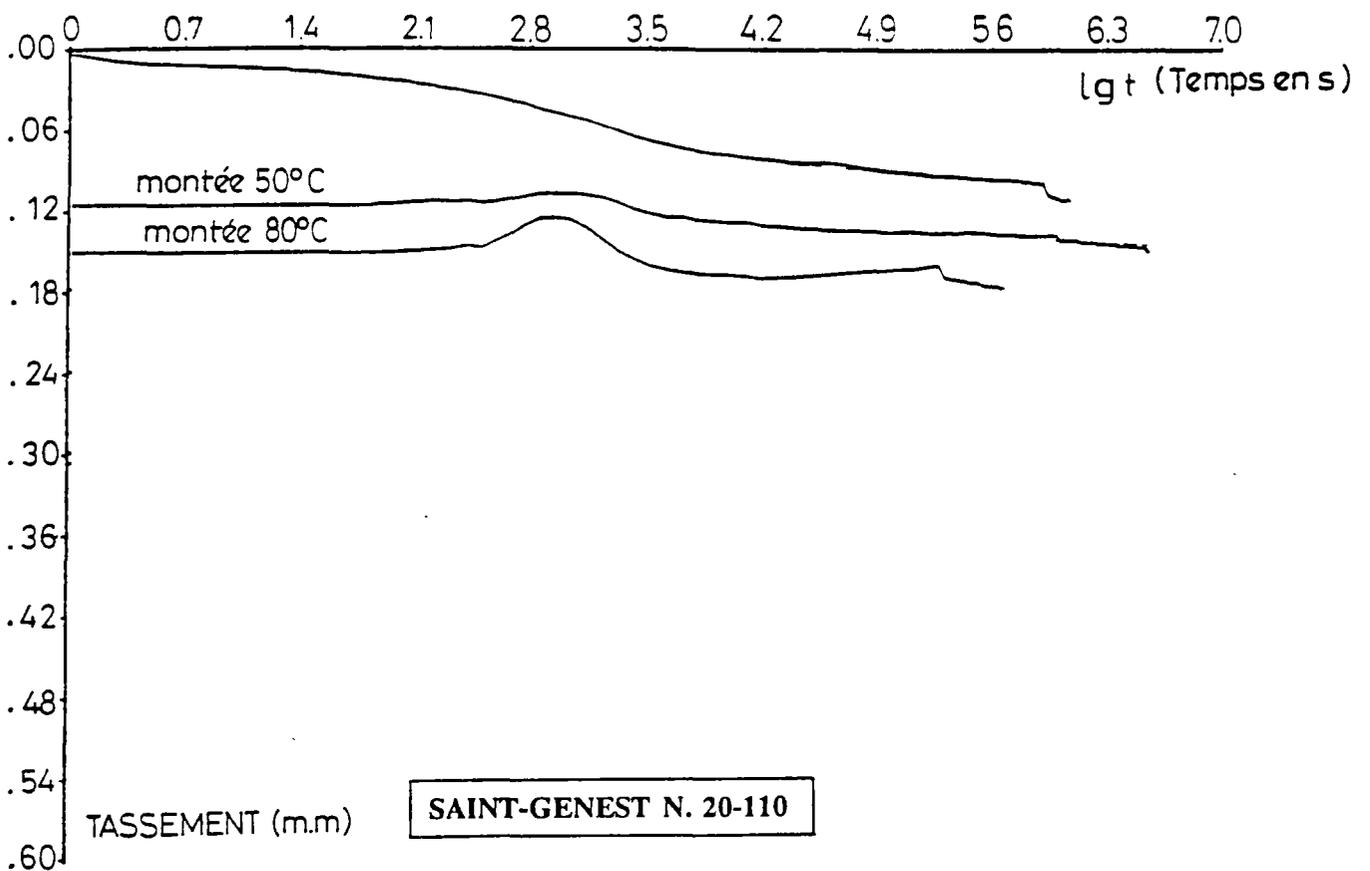
COURBES (dh - lg t)



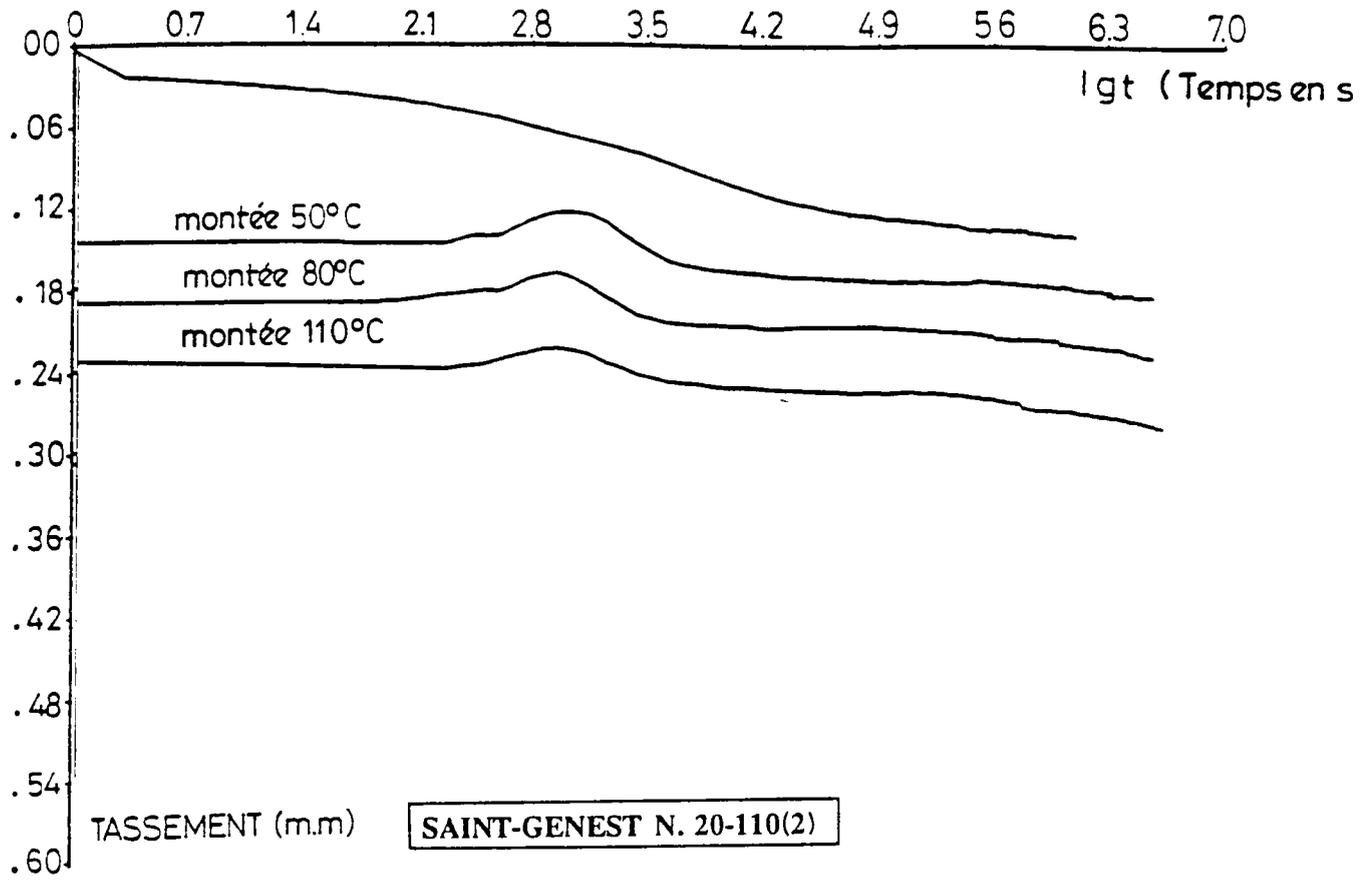
COURBES (dh - lg t)



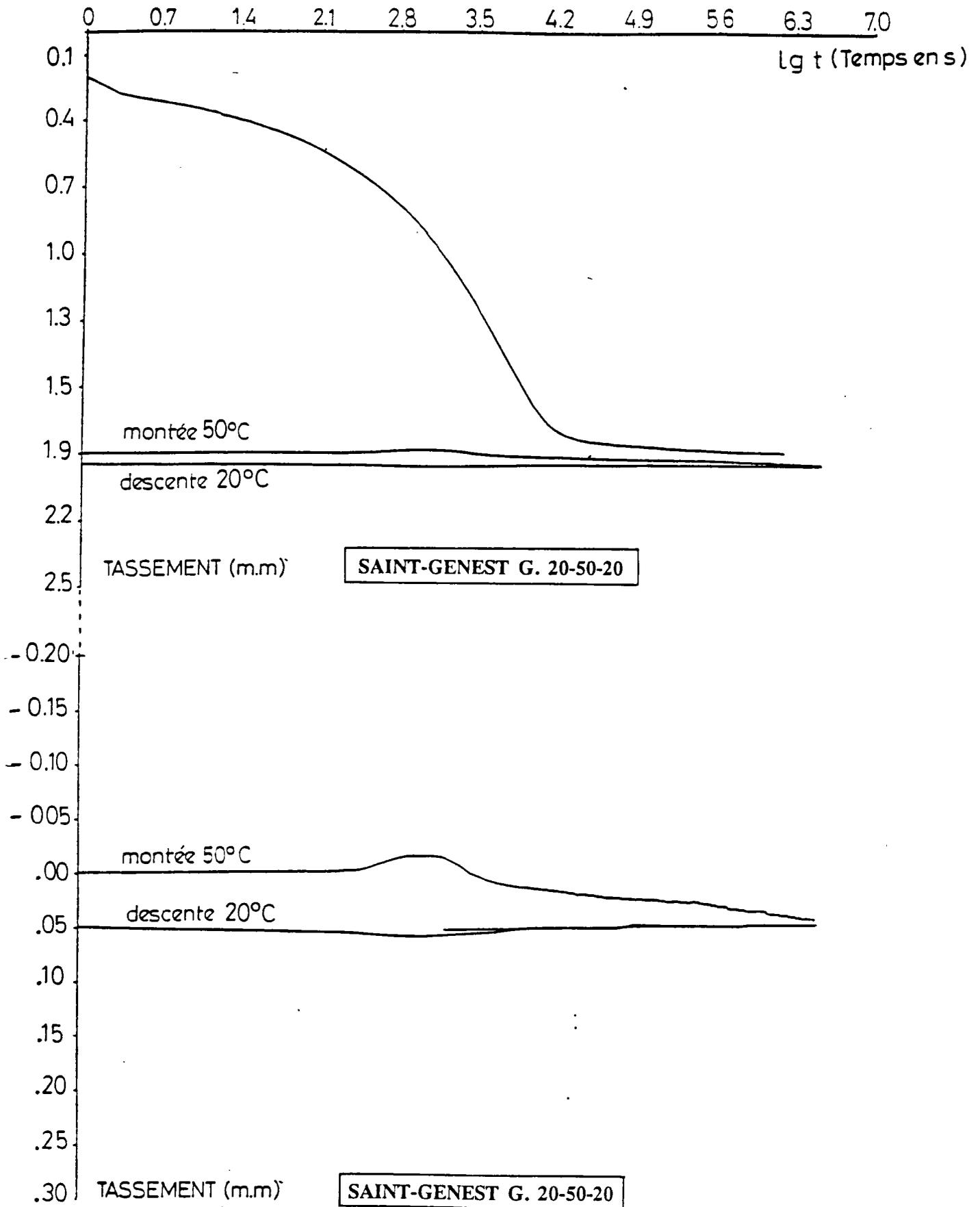
COURBES (dh - lg t)



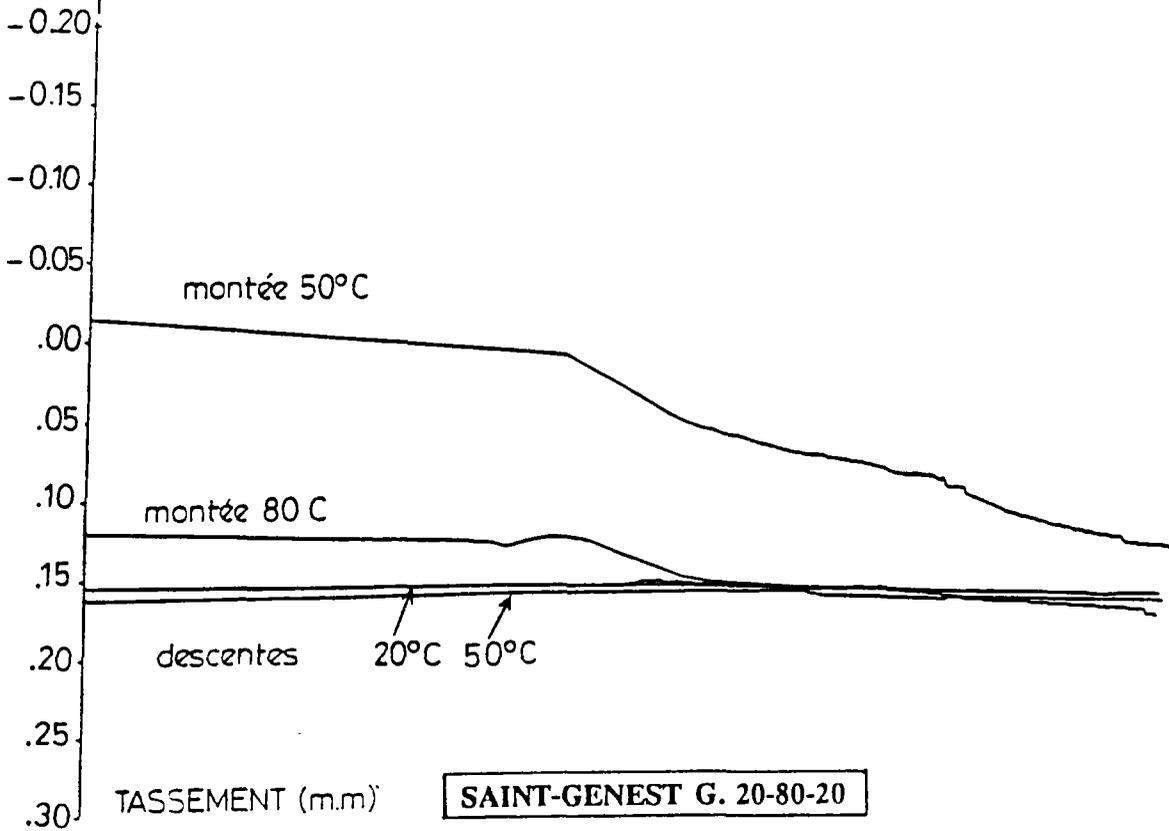
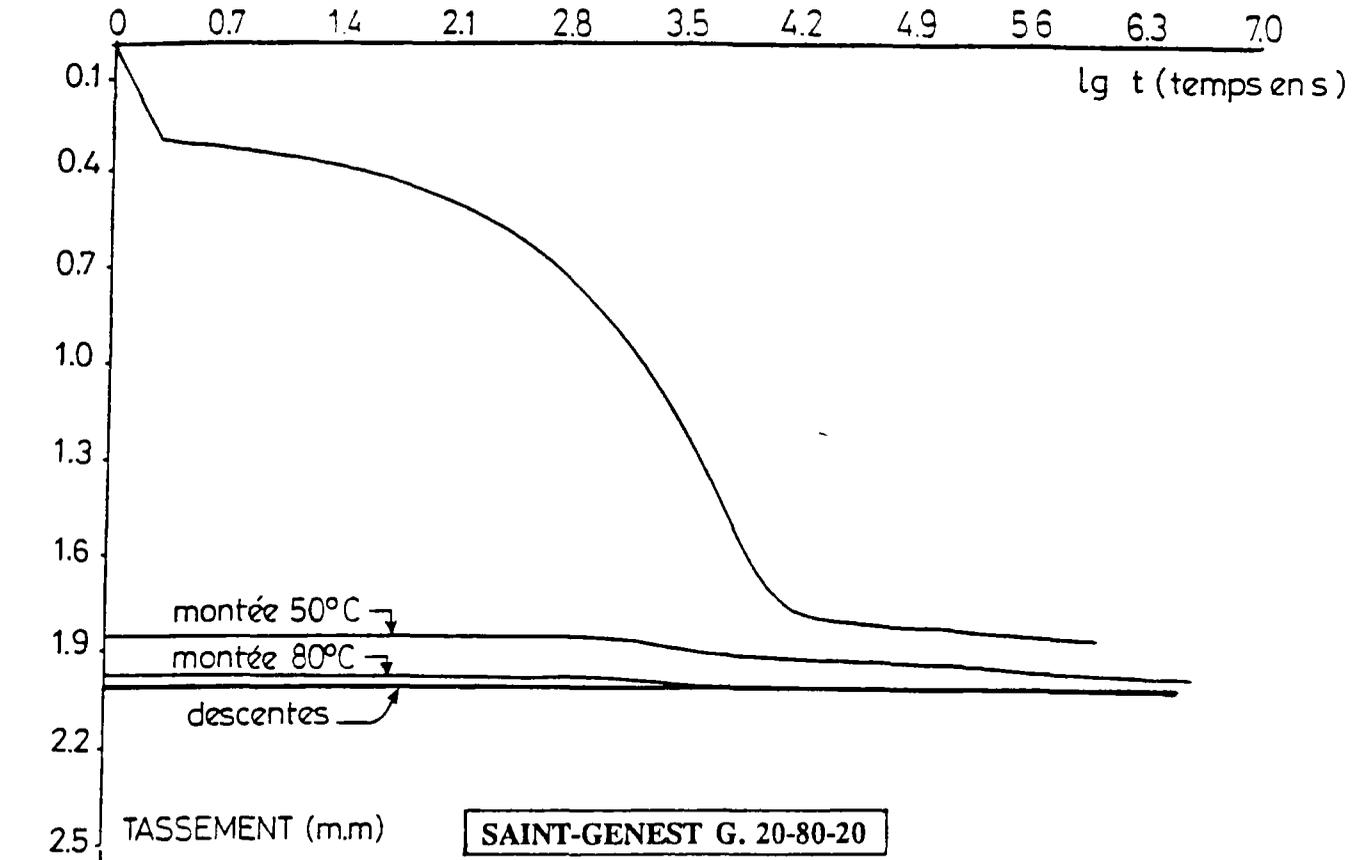
COURBES (dh - lg t)



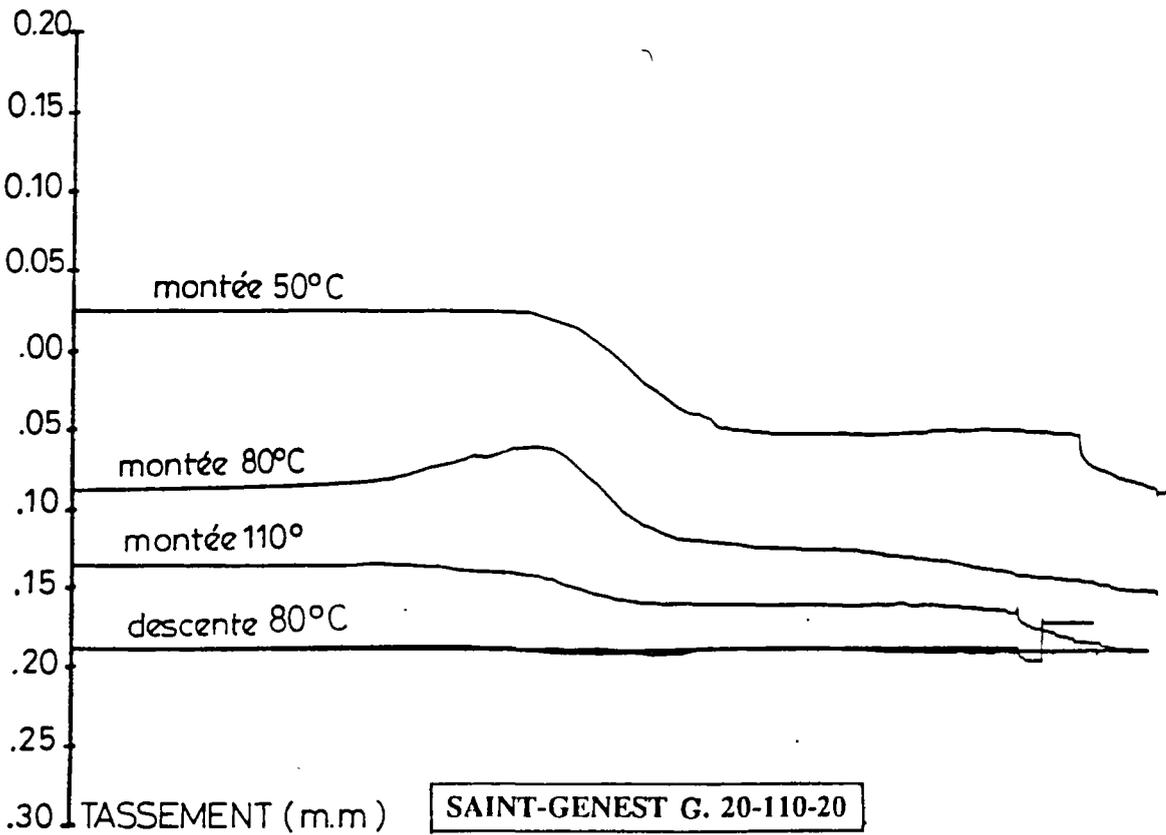
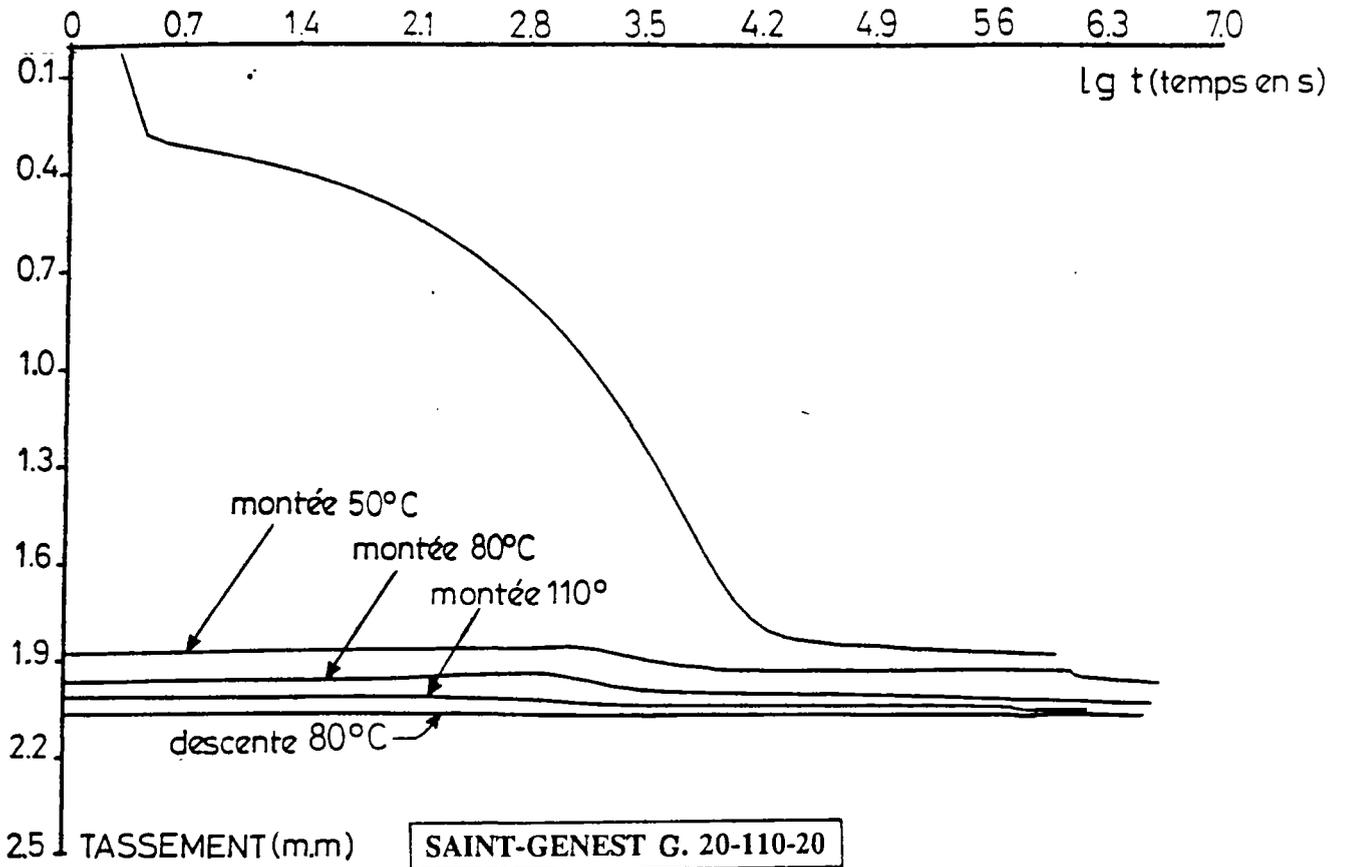
COURBES (dh - lg t)



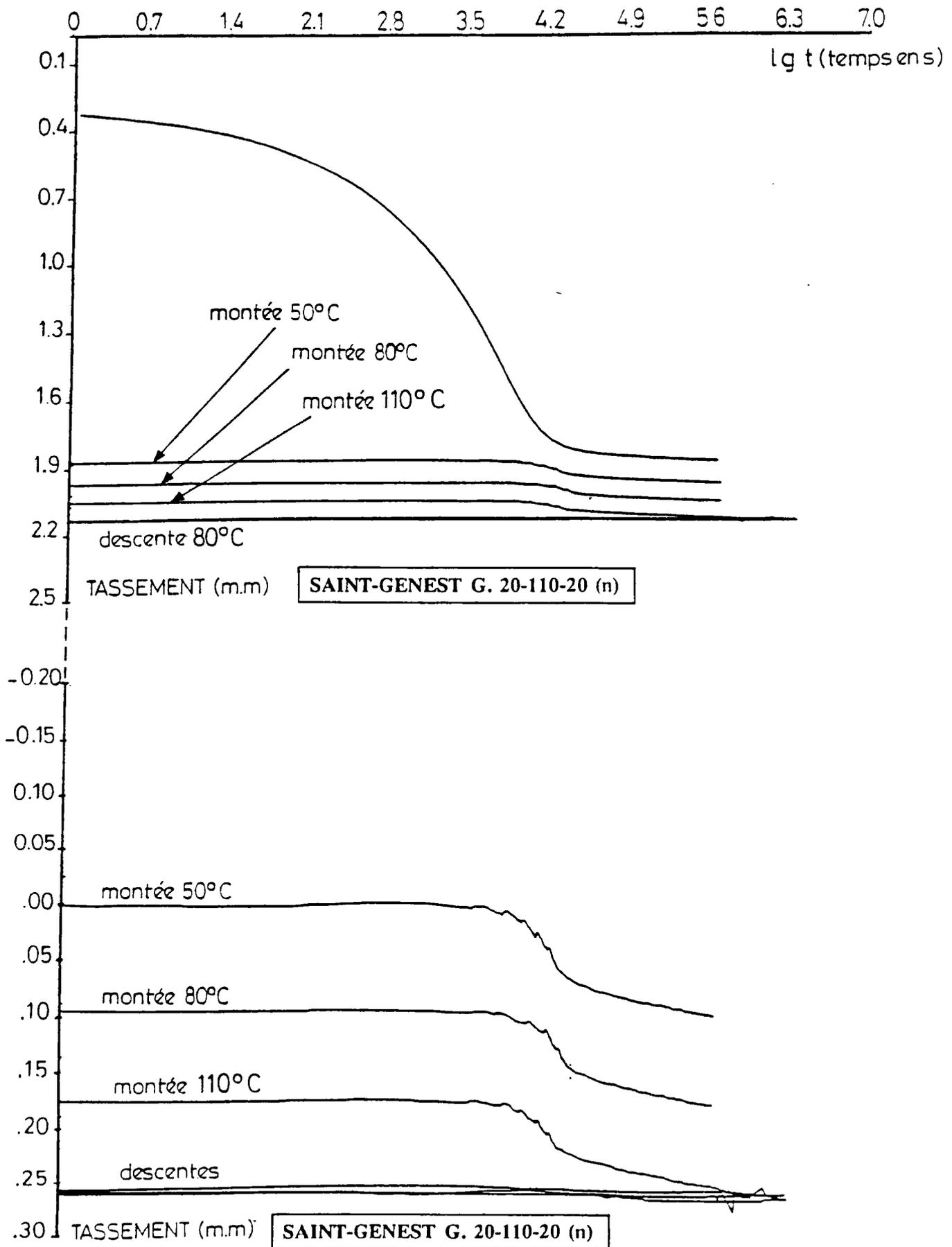
COURBES (dh - lg t)



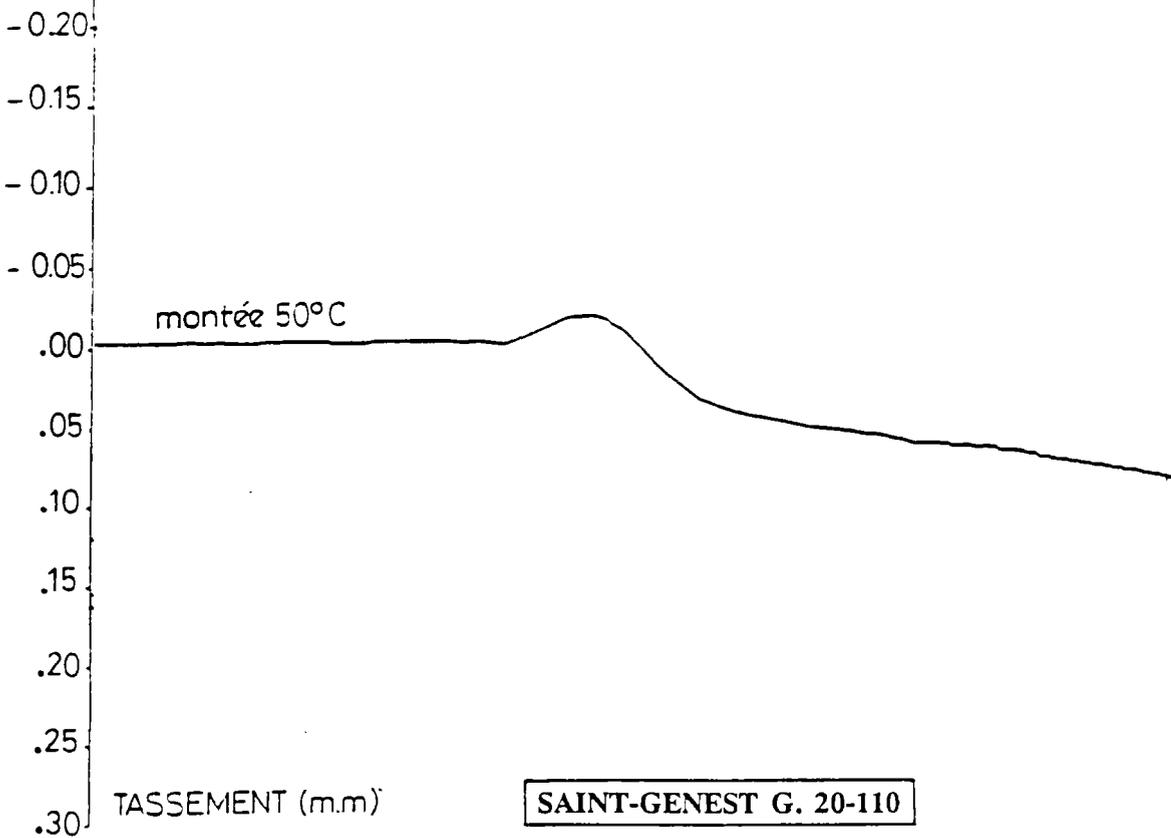
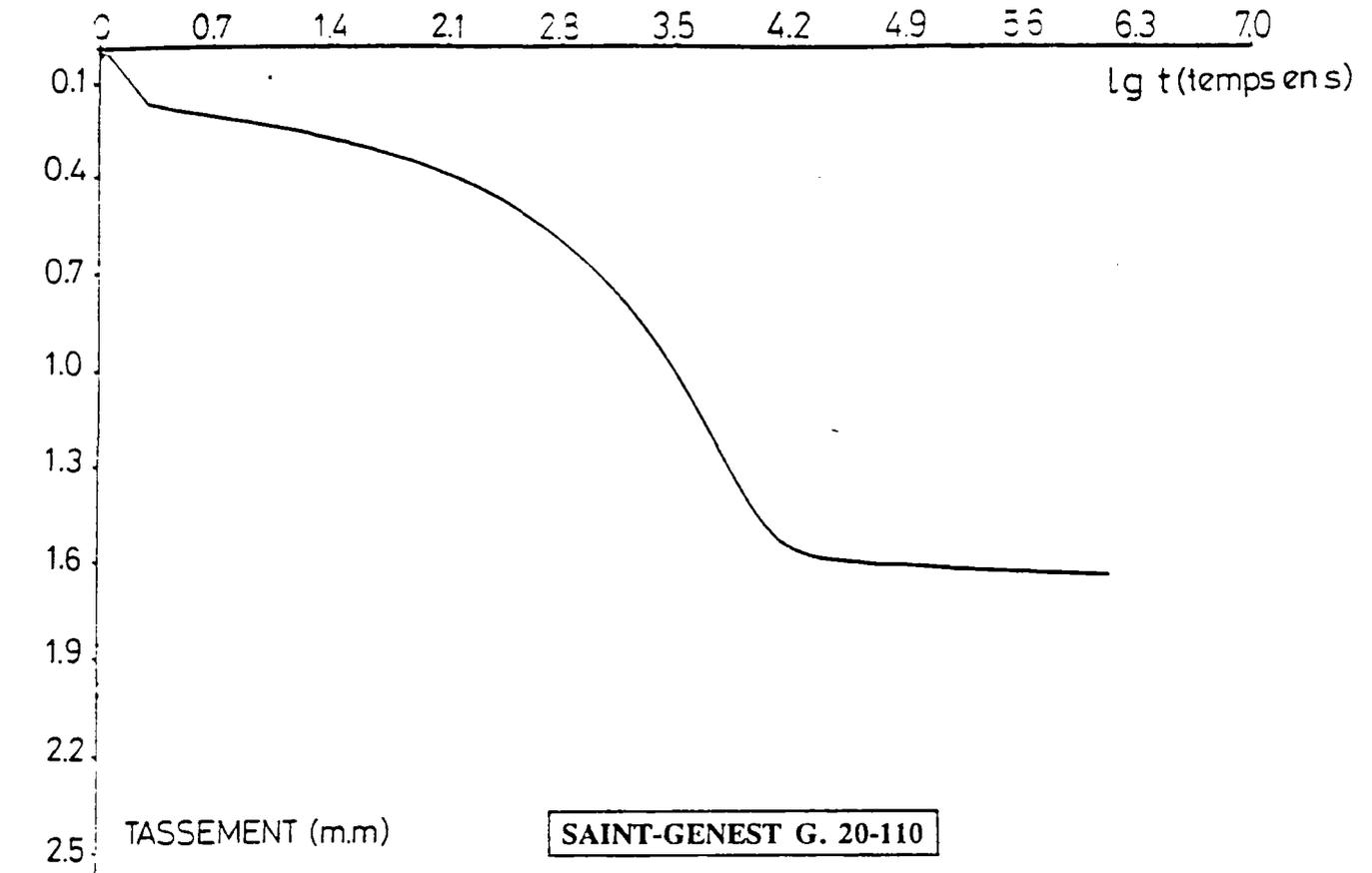
COURBES (dh - lg t)



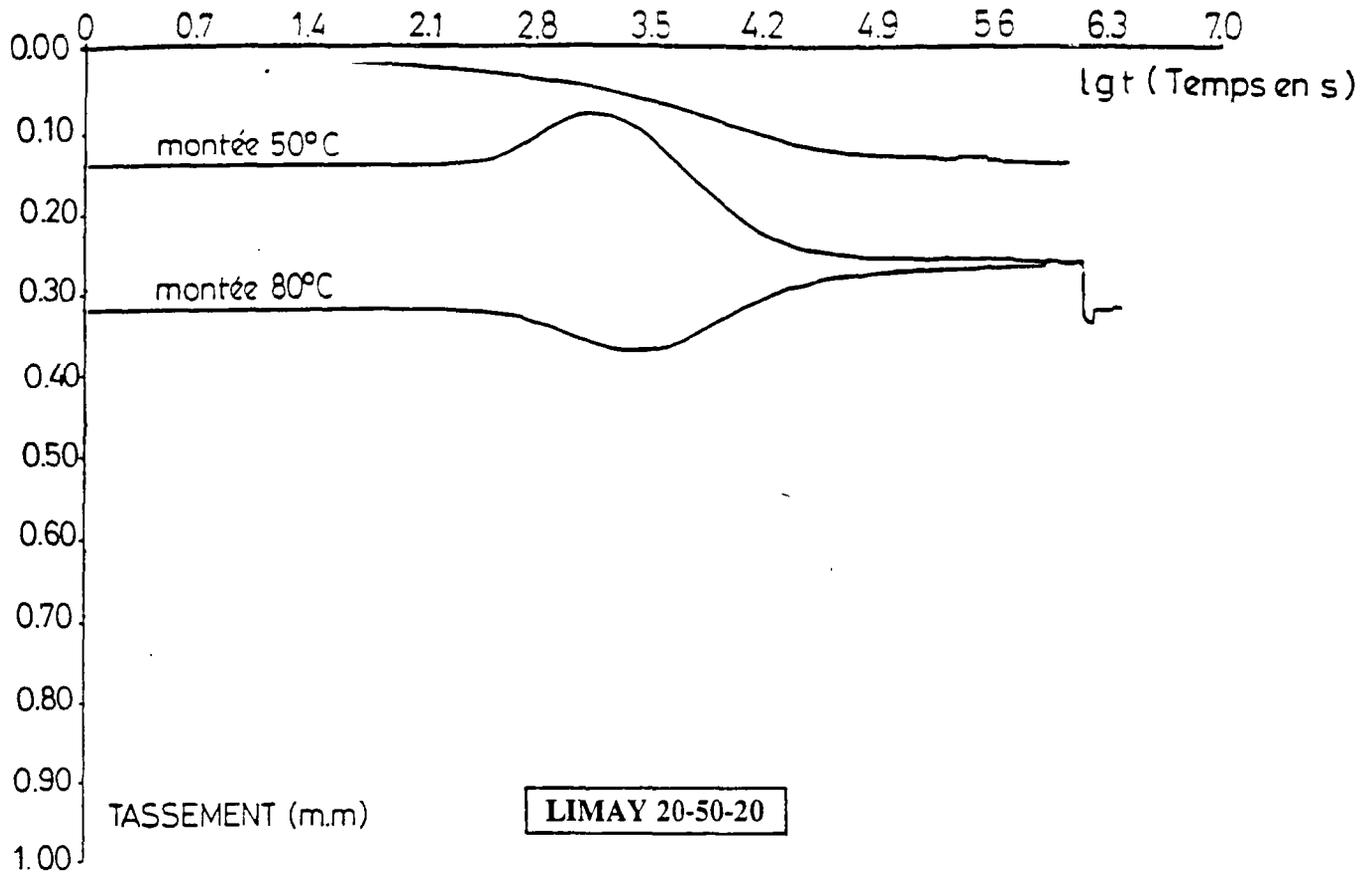
COURBES (dh - lg t)



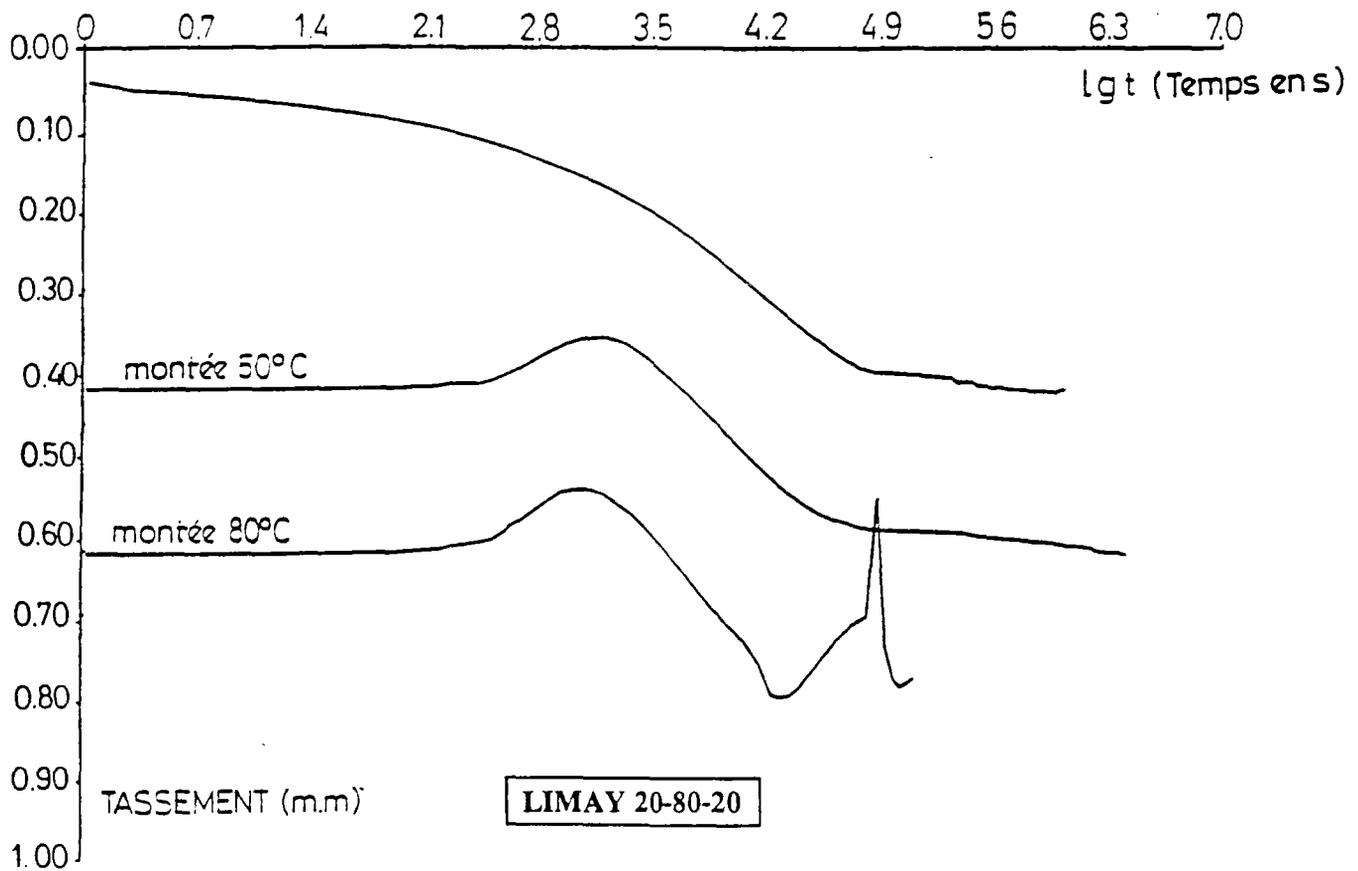
COURBES (dh - lg t)



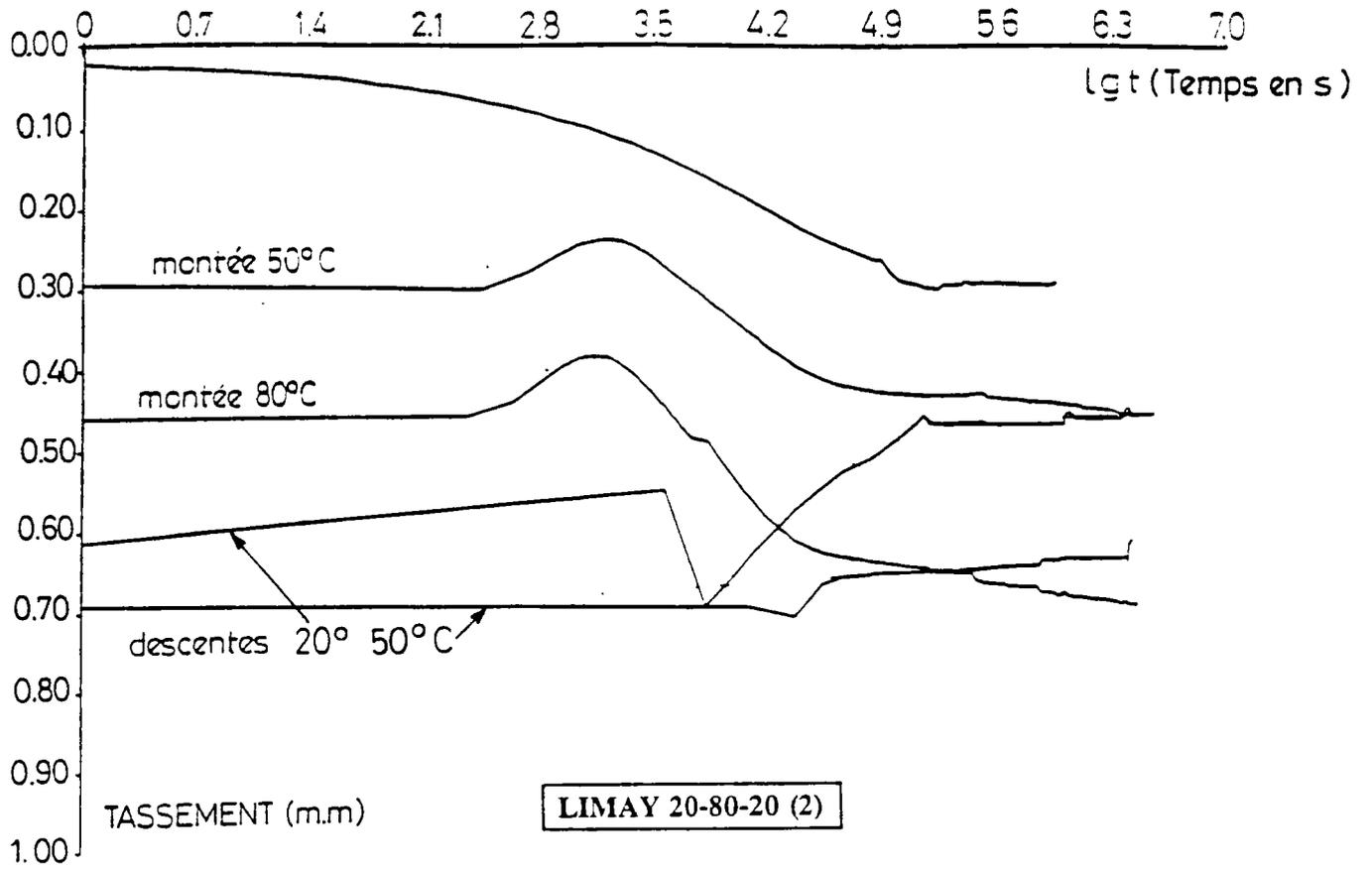
COURBES (dh - lg t)



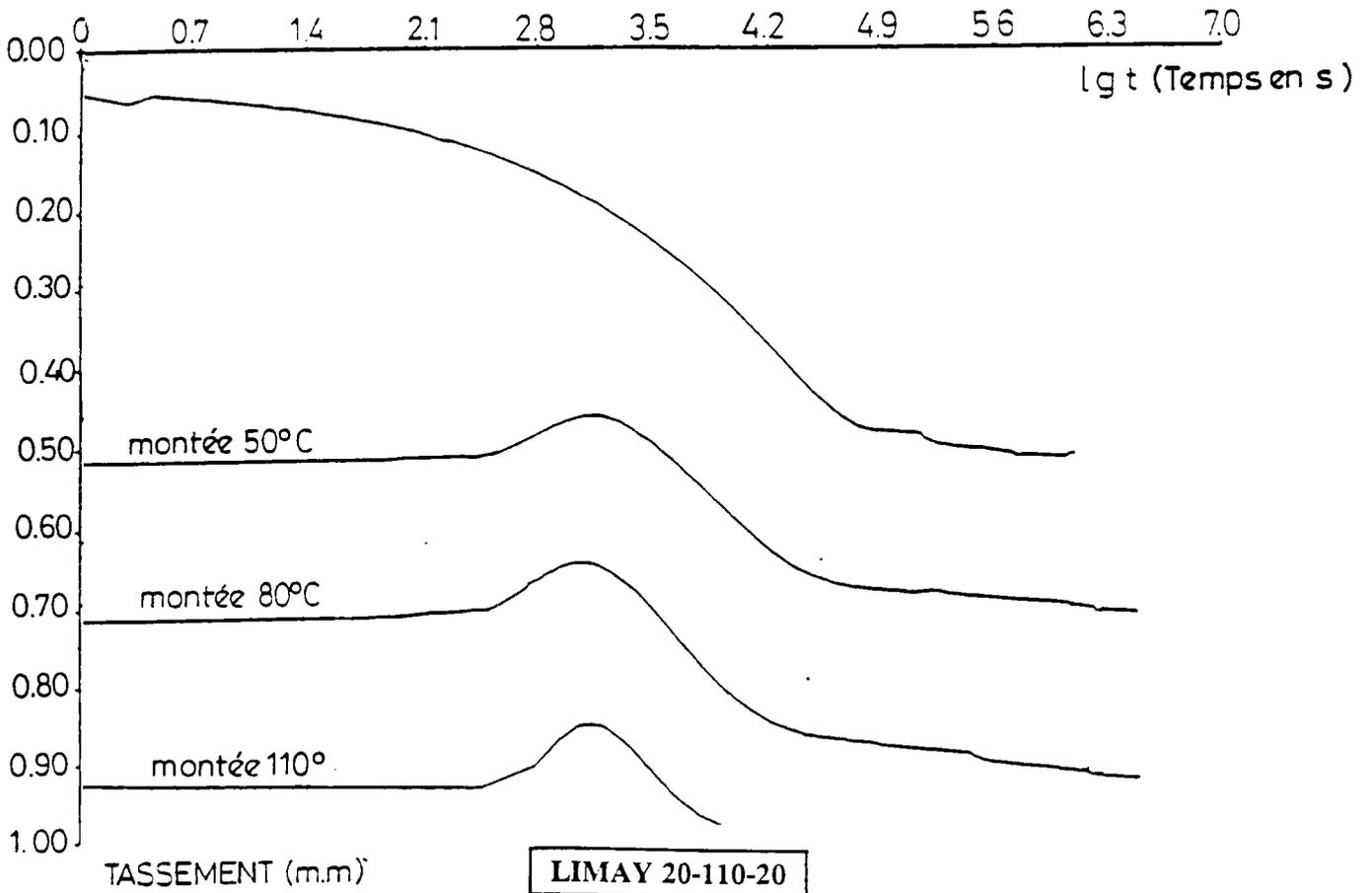
COURBES (dh - lg t)



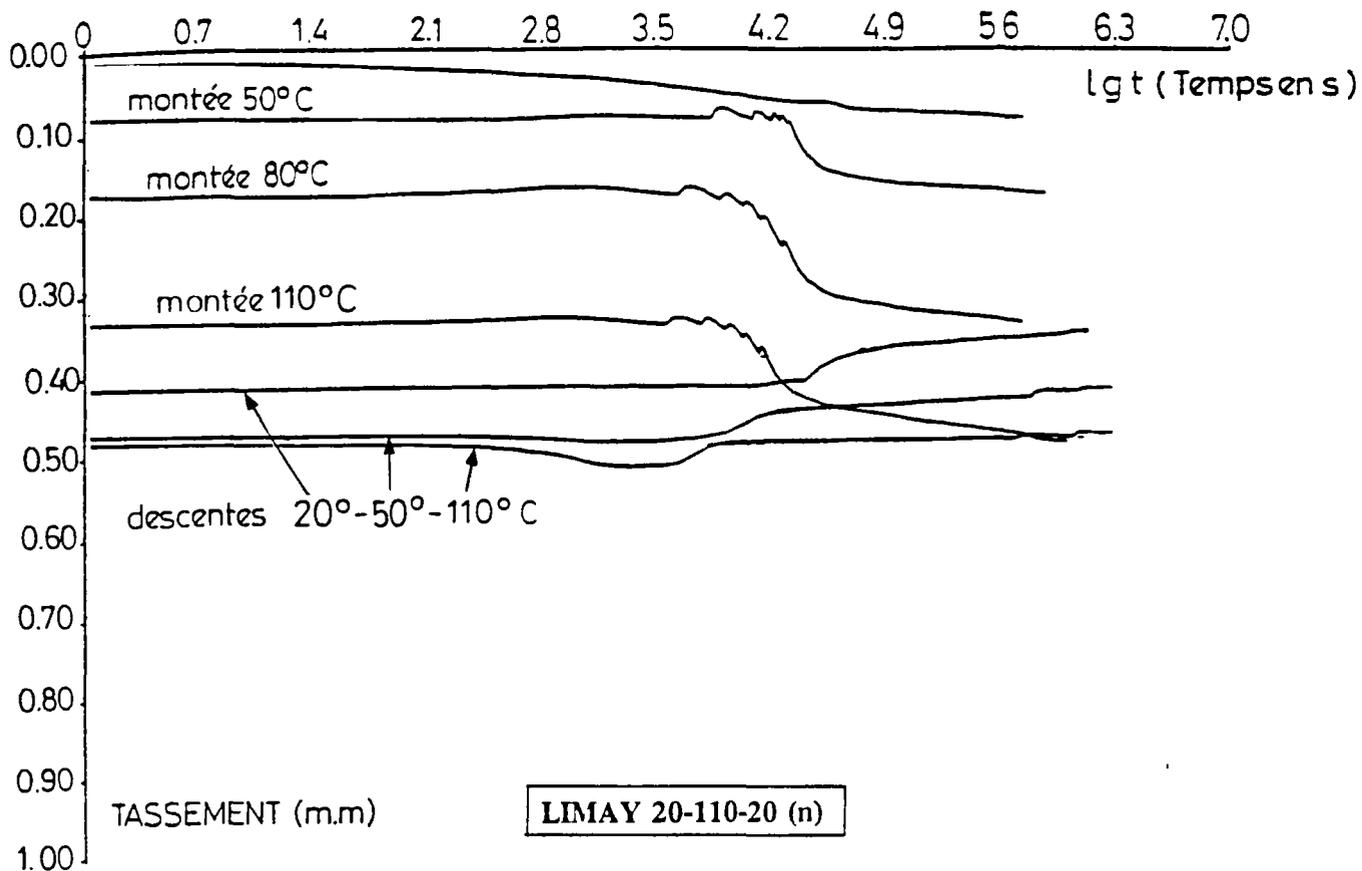
COURBES (dh - lg t)



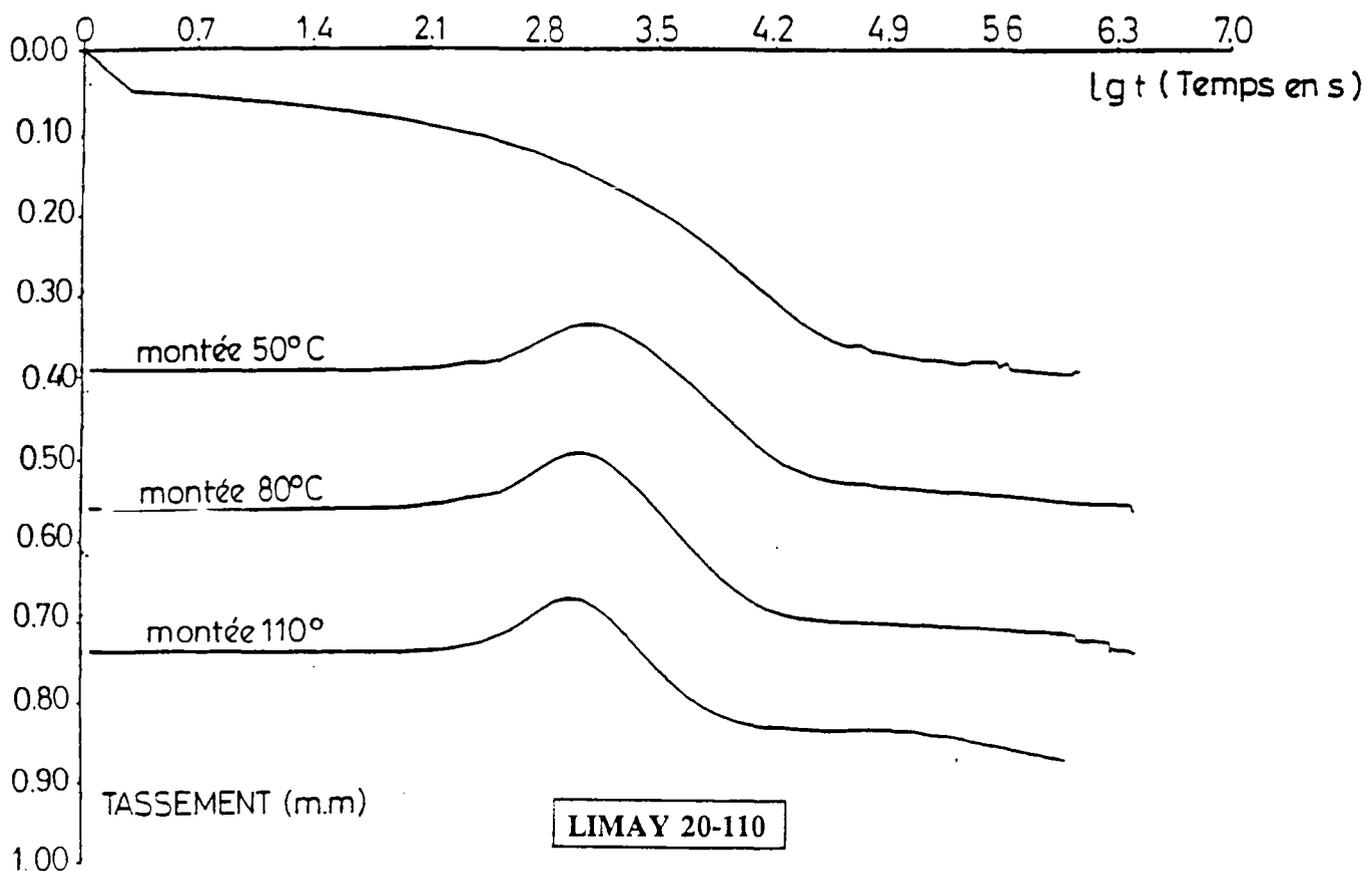
COURBES (dh - lg t)



COURBES (dh - lg t)

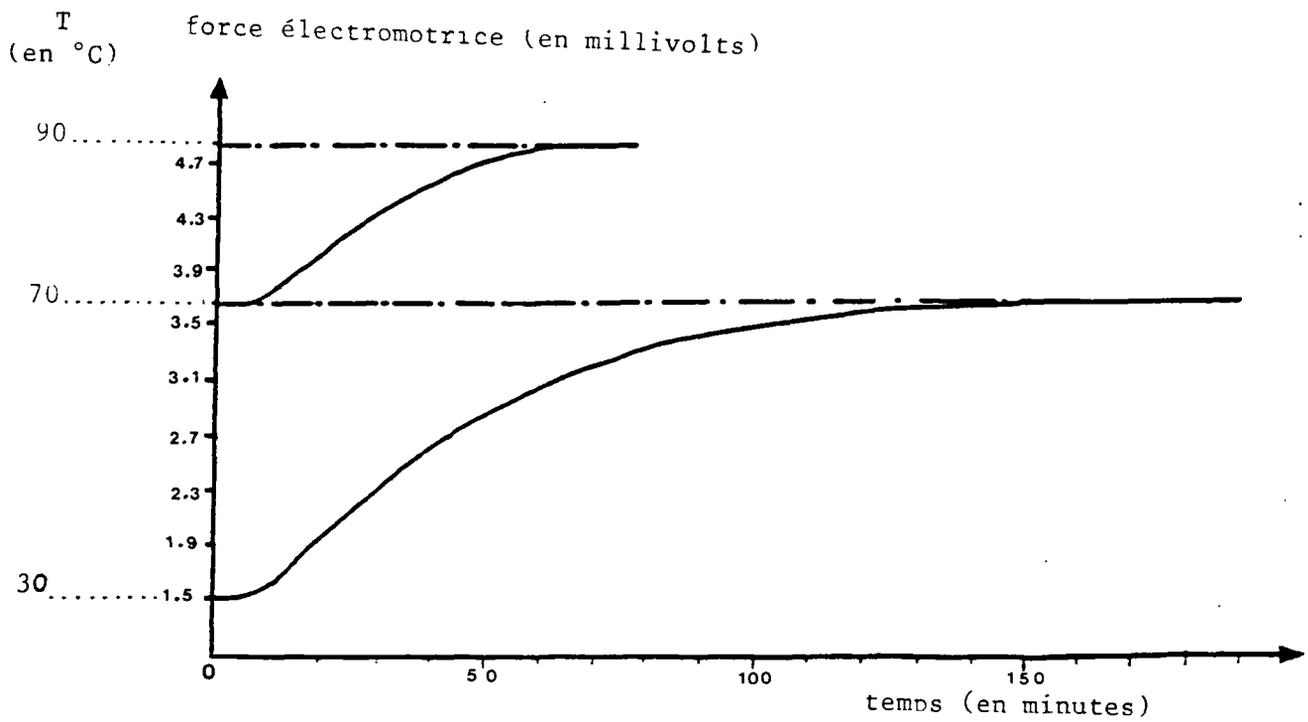


COURBES (dh - lg t)



ANNEXE G

COURBE DE MONTEE EN TEMPERATURE AU MILIEU DE L'EPROUVETTE



NOTATIONS

γ_h	: poids volumique humide (M.L ⁻³)
γ_d	: poids volumique sec (M.L ⁻³)
w	: teneur en eau
w _i	: teneur en eau initiale
S _r	: degré de saturation
e	: indice des vides
e ₀	: indice des vides initial
dh	: tassement (L)
h ₀	: hauteur initiale de l'éprouvette (L)
W _L	: limite de liquidité (limite d'Atterberg)
W _P	: limite de plasticité (limite d'Atterberg)
I _P	: indice de plasticité
S _{sp}	: surface spécifique (L ² .M ⁻¹)
σ	: contrainte totale (M.L ⁻¹ .T ⁻²)
σ'	: contrainte effective (M.L ⁻¹ .T ⁻²)
σ'_n	: contrainte effective pour le n ^{ième} palier (M.L ⁻¹ .T ⁻²)
σ'_{g}	: pression d'antigonflement effective (M.L ⁻¹ .T ⁻²)
σ'_c	: pression de préconsolidation effective (M.L ⁻¹ .T ⁻²)
σ_0	: pression appliquée sur le sol en place (M.L ⁻¹ .T ⁻²)
C _c	: indice de compression
c _v	: coefficient de consolidation verticale (L ² .T ⁻¹)
C _{α}	: taux de consolidation secondaire
C _{αe}	: indice de fluage
K	: coefficient de perméabilité verticale (L.T ⁻¹)
k	: perméabilité intrinsèque (L ²)
t	: temps (T)
t ₁₀₀	: temps de fin de consolidation primaire (T)

Chaque essai de consolidation est référencié par un nom entre guillemets auquel peut être ajouté:

- (2) lorsqu'il y a eu un problème lors de l'essai et qu'il a fallu en refaire un du même type;
- (k) lorsque l'on a effectué de nombreux essais de perméabilité durant la consolidation, toutes les semaines environ;
- (n) pour les essais "20-110-20" qui ont eu un problème et qui ont été refait suivant un protocole légèrement différent (cf chap.4 paragraphe 2.3.2).

