

N° d'ordre

1 H 2 8
GA3

MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE
— I. N. R. A. —
STATION de SCIENCE du SOL
Domaine Saint-Paul
84140 MONTFAVEY

THÈSE

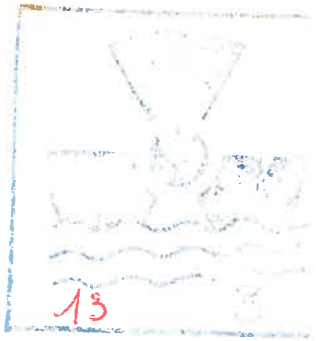
présentée à la
FACULTÉ DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITÉ DE GRENOBLE

pour obtenir le grade de
docteur de spécialité

(Troisième cycle de mécanique des sols)

par

Jean-Pierre MAZIERE
E. C. L.



CONTRIBUTION A L'ETUDE DES PROPRIETES
PHYSIQUES ET MECANIQUES DE LA TOURBE



Soutenue le 24 Janv. 1969 devant la commission d'examen

MM. KRAVTCHENKO
L. SANTON
J. BIAREZ

Président
Examineur
Rapporteur

GRENOBLE

12 DEC. 1975

AVANT-PROPOS

Le travail présenté dans les pages qui suivent a été réalisé aux Laboratoires de Mécanique des Fluides de la Faculté des Sciences de Grenoble, Section Mécanique des Sols.

Que tous ceux qui ont contribué à son élaboration trouvent ici l'expression de ma gratitude.

Celle-ci s'adresse tout d'abord à Monsieur le Professeur J. KRAVTCHENKO, Directeur des Laboratoires, ainsi qu'à Monsieur le Professeur L. SANTON, Directeur Technique des Laboratoires.

Ma sincère reconnaissance va également à Monsieur le Professeur J. BIAREZ, qui m'a guidé dans cette étude.

Je remercie vivement le groupe d'Ingénieurs du Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Lyon, section Fondations, et particulièrement Monsieur PERRIN, ainsi que Monsieur LAREAL du Laboratoire de Mécanique des Sols de l'INSA de Lyon, qui ont toujours accepté de me fournir les renseignements que je demandais.

Que Mademoiselle FELIX-NAIX, Messieurs BIGUENET, BOUCEK, CITTANOVA, GIROUD, ELBERG, ainsi que mes camarades de 3e Cycle, soient également remerciés pour leur aide amicale et efficace qui m'a permis de surmonter bien des difficultés.

S O M M A I R E

CHAPITRE I : PREMIERES CONNAISSANCES DE LA TOURBE.

- .1- Généralités
- .2- Les Tourbières
 - 2.1. Tourbières plates
 - 2.2. Tourbières bombées
 - 2.3. Conclusion

CHAPITRE II : ESSAIS D'IDENTIFICATION.

- .1- Données de la chimie
 - 1.1. Analyse élémentaire (figure n° 1)
 - 1.2. Constituants chimiques
 - 1.2.1. La Cellulose
 - 1.2.2. La Lignine
 - 1.2.3. Les Acides Humiques
 - 1.2.4. Les Cires et Résines
 - 1.2.5. Conclusions et synthèse
 - 1.2.6. Exemple d'interprétation d'une analyse
 - 1.3. Teneur en matières organiques. Pertes au feu
 - 1.3.1. Origine des cendres
 - 1.3.2. Procédés d'essais
 - Essai par voie humide
 - Essai de pertes au feu
 - 1.3.3. Résultats (figure 2)
 - 1.4. Acidité
 - 1.4.1. Généralités et techniques de mesure
 - 1.4.2. Résultats (figure 3)
- .2- Données physiques
 - 2.1. Teneur en eau
 - 2.1.1. Généralités
 - 2.1.2. Classification
 - 2.1.3. Mode opératoire
 - 2.1.4. Méthode de détermination de w% "in situ"
 - 2.1.5. Résultats (figure 4)
 - 2.2. Densité relative des grains solides G
 - 2.2.1. Techniques de mesure
 - 2.2.11. Mesure par déplacement de liquide
 - 2.2.12. Mesures à partir des essais PF% et MO%
 - 2.2.2. Résultats obtenus
 - 2.2.3. Corrélations
 - 2.2.31. Relation G-% matières organiques (figure 5)
 - 2.2.32. Relation G-w% (figures 6 et 7)
 - 2.3. Poids spécifique du sol
 - 2.4. Poids spécifique du sol sec
 - 2.5. Tableau des différentes valeurs (tableau n° 3)

- .3- Méthodes qualitatives d'identification et de classification des tourbes
 - 3.1. Introduction
 - 3.2. Aperçu sur les classifications qualitatives à base botanique
 - 3.2.1. Systèmes simples
 - 3.2.2. Systèmes généraux (tableau n° 4)
 - 3.2.3. Systèmes récents
 - 3.2.31. Bases du système RADFORTH
 - 3.2.32. Description du système de RADFORTH (tableaux 5, 6 et 7)
 - 3.2.33. Conclusion
 - 3.2.4. Systèmes purement botaniques
 - 3.2.5. Travaux nouveaux

CHAPITRE III : RESISTANCE AU CISAILLEMENT.

- .1- Détermination de la résistance au cisaillement
 - 1.1. Méthodes "in situ"
 - 1.1.1. Essai de pénétration
 - 1.1.2. Essai au scissomètre (vane test)
 - 1.1.21. Principe et généralités
 - 1.1.22. Mode opératoire
 - Influence de la vitesse de cisaillement (figure 8)
 - Influence des dimensions du scissomètre (figure 9)
 - Influence du nombre de palettes (figure 10)
 - 1.1.23. Réflexions et conclusions
 - 1.1.24. Valeur de la résistance au cisaillement du sol remanié
 - 1.2. Méthodes de laboratoire
 - 1.2.1. Généralités
 - 1.2.2. Essais de compression simple
 - 1.2.3. Essais de traction simple
 - 1.2.4. Essais au viscosimètre
 - 1.2.5. Essais triaxiaux
 - 1.2.51. Résultats obtenus (figures 11, 12, 13, 14)
 - 1.2.52. Commentaires et conclusions (figures 15, 16)
 - 1.3. Méthodes à partir de calculs théoriques
- .2- Résultats obtenus
- .3- Propriétés de la résistance au cisaillement des tourbes
 - 3.1. Généralités
 - 3.2. Corrélations
 - 3.3. Diverses propriétés
 - 3.3.1. Sensibilité
 - 3.3.2. Mesure et valeur de K_0 (figures 17 et 18)
 - 3.4. Conclusion

CHAPITRE IV : COMPRESSIBILITE.

- .1- Généralités
- .2- Données physiques complémentaires
 - 2.1. Indice des vides
 - 2.1.1. Définition
 - 2.1.2. Propriétés
 - 2.1.3. Corrélation avec la teneur en eau
(figures 19, 20, 21, 22, 23) et commentaires
 - 2.2. Perméabilité
 - 2.2.1. Définition
 - 2.2.2. Propriétés
 - 2.2.3. Corrélation avec l'indice des vides
(figures 24, 25, 26, 27, 28, 29,30) et commentaires
- .3- Données statistiques (figures 31 et 32)
 - 3.1. Indice de compression
 - 3.1.1. Définition
 - 3.1.2. Résultats (figures 33, 34, 35, 36, 37) et commentaires
 - 3.2. Module oedométrique
 - 3.2.1. Définition
 - 3.2.2. Résultats (figures 38, 39, 40, 41, 42, 43) et commentaires
 - 3.3. Commentaires sur ces résultats
 - 3.3.1. Généralités et définitions
 - 3.3.2. Lois simples
- .4- Données théoriques
 - 4.1. Mécanisme de la consolidation
 - 4.1.1. Constatations expérimentales (figure 44)
 - 4.1.2. Mécanisme visqueux
 - 4.1.21. Viscosité structurale (figures 45, 46, 47)
 - 4.1.22. Thixotropie (figure 48)
 - 4.1.3. Mécanisme des micropores
 - 4.2. Théories de la consolidation
 - 4.2.1. Généralités (figure 49)
 - 4.2.2. Ecoulement de l'eau
 - 4.2.3. Modèle rhéologique du squelette
 - 4.2.31. Le ressort
 - 4.2.32. Le dashpot
 - 4.2.4. Loi générale
 - 4.2.5. Critique des lois existantes
 - 4.2.6. Loi simplifiée de BARDEN
 - 4.2.61. Généralités
 - 4.2.62. Résolution (figures 50, 51, 52)

CHAPITRE V : EXEMPLE D'UN PROBLEME PRATIQUE. CONSTRUCTION D'UN
REMBLAI AUTOROUTIER EN ZONE MARECAGEUSE.

- .1- Généralités
- .2- Exemple pratique. Le remblai autoroutier de Bourgoin
 - 2.1. Situation (figures 53, 54)
 - 2.2. Construction et résultats expérimentaux
 - 2.2.1. Construction
 - 2.2.2. Résultats "in situ"
 - 2.2.21. Tassements (figure 55)
 - 2.2.22. Déformations verticales
 - 2.2.23. Pressions interstitielles
 - 2.2.24. Evolution des tassements (figure 56)
 - 2.3. Exemples de méthodes de calcul
 - 2.3.1. Données générales
 - 2.3.2. Méthodes de calcul donnant le tassement en fonction du temps
 - 2.3.21. Méthode de "BUISSMAN" (figure 57)
 - 2.3.22. Méthode de GIBSON et LO (figure 58)
 - 2.3.3. Méthodes de calcul donnant le tassement total
 - 2.3.31. Calcul par la théorie de l'élasticité
 - 2.3.32. Méthode de TKACENKO pour évaluer le tassement final
 - 2.3.33. Méthode classique à l'oedomètre (figure 59)

.3- Conclusions.

BIBLIOGRAPHIE

ANNEXES

C H A P I T R E I
=====

PREMIERES CONNAISSANCES DE LA TOURBE

1. GENERALITES.

Jusqu'à une époque récente, la tourbe intéressait peu le mécanicien des sols ; on comprend aisément pourquoi quand on lit la définition qu'en donne TAYLOR :

"C'est une matière végétale partiellement carbonisée qui a une faible résistance au cisaillement, qui est souvent très perméable, toujours très compressible ; c'est le plus mauvais matériau de fondation que l'on puisse imaginer".

La tourbe est facilement reconnaissable car elle se présente comme une substance molle, brune ou noirâtre, plus ou moins spongieuse, de nature fibreuse, dans laquelle se distinguent plus ou moins bien des débris mortifiés de tissus végétaux. De plus elle a généralement une odeur acide.

Elle est issue d'une décomposition spéciale de débris végétaux, réalisée à l'abri de l'air, en milieu mouillé ou humide, faiblement oxygéné, par des agents biotiques : bactéries, champignons et virus. Cette décomposition spéciale, ou tourbification, voisine de l'humification, est tout le contraire d'une putréfaction qu'elle empêche, en conservant une part de la matière organique mise en oeuvre, alors que la putréfaction disloque complètement la matière organique en corps gazeux, en eau et en corps minéraux solubles dans l'eau.

Elle est également un matériau combustible de qualité médiocre, surtout utilisé à cet effet en période de disette.

On estime (K. VON BULOW B 12) qu'elle couvre sur la terre une surface de un million de km². Elle se développe en des lieux dits "tourbières", qui sont surtout importantes dans les vastes plaines d'Eurasie et d'Amérique du Nord.

Le fait que l'aspect de ce matériau, dans sa partie organique, est double, est une des causes de la très grande diversité des tourbes. On est en effet en présence :

- d'une substance organique figurée entrant dans la composition des restes des végétaux fossilisés, non encore totalement humifiés, les dimensions de ces restes variant depuis celle d'un tronc d'arbre, jusqu'à celle d'une cellule végétale. Cette organique figurée est très complexe, elle comporte en principe tous les corps chimiques constituant les plantes.

- d'une substance organique infigurée, qui est une sorte de gel colloïdal brun ou noir, en proportion plus ou moins importante selon la quantité de substance organique figurée. Dans les tourbes très jeunes, elle entoure simplement les débris végétaux, alors que dans les tourbes anciennes elle figure presque seule. Sans insister ici sur ce point, on peut indiquer qu'elle est essentiellement constituée de substances humiques.

Les tourbes sont d'ancienneté diverse, les tourbes véritables s'étant formées dans la période quaternaire depuis la dernière époque glaciaire (âge de la pierre taillée, de la pierre polie).

2. LES TOURBIERES.

Les tourbières se classent en deux types fondamentaux :

2.1. TOURBIERES PLATES.

Il s'agit d'un marais, d'un étang, d'un lac ou d'une partie de lac de faible profondeur, aux eaux eutrophiques, c'est-à-dire riches en sels minéraux dissous, favorisant une abondante végétation aquatique submergée, flottante et émergée. Dans nos régions, cette végétation consiste surtout en plantes vasculaires, Roseaux (Phragmites) et autres graminées, Laiches (Carex) et autres cypéracées, Prêles (Equisetum) et innombrables autres. Notons aussi des Mousses du groupe des Hypnes (Hypnum). Ces plantes vivent depuis le rivage inondé jusqu'à une profondeur de quelques mètres. La tourbification s'effectue aux dépens de ces plantes, de leurs débris accumulés et de tous autres restes végétaux amenés ou tombés dans l'eau. Elle demande, sans trop d'exigences, des conditions physico-chimiques appropriées : une eau calme et claire, non chargée ou peu chargée de matériaux de sédimentation, pas trop oxydée (ce qui provoquerait la destruction totale oxydative des restes végétaux), pas trop réductrice (ce qui provoquerait la fermentation méthanique). Une certaine chaleur favorise la tourbification, mais un excès peut provoquer une destruction totale oxydative. De toute façon, la tourbification se fait sous l'eau et est dite "infra-aquatique". On nomme également ce type de tourbière : tourbière de bas marais ou de marais vert.

La tourbification étant consécutive à l'envahissement de la pièce d'eau par la végétation, des rives vers le centre, la tourbière est à croissance centripède. Sa surface étant sensiblement celle du niveau de l'eau, est donc horizontale ou plate

La tourbe s'accumule sur quelques mètres : deux à trois mètres en général, elle est noire, à peu près neutre, fréquemment calcaire.

Ce type de tourbière meurt lorsque la cuvette de tourbification est comblée et asséchée.

En France, les tourbières plates sont nombreuses dans les vallées et les plaines.

2.2. TOURBIERES BOMBEES.

Ces tourbières sont édifiées presque exclusivement par des Sphaignes (Sphagnum) parfois avec le concours d'autres plantes, mousses diverses, quelques Laïches (Carex), des Linaigrettes (Eriophorum) et autres cypéracées.

Les Sphaignes sont des mousses particulières atteignant quelques centimètres. Leur tissu cellulaire comporte des cellules spéciales, semblables à de petites outres percées de pores favorisant l'ascension et la conservation de l'eau, aussi bien celle du sol que celle de l'air humide. Elles peuvent absorber une grande quantité d'eau (jusqu'à 40 fois leur propre poids de plante sèche).

Tandis que les Sphaignes croissent en hauteur, côte à côte, en construisant des coussins spongieux et humides, leur pied se tourbifie progressivement à l'abri de l'air. Ainsi est réalisé de toute autre manière que dans les bas marais le milieu mouillé et peu oxygéné propre à la tourbification. Ici la tourbe se fabrique dans une eau portée, par un artifice naturel, plus haut que le sol ou que le niveau d'eau primitif. Ainsi s'édifie,

à partir d'un centre, par couches successives, de manière centrifuge, une tourbière haute, bombée au centre, qu'on dit aussi supra-aquatique, haut marais ou marais rouge.

Ces tourbières peuvent atteindre 10 à 15 mètres d'épaisseur. Elles s'installent un peu partout, car elles ne sont pas liées, comme les tourbières plates, à une dépression géographique, mais à un climat pluvieux ou humide.

Les sphaignes pullulent surtout dans les contrées froides et humides, sur les sols pauvres, siliceux, ou au bord de pièces d'eau de pH 3 à 5 ou faiblement minéralisées, oligotrophiques, c'est-à-dire pauvres en sels minéraux nutritifs dissous. En France, elles se développent surtout dans les régions de basses montagnes.

La tourbe ayant cette origine est en général brune. Le développement de la tourbière s'arrête quand le coeur tourbeux du centre s'assèche pour une raison ou une autre.

2.3. CONCLUSIONS.

La nature étant souvent complexe, les deux types de tourbières présentés sont souvent mélangés. On a alors des tourbières mixtes. Toutefois, il ressort des lignes précédentes que le matériau des tourbières plates est plus foncé que celui des tourbières bombées, leur pH est sensiblement neutre alors qu'il est franchement acide pour les tourbières hautes ; de plus, le premier type a généralement une épaisseur plus faible que le second. Toutefois, on s'aperçoit que la morphologie d'une tourbière est insuffisante pour endéduire la nature de la tourbe qui la constitue.

C H A P I T R E I I
=====

ESSAIS D'IDENTIFICATION

1. DONNEES DE LA CHIMIE.

1.1. ANALYSE ELEMENTAIRE.

C'est avant tout autre caractère celui de la composition centésimale de sa substance organique qui permet de classer la tourbe parmi les autres roches, car la tourbe "faite" est une roche dans l'acception géologique du terme. Etant issue de l'activité d'êtres vivants, la tourbe est une biolithe.

En règle générale la tourbe est fortement carbonée, riche en oxygène, pauvre en hydrogène, plus pauvre encore en azote, avec des traces de phosphore et de soufre.

Avant de donner des chiffres de composition centésimale, il faut savoir que l'analyse élémentaire de la tourbe est une opération délicate car le résultat est lié à la marche de l'opération. La tourbe n'étant pas une matière organique homogène, il est difficile d'obtenir des résultats concordants entre plusieurs expériences sur un même échantillon. Sans s'étendre sur ce problème, on peut signaler qu'une des principales difficultés rencontrées est la formation de méthane. On ne peut pas l'éviter complètement, mais il faut conduire la combustion de telle façon que l'intégralité de ce gaz soit brûlée.

Le Français DE MONTGOLFIER M 17 en se basant sur une large étude statistique, donne une composition chimique moyenne de la tourbe en France :

H	C	O	N	Cendres	Total
5,63	57,03	29,67	2,09	5,58	100

La figure n° 1 (page 10), établie en partant d'un diagramme de RADFORTH R 7 et complétée par nous avec des valeurs trouvées en France, donne une idée des extrêmes que l'on peut rencontrer.

Sous cette figure, un tableau de valeurs numériques donne des moyennes de la composition de différentes tourbes françaises. Nous avons fait aussi figurer la composition d'une Sphaigne pure, pour que l'on puisse se rendre compte de l'évolution des proportions pendant la tourbification. Enfin, nous avons reproduit, pour une même tourbière, les valeurs trouvées en fonction de la profondeur. Ceci montre qu'une tourbière est loin d'avoir une composition unique, mais que la teneur en azote s'accroît relativement à la disparition du carbone.

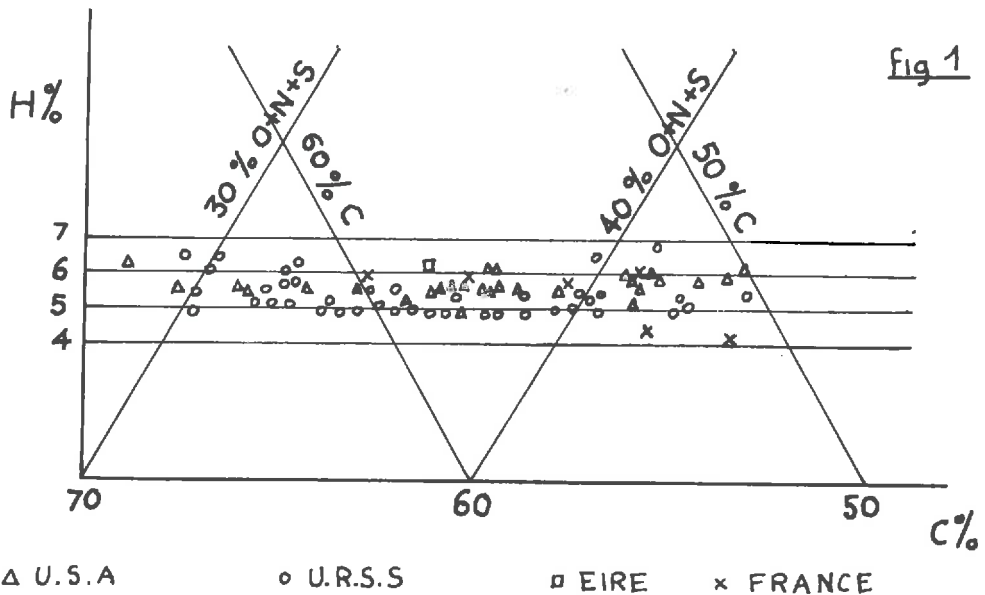
De façon générale, on s'accorde à dire que la teneur en oxygène diminue avec l'ancienneté de la tourbe. On le vérifie par le fait que la Sphaigne pure a une forte teneur en oxygène qui, pour une tourbière donnée, décroît avec la profondeur, donc avec l'âge.

Certains auteurs admettent que la teneur en hydrogène et en carbone augmente avec l'ancienneté, mais ce n'est pas très net car pendant la tourbification, il peut arriver des dégagements de méthane et de gaz carbonique qui font brusquement diminuer ces proportions.

Cependant, on constate qu'une tourbe noire bien décomposée peut avoir une teneur en carbone de 65 % alors que pour une tourbe moussue récente, elle ne dépasse guère 55 %.

COMPOSITION ELEMENTAIRE de la TOURBE

Diagramme partiellement donné par RADFORTH [R7]



	C	H	N	O
Sphaigne pure	49,88	6,54	1,16	42,42
Tourbes d'Heurteauville (76)	57,30	4,35	2,75	35,60
Tourbes de Vendoire (24)	61,40	4,80	2,50	31,30
Tourbes de S ^t GenesChampeyspe	61,90	5,95	1,80	30,35
Tourbes de Besse (63)	58,60	5,90	1,50	34,00
Tourbes de Picherande (63)	55,30	5,61	1,29	37,80
Tourbes ana- lysées par DETMER } en surface	57,75	5,43	0,80	36,06
	72,02	5,21	2,10	30,67
	64,07	5,01	4,85	26,87

Résultats pour des tourbes Françaises [V2]

Ces différentes données permettent au Chimiste d'avoir des caractéristiques quantitatives d'une tourbe, mais pour le Mécanicien des Sols, faute de corrélations, les renseignements ne sont que qualitatifs.

1.2. CONSTITUANTS CHIMIQUES.

Nous avons précédemment envisagé la composition chimique élémentaire de la tourbe, mais, en fait, nous sommes en présence d'un mélange complexe de substances d'origine principalement végétale, très accessoirement animale, les unes à l'état figuré et donc visibles encore, au moins au microscope, les autres à l'état infiguré, amorphe, constituant la pâte colloïdale entourant les restes figurés.

Alors que les restes figurés ont la composition des plantes fraîches : cellulose, lignine, résines et cires, la pâte, elle, est constituée du complexe humique, comportant essentiellement des acides humiques qui sont des produits de transformation de la lignine. Nous allons décrire rapidement ces différents constituants.

1.2.1. La Cellulose.

=====

C'est le principal constituant de la plante fraîche. Elle forme une partie appréciable du bois où elle est, en quelque sorte, enrobée de lignine.

La cellulose est un glucide ayant comme formule générale $(C_6 H_{10} O_5)_n$, la valeur attribuée à n variant.

En fait, selon l'origine, il existe plusieurs sortes de celluloses, et pour la tourbe l'expression "cellulose" s'applique à toute une série de corps, car elle n'existe pas à l'état de pureté dans la nature, mais incrustée, mélangée à différentes substances annexes.

Dans la tourbe, la cellulose, ainsi que certains constituants glucidiques, se dégrade aisément. L'hydrocellulose, un des premiers stades de cette dégradation, constitue dans la tourbe une sorte de gaine autour des restes végétaux non encore humifiés ; elle est en grande partie responsable de la puissance de rétention hydrique des tourbes. Cette hydrocellulose elle-même se dégrade en hexoses solubles qui disparaissent rapidement, soit par dissolution, soit par fermentation et probablement par humification. Ceci explique que la quantité de cellulose diminue rapidement dans la tourbe en fonction de l'ancienneté de celle-ci.

1.2.2. La Lignine.

=====

La lignine est constituée d'un groupe de substances d'incrustation conférant la rigidité à la membrane cellulaire des végétaux ; le bois en est essentiellement formé. Elle représente une partie importante de la tourbe, 10 % à 40 %. Elle s'y trouve surtout à l'état figuré dans les restes végétaux conservés, ainsi qu'à l'état infiguré en un complexe colloïdal de combinaison ou d'adsorption ligno-humique. Au début du vieillissement de la tourbe, la teneur en lignine tend à augmenter à la suite de la disparition précoce de la cellulose et des glucides. Ensuite cette teneur diminue par humification.

De fait, les lignines sont des substances mères très importantes de la matière humique. On admet souvent aujourd'hui que la lignine est un corps chimiquement défini, toutefois, selon les auteurs, la composition apparaît comme assez variable. C'est un corps ternaire (C 65 à 66 %, H 6 %, O 28 à 29 %) contenant des noyaux cycliques et des radicaux méthoxyles $-OCH_3$, dont la plus ou moins forte teneur apparaît comme un indicatif de plus ou moins grande complexité chimique.

1.2.3. Les Acides Humiques.

Ils constituent la majeure partie de la tourbe. Ce sont des substances colorées allant du brun clair au brun foncé. La composition centésimale est :

C 56 à 63 %, H 3,3 à 5,3 %, O 28 à 40 %, N 0,2 à 5,3 %.

Ce sont des mélanges ou complexes colloïdaux, formés par carbonisation, à partir de résidus végétaux sous l'effet d'organismes inférieurs, de conditions chimiques, physiques ou climatiques appropriées. Les facteurs géologiques entrent également en jeu dans la nature du processus de carbonisation.

Ces acides ont un poids moléculaire élevé (1200 à 1800). Le caractère acide est essentiellement dû à la présence de groupes carboxyles ($-COOH$) et accessoirement d'hydroxyles phénoliques ($-OH$) présents dans les produits d'oxydation des lignines. Ces acides contiennent certainement des noyaux cycliques, mais il ne faut pas perdre de vue qu'il ne s'agit pas d'un acide organique chimiquement défini, nous avons affaire à un complexe dans lequel la coexistence des groupes fonctionnels $COOH$ et OH permet la formation d'esters hydrolysés sous l'action des alcalis.

Pour finir nous répèterons que la lignine est une source importante et certaine des substances humiques. En outre, des indications sérieuses montrent que d'autres corps organiques (humolides de glucides, d'amino-acides, de tannins...) s'humifient. Ces substances humiques constituent 15 à 30 % des tourbes non évoluées et jusqu'à 70 % des tourbes évoluées.

1.2.4. Les Cires et Résines.

=====

Les cires et résines contenues dans les tourbes sont d'origine animale et végétale. Les résidus d'animaux subissent pendant l'humification une transformation profonde, tandis que les cires et résines ne montrent que de faibles variations.

1.2.5. Conclusions et synthèse.

=====

A partir de ce que l'on a déjà vu, on s'aperçoit que la tourbe provient des végétaux dont les constituants appartiennent à deux groupes :

- les éléments ne se modifiant pas sous l'influence de la tourbification (cires, résines, sels minéraux ...). Ces éléments sont en faible proportion.

- les éléments rentrant en jeu au cours de la tourbification (humification) comme la lignine, la cellulose. Ces éléments représentent la majeure partie de la tourbe.

Il ressort que ce qui caractérise l'âge d'une tourbe, c'est la présence d'une certaine quantité d'acides humiques.

A priori on pourrait donc classer les tourbes suivant leur degré de tourbification. A un faible degré correspond une forte teneur en lignine et une humification plus ancienne est caractérisée par une forte teneur en acides humiques. Mais ce raisonnement n'est valable que pour des tourbes de même origine, sinon les mêmes limites dans les pourcentages d'acides humiques ne sont plus valables. Il faut tenir compte de la nature des plantes formant la tourbe. Les sphaignes sont très riches en cellulose et moins riches en lignine que d'autres végétaux. Les tourbes à sphaignes, même très anciennes, n'auront pas un pourcentage aussi élevé en acides humiques que les tourbes de marais (tourbières plates), à âge égal. Le pourcentage de cellulose sera par contre plus fort dans les tourbières bombées. Nous donnons, à titre indicatif, les valeurs suivantes :

- . tourbières plates : 55 à 73 % d'acides humiques
- . tourbières bombées : 40 à 58 % d'acides humiques

1.2.6. Exemple d'interprétation d'une analyse.

Prenons pour base les caractéristiques de différentes tourbes françaises (V2).

Provenance	Acides Humiques %	Lignine %	Cellulose- %
PICHERANDE (63)	62,4	7,7	10,2
BESSE (63)	74,2	4,6	-
ST GENES CHAMPEYSPE (63)	44,3	4,3	28,5
HEURTEAUVILLE (76)	67	16,4	2,5
VENDOIRE (24)	68	20,7	-

BESSE et ST GENES CHAMPEYSPE ont des tourbes où la lignine est en faible proportion, la cellulose est présente mais n'intervient pas beaucoup dans la formation d'acides humiques. Ainsi on peut penser que ces tourbières sont anciennes et que leur évolution est presque arrêtée. La tourbe de ST GENES CHAMPEYSPE a une forte teneur en cellulose, c'est sans doute une tourbe à sphaignes.

Les tourbes de PICHERANDE, HEURTEAUVILLE et VENDOIRE sont en évolution, les acides humiques pouvant encore augmenter grâce à la présence importante de lignine.

1.3. TENEUR EN MATIERES ORGANIQUES. PERTES AU FEU.

A l'état naturel la tourbe n'est jamais "pure" ; elle est toujours constituée, à côté des composants organiques, d'autre chose.

1.3.1. Origine des cendres.

=====

Quand, par un procédé quelconque, on détruit les matières organiques, il reste des cendres qui proviennent :

- des impuretés minérales introduites dans la tourbière par gravité, par transport aérien, et surtout par ruissellement ; ce sont des débris de roches quelconques, mais principalement de la silice des graviers, sables et vases sableuses ; des silicates d'alumine des vases argileuses ; du calcaire à l'état de granules plus ou moins roulés. Ces impuretés sont visibles à l'oeil nu ou au microscope.

- de précipitations chimiques ou biochimiques, notamment de calcaire lacustre, de minerai de fer des marais, de phosphate de fer, de pyrite de sel marin... Ces impuretés, dont certaines facilement volatiles lors de la combustion, sont plus ou moins visibles à l'oeil nu ou au microscope.

- de débris osseux de vertébrés, de débris de coquilles calcaires de mollusques, de micro-organismes, de corpuscules siliceux provenant de quelques plantes de tourbières. Toutes ces impuretés sont visibles à l'oeil nu ou au microscope.

- d'éléments minéraux prenant part à la constitution chimique des plantes mères de la tourbe : silice, sels de calcium, fer, potassium, magnésium, sodium... Ces impuretés sont invisibles et ne se laissent déceler que par analyse chimique.

1.3.2. Procédés d'essai.

=====

La teneur en matières organiques est la proportion de ces matières contenues dans un échantillon, exprimée en pourcentage du poids total sec de ce dernier. Le séchage est effectué à 65° C avant tout essai.

La teneur en matières organiques dépend du type de tourbe analysée. Elle peut atteindre 95 %, mais si elle descend en-dessous de 50 % on ne peut guère alors parler de tourbe.

Un essai précis est utile, car il est difficile, à première vue, de se rendre compte du degré de pureté d'après la teinte et la consistance. Une alluvion ou un sol, sableux et mouillé, est noir et collant et donne l'impression trompeuse d'une tourbe avec seulement 15 à 20 % de matières humiques.

Il en est de même pour une vase argileuse mouillée contenant 30 à 40 % de matériaux organiques. Un simple examen à l'oeil nu, après dessiccation, permet souvent de corriger cette erreur, le sable perdant sa cohésion et la vase devenant dure et dense.

Pour obtenir la teneur en matières organiques, il existe deux types d'essais courants, que nous rappellerons sans les détailler car ils figurent, entre autres, dans le "Manuel du Laboratoire Routier" de PELTIER P 1 .

. Essai par voie humide (M O %))

On procède à une oxydation (à l'aide de bichromate de potassium et d'acide sulfurique ou à l'aide d'autres produits oxydants) du carbone organique. En supposant que seul le carbone organique est oxydé et que la matière organique contient 58 % de carbone, on déduit le pourcentage de celle-ci.

. Essai de pertes au feu.

On admet que la teneur en matières organiques est le pourcentage de poids total perdu au cours d'une combustion dont la température varie, suivant les auteurs, entre 600°C et 900°C. En effet, en chauffant, la tourbe dégage, à partir de 110°C, 65 à 75 % de matières volatiles. D'abord passent l'eau de combinaison, l'alcool méthylique puis les goudrons. A 500°C la majeure partie des gaz combustibles, d'acide acétique et des goudrons est expulsée, et vers 700°C, seul le carbone fixe n'est pas oxydé.

En général l'essai de pertes au feu donne des résultats supérieurs à l'essai par voie humide. Ceci est logique car, si par voie humide on oxyde seulement le carbone de provenance organique, par la combustion on oxyde également le carbone de provenance minérale (carbonates) et l'on fait dégager les minéraux volatils, comme l'eau de constitution. Toutefois on peut obtenir le résultat inverse. On peut alors supposer que la molécule organique contient une partie minérale. Une oxydation par voie humide entraîne une destruction complète alors que, par calcination, la destruction est nulle ou partielle.

Souvent on fait note du pourcentage de cendres, qui est le complément à 100 de PF %.

1.3.3. Résultats.

Il n'existe pas, à notre connaissance, une étude détaillée sur les problèmes de teneur en matières organiques.

Pour notre part, en analysant les résultats obtenus sur la tourbe de Bourgoïn, qui est visuellement homogène, amorphe et noire (cf. Tableau n° 1, page 41) on peut déduire, quant aux MO% et PF% obtenus dans les conditions définies par PELTIER, que :

	MO% moyen	=	65 %
. Tourbe de BOURGOIN	PF% moyen	=	77 %

De plus, sur la figure n° 2 (page 22), nous avons porté MO%-PF% et fait figurer les deux droites de régression. Ces droites ont une pente nettement plus faible que la première bissectrice, ce qui veut dire que l'essai de pertes au feu, pour la tourbe de Bourgoïn, donne des résultats plus grands que l'essai par voie humide.

Les deux droites de régression ont pour équations :

$$PF = 1,1 MO + 5$$

$$MO = 0,67 PF + 13,5$$

Le coefficient de corrélation est 0,862. En appliquant la méthode décrite à l'annexe 1 (page 107) on voit que les erreurs-types maximales dans ce cas précis sont :

$$MO\% \text{ par rapport à } PF\% : 3,9 \%$$

$$PF\% \text{ par rapport à } MO\% : 4,5 \%$$

1.4. ACIDITE.

1.4.1. Généralités et technique de mesure.

=====

L'acidité est caractérisée par le pH du sol. Dans le cas des sols classiques, sa détermination se fait simplement à l'aide d'un pHmètre. On prend 50 g dans un échantillon de sol préalablement séché et broyé. On les mélange à 100 g d'eau distillée de pH connu. On filtre ensuite le mélange et on mesure son pH. La méthode ainsi décrite est courante et donne une valeur relative, rapportée à celle de l'eau distillée.

Dans le cas de la tourbe, cette méthode s'applique, mais une difficulté expérimentale surgit avec l'énorme capacité d'absorption de l'eau possédée par ce matériau. La filtration naturelle ne fournit que quelques gouttes de solution, juste suffisantes pour faire une mesure de pH au papier sensible (méthode colorimétrique). On a alors le pH à une demi-unité près. Pour extraire plus de liquide, il faut filtrer sous vide ou utiliser une centrifugeuse.

Une autre méthode peut fournir le pH : le procédé des électrodes de contact. Comme pour le pHmètre, on utilise le fait que la différence de potentiel entre une électrode de verre et une électrode de référence (fer en général) enfoncées dans le sol est une fonction linéaire du pH de ce dernier. Ce procédé a l'avantage de s'appliquer à des échantillons intacts.

Les tourbes sont en général acides. Les valeurs sont très variables (moyenne entre 4 et 6) car beaucoup de facteurs entrent en jeu :

- la flore composant la tourbière
- la végétation dans les tourbières
- la teneur en matières minérales, les tourbes les plus pures donnant les valeurs de pH les plus basses.

L'importance relative de ces facteurs n'a jamais été étudiée, ce qui fait que les négliger peut conduire à dire que dans les tourbières l'acidité croît ou décroît avec la profondeur, croît ou décroît avec la distance au centre. Ces constatations ne sont valables que très localement et varient même au sein d'une même tourbière.

1.4.2. Résultats.

- GORHAM G 8 (cf. figure n° 3 page 22) publie une courbe montrant la décroissance du pH en fonction de MO%. Aucune précision n'est donnée quant à la dispersion des résultats.

RELATIONS entre les POURCENTAGES de MATIERES ORGANIQUES DETERMINES par l'ESSAI par VOIE HUMIDE (MO%) et par l'ESSAI de PERTES au FEU (PF%) pour la TOURBE de BOURGOIN

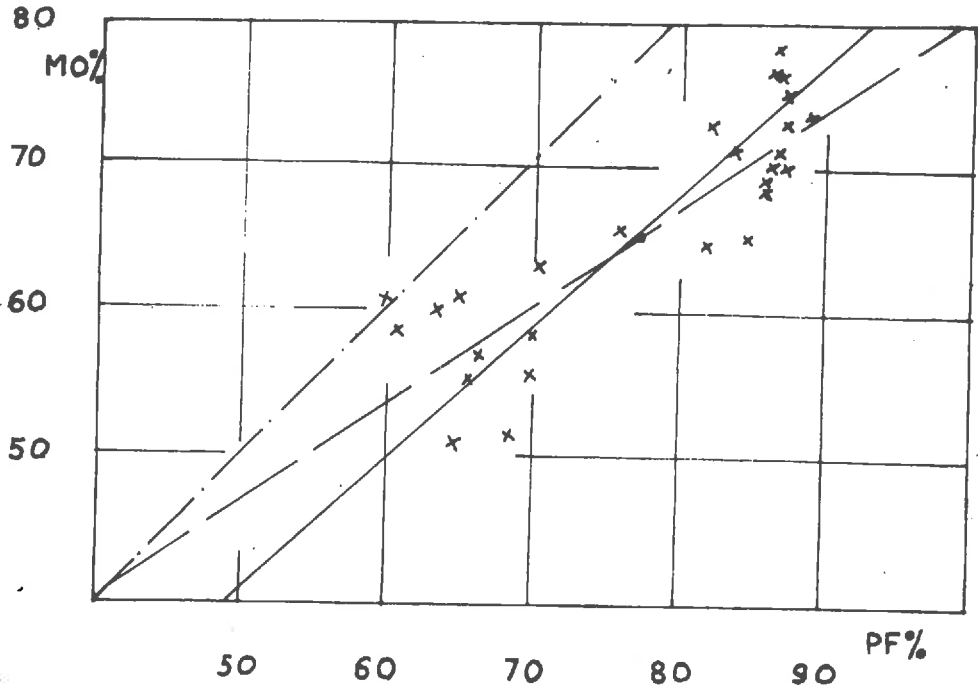


fig 2

VARIATION du PH en FONCTION de la TENEUR en MATIERES ORGANIQUES d'après GORHAM (CANADA) [68]

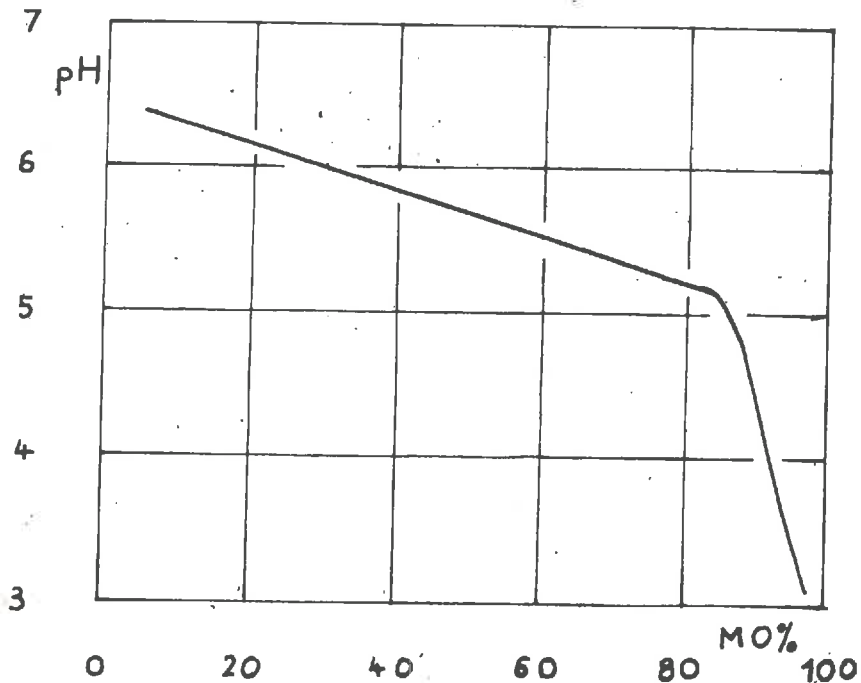


fig 3

- FRIDOLIN FIRTION F 3 donne des résultats relatifs à différentes tourbières françaises. Une tourbe à Sphaignes provenant de FRASNES (Doubs) voit son pH croître de 2,7 à 6,8 entre la surface et 2,25 m de profondeur. Une tourbe caricière de BOUJEAILLES (Jura) voit son pH croître entre la surface et 1,5 m de profondeur, puis devenir très irrégulier entre 1,5 m et 6,9 m (variation entre pH = 2,5 et 7,8).

- ADOLPHE ISHER I 2 constate que la décroissance de l'acidité du centre de la tourbière du Bois des Lattes à sa périphérie, est irrégulière. Il explique cela par la présence de pins qui acidifient localement le sol. D'autre part, il justifie les variations de pH en profondeur par le jeu de la succession des associations végétales.

- Une analyse des résultats obtenus sur la tourbe de Bourgoin (cf. Tableau n° 1, page 41) où nous avons utilisé un pHmètre, permet de remarquer :

. que le pH moyen est égal à 5,8, donc légèrement acide. L'écart-type est 0,73 ce qui indique une assez faible dispersion.

. qu'aucune loi de variation du pH en fonction d'un autre paramètre n'apparaît.

2. DONNEES PHYSIQUES.

2.1. TENEUR EN EAU.

$$W \% = \frac{\text{poids d'eau dans l'échantillon}}{\text{poids de solide sec dans l'échantillon}} \times 100$$

2.1.1. Généralités.

=====

La génèse de la Tourbe exige au moins un entourage extrêmement humide. De cette origine elle conserve un caractère essentiel : sa forte teneur en eau. De plus, la substance colloïdale complexe qui se constitue aux dépens des tissus végétaux en décomposition retient farouchement l'eau dont elle est imbibée.

La teneur en eau, qui est forte et variable d'un point à un autre, est à l'origine des propriétés physiques et mécaniques de la tourbe. Sa connaissance est donc importante.

Une tourbe "franche" ou "pure", c'est-à-dire faiblement contaminée en minéraux, a une teneur en eau supérieure à 500 % ; elle atteint parfois 1500 % et exceptionnellement 3000 %. Elle varie inversement avec l'état de décomposition (ou tourbification) et décroît rapidement avec la teneur en minéraux.

2.1.2. Classification.

=====

Les facteurs qui retiennent l'eau dans la tourbe sont mal connus et, selon les auteurs, diversement énumérés. On peut dire toutefois qu'une grande partie de l'eau est libre, emplissant simplement les grandes cavités de la masse tourbeuse. Une autre partie est liée par capillarité et une autre par adsorption au gel colloïdal essentiellement humique qui enrobe les restes végétaux décomposés ou qui constitue parfois à lui seul toute la masse tourbeuse. Si on presse de la tourbe dans la main, elle laisse échapper l'eau libre et l'eau liée par capillarité, mais ensuite elle gicle de force entre les doigts sans laisser suinter d'eau.

Parmi les classifications citées par les auteurs, nous en citerons deux, l'une simple :

- Classification de STALINIKOFF M 11 :

- 1) eau retenue mécaniquement : elle part par pression.
- 2) eau liée colloïdalement.

et l'autre plus compliquée :

- Classification d'OSTWALD M 11 :

- 1) eau occluse : dans les cavités
- 2) eau capillaire : dans les parois capillaires
- 3) eau liée colloïdalement : retenue par les composés chimiques colloïdaux
- 4) eau liée osmotiquement : dans les cellules des plantes non décomposées
- 5) eau liée chimiquement.

De plus, il est probable que la présence de cations échangeables ait une influence sur les teneurs en eau.

Cependant, l'intérêt pratique des classifications est faible car, au séchage, on ne sait pas très bien quelle sorte d'eau s'évapore.

2.1.3. Mode opératoire.

=====

On a longtemps opéré comme pour les sols minéraux, en plaçant le matériau humide à l'étuve à 105-110°C, et en attendant 24 h, 48 h, ou l'obtention d'un poids constant. (cf. ANDERSON A5 , COLLEY C5 , FEUSTEL et BYERS F2 , HANRAHAN H3 , STANEK S8

Actuellement, les auteurs s'accordent sur le fait que le séchage doit se faire à une température plus basse.

AKROYD A1 et MIYAKAWA M 16 préconisent 60°C, GOODMAN G7 85°C.

Des essais de MAC FARLANE et ALLEN M 11 faits à différentes températures montrent que pour prévenir tout risque d'oxydation de la matière organique, on ne doit pas opérer à plus de 85°C. A cette température, où l'obtention d'un poids constant nécessite trois jours d'étuve, l'observation microscopique montre qu'il n'y a aucun signe de carbonisation, ce qui n'est plus le cas à des températures plus fortes où l'oxydation devient suffisante pour influencer notablement la teneur en eau.

MAC FARLANE cite :

. 25°C pendant 1170 heures	WZ = 1058
. 75°C pendant 56 heures	WZ = 1124
. 110°C pendant 26 heures	WZ = 1331
. 120°C pendant 22 heures	WZ = 1368

Soit des différences de :

6,2 % à 75°C ; 25,8 % à 110°C ; 29,3 % à 120°C.

Les durées correspondent chaque fois à l'obtention d'un poids constant, mais les échantillons perdent 98 % de leur poids pendant la première moitié du temps de séchage.

2.1.4. Méthode de détermination de W% "in situ".

Depuis quelque temps des essais sont effectués pour déterminer la teneur en eau "in situ" directement, en utilisant les neutrons. Les résultats sont jusqu'à présent difficiles à interpréter, mais permettent de suivre une variation saisonnière.

Le principe de la mesure est simple. Une source radium-béryllium émet des neutrons rapides. Si ceux-ci heurtent un noyau lourd, ils rebondissent élastiquement sans perte notable d'énergie cinétique ; par contre, s'ils heurtent un noyau de masse équivalente à la leur (hydrogène), le transfert d'énergie est presque total. On a alors des neutrons lents ou "thermiques". Le trifluorure de Bore (BF_3) permet de détecter ces neutrons "thermiques". Comme l'hydrogène se trouve principalement dans l'eau des sols, la détermination de sa quantité permet de déduire la teneur en eau.

2.1.5. Résultats.

- MAC FARLANE et RUSKA M 10 donnent, pour des tourbes à caractères très échelonnés, une corrélation entre W% et PF% (figure n° 4 page 32).

La corrélation est signalée bonne pour :

PF% < 75 % et W% < 600 %

Hors de ces cas limites, on a des tourbes "franches", et la corrélation est alors très floue.

- Pour la tourbe de Bourgoin, le manque d'échelonnage des valeurs pour W% et PF% ne nous permet pas de faire des corrélations, d'autant plus qu'elle serait visiblement très lâche. Toutefois, nous avons établi que :

. La teneur en eau moyenne est 578 %. C'est un chiffre élevé mais la couche de tourbe est saturée car immergée.

. L'écart-type $\sigma = 95 \%$ indique une forte dispersion due surtout à la grande variation de la tourbe d'un point à un autre et aussi aux différences de saisons existant entre les prises des échantillons.

2.2. DENSITE RELATIVE DES GRAINS SOLIDES G.

2.2.1. Techniques de mesure.

=====

Cette densité relative G dépend des proportions relatives de sol organique et minéral.

2.2.11. Mesure par déplacement de liquide.

On peut utiliser la méthode habituelle de déplacement d'eau, à l'aide d'un picnomètre. Ce procédé possède un inconvénient avec la tourbe, car les particules flottent sur l'eau. Le Canadien STANEK S8 suggère l'utilisation de kérosène, évitant ainsi la flottaison.

MAC FARLANE et ALLEN M 11 ont fait de nombreux essais avec cette méthode qui, si elle est difficile à mener à bien, est précise. Ils ont fait sécher des tourbes fibreuses et amorphes à différentes températures (de 75°C à 110°C) et ont utilisé le

picnomètre avec différents liquides : eau distillée - kérosène filtré - tétrahydronaphtalène. Les deux derniers procédés conduisent à des résultats identiques, mais le premier donne des valeurs plus élevées à cause de la flottaison des particules de la tourbe. Par contre, il n'y a pas de différences notables dues aux températures de séchage.

En conclusion, il semble que le procédé au kérosène soit le plus intéressant car ce liquide se procure facilement et permet une mesure précise.

2.2.12. Mesure à partir des essais PF% et MO%.

COOK C6 et MIYAKAWA M 16 ont proposé chacun une formule.

Soit :

G_s poids spécifique du constituant minéral
 G_p poids spécifique du constituant organique
 N % étant le pourcentage de matières organiques sans préciser l'essai effectué.

COOK donne :

$$G = N (G_s - G_p) + G_p$$

avec : $G_p = 2,7$ $G_s = 1,5$

MIYAKAWA donne :

$$G = \frac{G_s G_p}{(G_s - G_p) PF + G_p}$$

avec : $G_s = 2,6$ $G_p = 1,2$

La première formule est une moyenne entre les deux composants, et la seconde une formule empirique, donnant d'ailleurs des résultats plus faibles que la première. Ces formules ne sont qu'approchées car on s'y donne G_p et G_s de façon arbitraire, et l'on utilise au choix PF% ou MO%, ce qui ne conduit pas au même résultat.

2.2.2. Résultats obtenus.

=====

Les valeurs de G sont généralement comprises entre 1,4 et 1,7, les extrêmes pouvant être d'une part celles des matériaux minéraux (2,7) et d'autre part celles de la lignine et la cellulose (1,1 à 1,2).

- MAC FARLANE et ALLEN M 11, sur une tourbe canadienne où PF = 96,8 % et MO = 89,15 %, donnent des valeurs figurant dans le tableau ci-dessous. On remarquera l'imprécision des résultats obtenus par l'application des formules.

Procédé utilisé	G
Déplacement d'eau distillée	1,46
Déplacement de kérosène filtré	1,40
Déplacement de tétrahydronaphtalène	1,40
Formule de COOK (avec PF%	1,52
Formule de COOK (avec MO%	1,575
Formule de MIYAKAWA avec PF%	1,22

- Pour la tourbe de Bourgoïn, les résultats pour G sont déduits de l'essai au picnomètre, par déplacement de tétrahydronaphtalène. Nous les avons comparés aux valeurs obtenues par les formules de COOK C6 et MIYAKAWA M 16 (cf. Tableau n° 2 page 42).

En supposant que le picnomètre donne un résultat vrai, la différence avec COOK est 17 % et MIYAKAWA 7 %, ce qui est une erreur importante.

2.2.3. Corrélations.

=====

2.2.31. Relation G - % matières organiques.

Comme pour tout ce qui concerne la tourbe, l'absence de procédés normalisés pour la mesure des caractéristiques, empêche de comparer valablement les résultats.

Prenons, par exemple, les corrélations données par MAC FARLANE et RUSKA M 10 et celles de BROCHU et PARE B9. Les premiers mesurent G au picnomètre et PF%, les seconds n'utilisent que PF% et encore signalent-ils que les cendres contiennent encore des matières organiques ; comme ils calculent G par la formule de COOK ($G = 2,7 - 1,2 N$), ils obtiennent une courbe décalée sur la droite par rapport à celle de MAC FARLANE-RUSKA M 10.

Sur la tourbe de Bourgoïn, en suivant la méthode de MAC FARLANE, on trouve des points qui correspondent assez bien avec la courbe de ce dernier. Toutefois, quand on arrive dans le domaine des "tourbes franches" définies en 2.2.32, la corrélation est lâche.

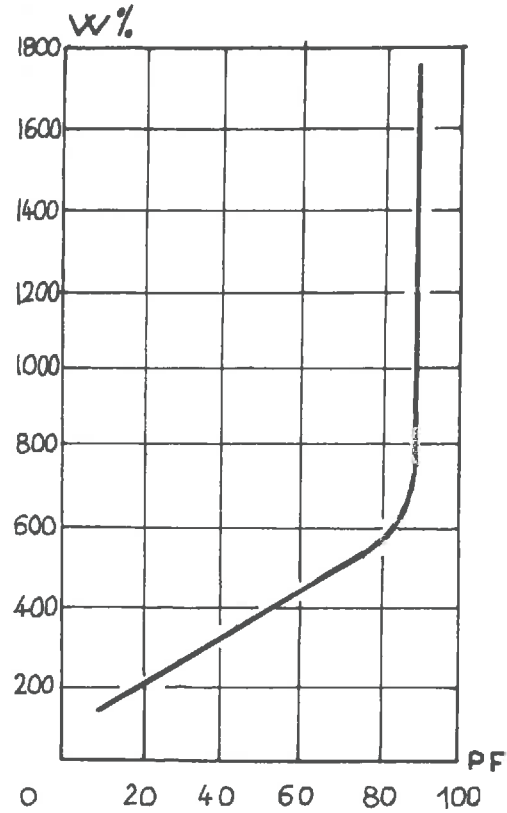
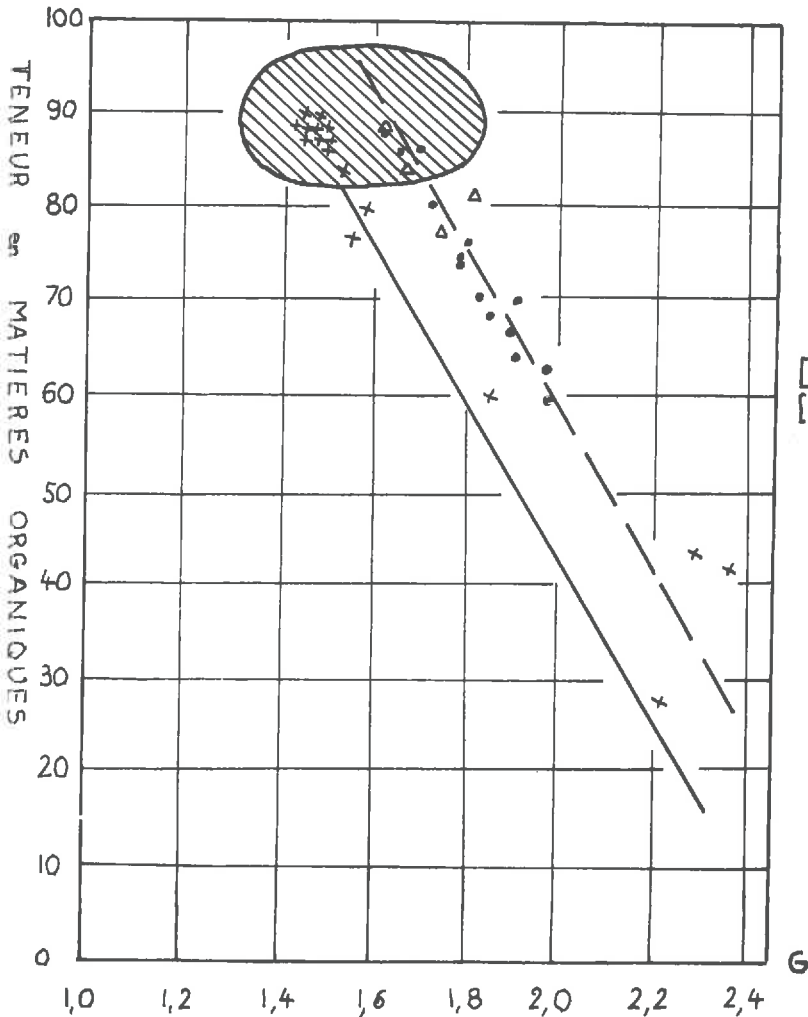
La figure n° 5 (page 32) rend compte de ces résultats.

CORRELATION entre la TENEUR en EAU et la TENEUR en MATIERES ORGANIQUES (PF%)

d'après MAC FARLANE et RUSKA (Tourbe du CANADA)

[M 10]

fig 4



CORRELATIONS DIVERSES entre la DENSITE des GRAINS SOLIDES et la TENEUR en MATIERES ORGANIQUES

[M10] ——— droite de Mac Farlan
 [89] - - - droite de Brochu-Par
 x tourbe de Bourgoin

CONDITIONS D'ESSAI

MAC FARLANE	picnomètre PF%
BROCHU-PARE	G = 2,7 - 1,2 PF%
BOURGOIN	picnomètre PF%

fig 5

2.2.32. Relations G - W%.

Les courbes publiées par MAC FARLANE L 4 (figure n° 6 page 34) d'une part, et LEA et BRAUNER L4 (figure n° 7 page 34) d'autre part, indiquent que la teneur en eau varie inversement avec la densité des grains solides.

Ces corrélations sont assez lâches mais mettent bien en évidence une zone critique ($W\% > 500 \%$, $G < 1,65$) où l'on a ce que l'on appelle des "tourbes franches" et où les corrélations de toutes sortes deviennent très floues.

Pour la tourbe de Bourgoin, les faibles variations de la teneur en eau ne permettent pas de faire une étude statistique.

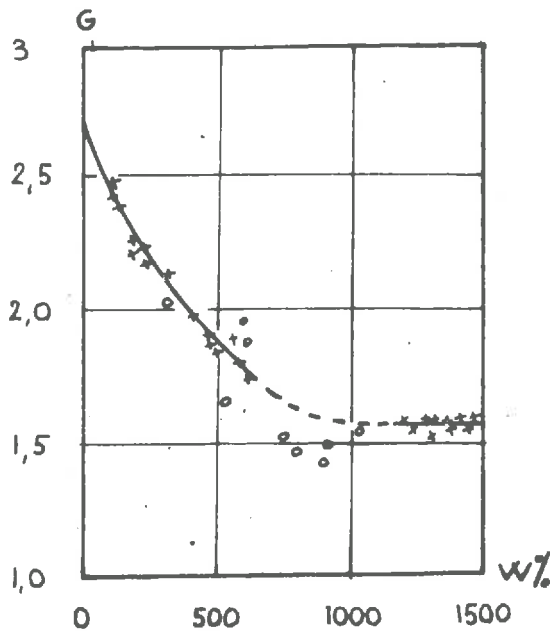
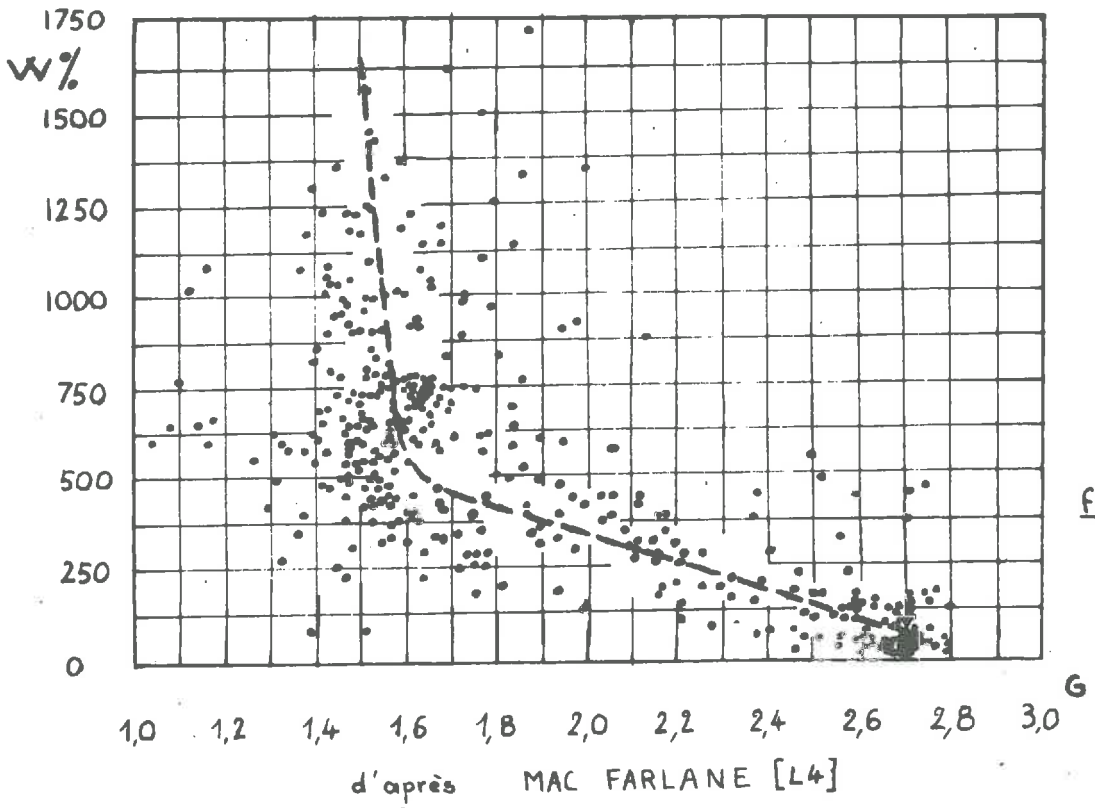
2.3. POIDS SPECIFIQUE DU SOL γ

La plupart du temps, comme la tourbe contient une énorme proportion d'eau, le poids spécifique du sol en place est voisin de 1 g/cm³ (de 0,9 g/cm³ à 1,1 g/cm³). On peut parfois rencontrer des tourbes à mousses où $\gamma = 0,4$ g/cm³ et des tourbes amorphes où $\gamma = 1,2$ g/cm³. Quand on obtient des valeurs plus fortes, cela indique que la contamination minérale est importante.

2.4. POIDS SPECIFIQUE DU SOL SEC.

A cause de la grande teneur en eau, il est toujours très faible (de 0,04 g/cm³ à 0,15 g/cm³) ; des valeurs supérieures à 0,2 g/cm³ indiquent une présence non négligeable de minéraux.

CORRELATIONS entre la DENSITE des GRAINS SOLIDES G et la TEN
 EN EAU pour des TOURBES du CANADA



2.5. TABLEAU DE DIFFERENTES VALEURS DES POIDS.

Le Tableau n° 3, page 43, rapporte des valeurs indiquées par différents auteurs. On voit ainsi que la nature de la tourbe joue un rôle essentiel.

3. METHODES QUALITATIVES D'IDENTIFICATION ET DE CLASSIFICATION DES TOURBES.

3.1. INTRODUCTION.

Il existe une très grande variété de tourbes et de tourbières, aussi est-il nécessaire de les classer.

De façon générale, un système de classification se développe sur une base et s'élargit en vue d'un but déterminé. Pour la tourbe, la difficulté vient de ce qu'il est délicat de trouver une base unique ; de plus, la diversité des utilisations (agriculture, arboriculture, construction, industrie ...) crée des buts très différents. Ainsi de nombreux systèmes ont vu le jour. La plupart ont une base botanique, ce qui les rend difficilement exploitables pour un ingénieur car ils sont compliqués, purement qualitatifs et souvent adaptés à des conditions locales.

Les bases des systèmes sont les suivantes :

- le terrain sur lequel la tourbe est formée,
- les caractéristiques de surface du dépôt tourbeux,
- la végétation superficielle existante,

- les restes des plantes composant la tourbe,
- les utilisations possibles du dépôt,
- les propriétés physiques et chimiques de la tourbe,
- la situation géographique.

Pour l'ingénieur de Génie Civil, il est intéressant de connaître :

- la capacité portante,
- les déformations sous contraintes,
- les conditions de drainage.

Ces facteurs sont déterminés par la topographie du site, son histoire, la végétation environnante, la taille du dépôt et les propriétés physiques de la tourbe (σ_v , K , E , τ). Un système de classification satisfaisant doit donc faire intervenir ces paramètres, être simple et précis. Ce système n'existe pas, ce qui fait qu'aucune classification universelle n'est adoptée.

3.2. APERÇU SUR LES CLASSIFICATIONS QUALITATIVES A BASE BOTANIQUE.

La nature et l'origine de la tourbe peuvent conduire naturellement à de tels systèmes. Ils se révèlent très insuffisants pour le Mécanicien des Sols.

3.2.1. Systèmes simples.

=====

Ils ont une valeur purement locale. SMITH S6 (G.B) adopte, par exemple, un système basé sur la topographie du site pour décrire les marais tourbeux.

3.2.2. Systèmes généraux.

Ils distinguent trois groupes généraux :

- tourbes sédimentaires ou molles,
- tourbes fibreuses,
- tourbes ligneuses,

avec, selon les auteurs, POTONIE 1906 P7 (D), SOPER S7 (1922 U.S.A.), HOLMSEN H 15 (1923 N) ... des sous-groupes où sont distinguées les origines des tourbes, les différentes plantes fossilisées...

On peut citer en particulier l'échelle de VON POST P6 (1926 Suède) qui est assez utilisée dans les pays nordiques et même recommandée par le Canadien FLAATE F4 . Elle est basée sur le degré de décomposition de la tourbe : 10 degrés différents (cf. Tableau n° 4 page 44).

3.2.3. Systèmes récents.

Dans les travaux récents, on peut principalement noter RADFORTH R1 . Le système développé par lui est très employé au Canada, mais n'a pas eu un développement universel car il est compliqué et donne peu de renseignements sur les propriétés mécaniques.

3.2.31. Bases du système de RADFORTH.

L'auteur part de la constatation suivante :

En général, la surface des tourbières (Moskeg au Canada) est constituée d'une couche vivante (mousses, laïches, herbes, arbustes, arbres...). Sous cette surface apparaît un mélange de matériaux organiques partiellement décomposés et désagrégés : la tourbe. On a d'abord pensé qu'il n'existait pas de rapport constant entre tous ces éléments, mais une analyse des pollens, des spores et des cuticules fossilisées dans diverses tourbières canadiennes, a prouvé le contraire.

A partir de cela, en s'appuyant sur trois constatations fondamentales :

- la végétation superficielle,
- la topographie du site,
- la composition et la structure du sous-sol,

RADFORTH a donné une base à un système descriptif.

3.2.32. Description du système de RADFORTH.

• La végétation superficielle.

On précise en premier ce facteur qui est le plus facile à observer. On distingue neuf classes (de A à I) qui sont précisées sur le Tableau n° 5 page 45 .

Les classes pures existent rarement. Une description complète ne comporte pas plus de trois lettres, chaque lettre représentant une superficie au moins égale à 25 % de la tourbière. Les lettres sont placées par ordre d'importance décroissante.

. Topographie du site.

On distingue seize formes de topographies (de a à p) décrites dans le Tableau n° 6 page 46 . Ces irrégularités sont intimement liées au sous-sol. Les variations de topographie proviennent parfois d'irrégularités dans les sous-couches minérales, mais elles sont le plus souvent dues aux changements de structure du matériau organique lui-même.

. Composition et structure du sous-sol.

On définit, à partir de multiples observations, seize catégories (1 à 16) décrites dans le Tableau n° 7 page 47 . On a grossièrement trois types :

- amorphe granulaire,
- fibres fines ligneuses ou pas,
- fibres grossières.

3.2.33. Conclusion.

La classification de RADFORTH, modifiée et complétée, s'utilise souvent pour les reconnaissances aériennes des vastes tourbières canadiennes. Dans ce cas, on cherche surtout la possibilité d'accès. Aussi certains auteurs, comme BRIDCUT, proposent d'ajouter des données sur la perméabilité, afin de mieux connaître les possibilités du sol vis-à-vis des véhicules tous terrains.

3.2.4. Systèmes purement botaniques.

Ces classifications s'effectuent en analysant les spores, les pollens et les cuticules. FEUSTEL et BYERS F2 , VANZINDEREN BAKKER V 1 et récemment STEWART S9 ont ainsi procédé. Ces systèmes sont très difficiles à utiliser pour des ingénieurs.

3.2.5. Travaux nouveaux.

=====

MAC FARLANE (1966) P9 propose que la structure de la tourbe devienne une base générale pour une classification de ce matériau, sec aussi bien qu'humide. Par structure il entend l'arrangement des constituants microscopiques et macroscopiques. Il fait suite à l'étude du Japonais OHIRA (1962) O 1 qui s'intéressait surtout à la nature et à la quantité des espaces interstitiels.

Pour MAC FARLANE, le grand intérêt de ce genre d'étude provient du fait que les composants principaux des tourbes peuvent se réduire à peu d'entités structurales, qui peuvent être évaluées quantitativement.

Malheureusement, comme pour les autres systèmes, on manque d'expériences très vastes pour relier le qualitatif au quantitatif.

Il n'existe donc pas à l'heure actuelle un système de classification des tourbes universellement adopté, analogue à l'analyse granulométrique pour les sols classiques.

--:--:--

CARACTERISTIQUES PHYSIQUES ET CHIMIQUES
DE LA TOURBE DE BOURGOIN (ISERE)

TABLEAU n° 1

W%	MO%	PF%	pH	δ_s g/cm ³
621	52,6	86,2	6,42	1,425
649	65	84,7	6,08	1,46
592	71	84,1	5,62	1,54
598	59,5	86,0	6,23	1,55
512	64,6	82,5	6,0	1,55
682	51,6	68,05	6,08	1,41
601	55,2	65,85	5,72	1,42
576	50,7	64,75	5,68	1,56
428	42,8	67,55	6,02	1,50
740	53,8	76	5,62	1,27
668	61,0	64,9	5,01	1,46
600	58,2	70,2	5,02	1,35
532	46	74,3	5,46	1,34
635	5,58	70,0	4,74	1,31
689	57,0	66,4	5,47	1,44
675	47,2	67	4,82	1,47
649	61,0	60,1	7,16	1,33

W%	MO%	PF%	pH	δ_s g/cm ³
654	63	70,5	6,96	1,53
627	58,5	60,8	7,09	1,48
460	69	85,9	7,04	1,33
295	60	63,5	6,94	1,59
-	75,0	87,5	5,5	1,48
646	73	82	5,0	1,53
549	70	87,4	5,0	1,47
576	73	87,5	5,0	1,48
-	76,5	86,5	5,5	1,48
630	79	87,5	5,5	1,47
441	76,5	86,5	5,5	1,48
518	68,5	86	6,2	1,49
-	70	86,5	5,2	1,47
-	70,9	86,9	7,2	1,48
-	73,4	89	5,45	1,46
-	65,4	75,9	5,20	1,57

TOURBE DE BOURGOIN

Valeurs de γ_s selon le mode de détermination

TABLEAU n° 2

 γ_s en g/cm³

γ_s Fetra	γ_s Cook PF	γ_s Cook MO	γ_s Miyokawa	γ_s Fetra	γ_s Cook PF	γ_s Cook MO	γ_s Miyokawa
1,425	1,67	2,01	1,3	1,53	1,85	1,94	1,43
1,46	1,68	1,92	1,31	1,48	1,97	1,99	1,52
1,54	1,69	1,85	1,31	1,33	1,67	1,87	1,30
1,55	1,67	1,99	1,30	1,59	1,94	1,98	1,49
1,55	1,71	1,93	1,32	1,48	1,65	1,80	1,29
1,41	1,88	2,08	1,45	1,53	1,72	1,82	1,33
1,42	1,91	2,04	1,47	1,47	1,65	1,86	1,29
1,56	1,92	2,09	1,48	1,48	1,64	1,82	1,29
1,50	1,89	2,18	1,45	1,48	1,66	1,78	1,29
1,27	1,79	2,05	1,38	1,47	1,65	1,75	1,29
1,46	1,82	1,97	1,48	1,48	1,66	1,78	1,29
1,35	1,76	2,00	1,43	1,49	1,67	1,88	1,30
1,34	1,71	2,15	1,39	1,47	1,66	1,86	1,29
1,31	1,76	2,03	1,43	1,48	1,65	1,85	1,29
1,44	1,80	2,02	1,46	1,46	1,63	1,82	1,28
1,47	1,90	2,13	1,46	1,57	1,79	1,91	1,38
1,33	1,98	1,97	1,53	moy 1,46	1,76		1,37
				écart type 0,09	0,11		0,08

TABLEAU n° 3

AUTEURS	χ g/cm ³	δ_d g/cm ³	G	W%	% cendres	MO%	TYPE DE TOURBE
MAC FARLANE [M4]	0,64 à 1,01	0,04 à 0,14	1,45 à 1,80	400 à 1100	4,9 à 13,7	-	Tourbe amorphe granulaire Canadienne
FEUSTEL et BYERS [F2]	0,486 1,158	0,14 0,90	1,588 1,557	- -	- -	- -	Tourbe à sphaignes Tourbe de forêts de cèdres blancs, très compacte
MICKIEBOROUGH [M15]	0,95 à 1,25	0,047 à 0,090	-	480 à 144	-	-	Tourbe finement fibreuse avec parfois des passages de tourbe amorphe granulaire
HANRAHAN [H4]	0,95 à 1,03	0,064 à 0,130	1,1 à 1,8	> 1000	-	-	Tourbe d'Irlande décomposée
GUSEVA [G9]	0,70 à 0,74	0,27 à 0,29	1,07	164 à 178	-	-	Tourbe Russe fortement contaminée
FARNHAN [M4]	0,4 0,6 0,7 0,9 1,1	- - - - -	- - - - -	- - - - -	- - - - -	- - - - -	Tourbe à mousses " ligneuse " à herbes " aquatique " désagrégée
THOMSON ET PALMER [T8]	0,955 à 1,13	0,232 à 0,333	1,79 à 2,03	- -	- -	- -	Tourbe parfois très contami- née
	0,92	0,15	1,46	587	2,3	65	Tourbe de Bourgoin. Valeurs moyennes

TABLEAU N° 4 P 6

DEGRE DE DECOMPOSITION : ECHELLE DE VON POST

Degré de décomposition d'après l'échelle de VON POST	Description pour l'identification
H1	Tourbe absolument pas décomposée, non boueuse. Pressée dans la main, elle donne une eau très claire.
H2	Tourbe pratiquement pas décomposée, très peu boueuse. Pressée dans la main, elle donne une eau très peu colorée.
H3	Tourbe peu décomposée, légèrement boueuse. Pressée dans la main, elle donne une eau colorée par la boue. La pâte tourbeuse ne passe pas à travers les doigts. Le résidu n'est pas épais.
H4	Tourbe mal décomposée, localement boueuse. Pressée dans la main, elle donne une eau fortement colorée par la boue. Le résidu est localement épais.
H5	Tourbe assez bien décomposée, plutôt boueuse. La structure originelle est assez visible, parfois détruite. Pressée dans la main, la pâte tourbeuse passe un peu à travers les doigts, mais on a surtout une eau boueuse. Le résidu est très épais.
H6	Tourbe assez bien décomposée, plutôt boueuse. La structure* est assez visible, difficile à reconnaître. Pressée dans la main, 1/3 de la pâte tourbeuse passe à travers les doigts. Le résidu est très épais et la structure originelle y est plus marquée qu'à l'état initial. * originelle
H7	Tourbe assez bien décomposée, boueuse. La structure originelle est juste visible. Pressée dans la main, 1/2 de pâte tourbeuse passe à travers les doigts. Le résidu a la consistance d'une bouillie.
H8	Tourbe assez bien décomposée, très boueuse. La structure originelle est à peine visible. Pressée dans la main, 2/3 de pâte tourbeuse passent à travers les doigts. Le résidu est surtout formé de fibres résistantes et de racines. * on a une eau très épaisse
H9	Tourbe presque décomposée, très boueuse. La structure originelle n'est pas apparente. Pressée dans la main, presque toute la pâte tourbeuse passe à travers les doigts, sous forme d'un liquide consistant analogue à de la bouillie.
H10	Tourbe totalement décomposée, essentiellement boueuse. La structure originelle n'est pas apparente. Pressée dans la main, toute la pâte passe à travers les doigts.

TABLEAU N° 5 R 1

LES NEUF CLASSES DE LA VEGETATION SUPERFICIELLE

N° de la classe	Emboisement	Hauteur approximative	Texture (si nécessaire)	Forme de la végétation	Exemple
A	boisé	$\geq 4,50$ m		arbres	Sapin-Mélèze
B	boisé	comprise entre 1,50 m et 4,50 m		arbres jeunes ou nains ou buissons	Sapin-Mélèze Saule-Bouleau
C	non boisé	comprise entre 0,60 m et 1,50 m		hautes herbes	herbe
D	boisé	≤ 60 cm		hauts arbustes ou arbres très petits	Saule-Bouleau Thé du Labrador
E	boisé	≤ 60 cm		petits arbustes	Laurier
F	non boisé	≤ 60 cm		masses, bouquets, petites superficies herbeuses quelquefois adjacentes	Laîche
G	non boisé	≤ 60 cm		seul ou en association lâche	Orchidée
H	non boisé	≤ 10 cm	de souple à	le plus souvent en masses continues	Lichen
I	non boisé	≤ 10 cm	tendre ou veloutée	souvent en masses continues, quelquefois en monticules	Mousse

TABLEAU N° 6 R1

ASPECTS TOPOGRAPHIQUES

Classifi- cation	Aspect	Description
a	monticule	comprend la "touffe" et la "tête-de-nègre" à bords verticaux, se présente sous forme de plusieurs ou de nombreuses petites superficies
b	butte	à sommet arrondi, souvent elliptique ou en forme de croissant (vue de dessus)
c	crête	comparable à la butte mais étendue souvent irrégulière et en grand nombre ; végétation souvent plus grossière sur un côté
d	plaine de graviers et de rochers	vastes superficies
e	barrière de gravier	"esters" et anciennes plages (surélevées)
f	enceinte rocheuse	roches erratiques groupées, recouvertes de dépôts organiques
g	roches erratiques visibles	interrompant le dépôt organique
h	roches erratiques cachées	recouvertes par le dépôt organique
i	plateau tourbeux (horizontal)	habituellement étendu et présentant une élévation brutale.
j	plateau tourbeux (irrégulier)	souvent boisé, localisé et très contourné
k	étant remblayé	par des débris organiques, souvent recouverts de végétation
l	étang apparent	où l'eau apparaît au-dessus des débris organiques
m	bord d'étang ou de lac	(abrupt)
n	bord d'étang ou de lac	(pentu)
o	polygones dispersés	formant une dépression périphérique
p	polygones jointifs	formés par des fissurations du terrain organique

TABLEAU N° 7 R1

L E S O U S - S O L

Caractéristique principal	Catégorie	Dénomination
Tourbe amorphe-granulaire	1	Tourbe amorphe - granulaire
	2	Tourbe non ligneuse et finement fibreuse *
	3	Tourbe amorphe-granulaire contenant des fibres fines non ligneuses
	4	Tourbe amorphe-granulaire contenant des fibres fines et ligneuses.
	5	Tourbe essentiellement amorphe-granulaire, comprenant de fines fibres non ligneuses, au sein d'un squelette ligneux et finement fibreux
	6	Tourbe essentiellement amorphe-granulaire comprenant des fibres fines et ligneuses, au sein d'un squelette à grosses fibres **
	7	Couches successives de tourbe finement fibreuse et de tourbe amorphe-granulaire contenant des fibres fines non ligneuses
Tourbe finement fibreuse	8	Tourbe non ligneuse et finement fibreuse contenant des amas de grosses fibres.
	9	Tourbe ligneuse et finement fibreuse contenue dans un squelette ligneux et à grosses fibres
	10	Particules ligneuses contenues dans une tourbe non ligneuse et finement fibreuse
	11	Particules ligneuses et non ligneuses contenues dans une tourbe finement fibreuse
	12	Tourbe ligneuse et à grosses fibres
	13	Grosses fibres traversant une tourbe finement fibreuse criss-crossing
	14	Tourbe finement fibreuse ligneuse et non ligneuse contenue dans un squelette à grosses fibres
Tourbes à grosses fibres	15	Tamis ligneux de fibres et particules contenant une tourbe amorphe-granulaire à fibres fines
	16	Tourbe ligneuse, à grosses fibres contenant des éléments ligneux éparpillés.

* Les fibres fines sont celles de diamètre inférieur à 1 mm

** Les grosses fibres sont celles de diamètre supérieur à 1 mm

C H A P I T R E . . . I I I
=====

RESISTANCE AU CISAILLEMENT

Pour la tourbe, sa détermination est difficile car le matériau est polyphasique, hétérogène et anisotrope.

1. DETERMINATION DE LA RESISTANCE AU CISAILLEMENT.

On applique les méthodes usuelles de la Mécanique des Sols. Elles sont très discutées, car des facteurs spécifiques à la tourbe interviennent de façon prépondérante:

- . la texture,
- . la grande teneur en eau,
- . la forte perméabilité,
- . la teneur en sol minéral.

A ces facteurs s'ajoutent pour les essais de laboratoire, le problème, particulièrement aigu pour les sols organiques, de la qualité de l'échantillon et de sa représentativité, et la difficulté d'interprétation du fait que l'on crée un tenseur de déformation et de contrainte non homogène pour les essais "in situ".

1.1. METHODES "IN_SITU".

1.1.1. Essai de pénétration.

=====

Les Russes, avec le pénétromètre à billes de N.A. TSITOVITCH, utilisent largement cet essai que les autres chercheurs ne pratiquent pas, considérant qu'il est difficile à exécuter et à interpréter.

1.1.2. Essai au scissomètre (Vane test).

=====

1.1.21. Principe et généralités.

Né pour être utilisé dans les argiles, cet essai a été adopté pour les tourbes. Nous rappellerons brièvement les hypothèses faites pour cet appareil et la formule permettant l'interprétation.

- La surface de rupture est un cylindre dont le diamètre est celui du scissomètre,
- La répartition des contraintes est supposée uniforme tant sur la surface latérale que sur les surfaces extrêmes,
- L'essai se fait sous drainage,
- Les frottements parasites sont négligés

si :

M est le couple maximum appliqué

H la hauteur de l'appareil

D le diamètre

$$n = \frac{H}{D}$$

= la résistance maximale au cisaillement non drainé

$$\tau = \frac{M}{(3n+1) \cdot \pi \cdot D^3}$$

1.1.22. Mode opératoire.

La méthode utilisée est classique, mais les caractéristiques du scissomètre lui-même posent un problème pour la tourbe.

-Influence de la vitesse de cisaillement.

La vitesse couramment utilisée est 6°/mn. Toutefois, de nombreux auteurs citent des essais effectués plus vite.

Il semble que τ mesuré croisse si l'on augmente la vitesse de cisaillement, et ceci d'autant plus que la tourbe est plus fibreuse. HARDY et TROMSON H 11 citent des écarts de 15 % à 20 % pour des essais sur un matériau fibreux selon que l'on opère lentement ou vite. Par contre, HANRAHAN et WALSH H 8 ont de faibles écarts sur un matériau amorphe, remanié.

Des essais nombreux et précis sur la tourbe noire, amorphe de Bourgoin font ressortir que la résistance au cisaillement croît faiblement avec la vitesse de rotation (cf. figure n° 8, page 52).

-Influence des dimensions du scissomètre.

CADLING et ODENSTAD C 1 ,dans de l'argile, trouvent que les dimensions des pales n'interviennent pas. On utilise généralement un appareil où $\frac{h}{D} \approx 2$, car si l'on augmente D , on augmente l'influence des faces extrêmes sur lesquelles la répartition de contraintes est indéterminée, et si on le diminue l'échantillon devient trop mince pour qu'entre autres l'hypothèse du non drainage soit vérifiée.

Quand on porte les valeurs de la résistance au cisaillement en fonction des différents diamètres des scissomètres utilisés (figure n° 9 page 53), on s'aperçoit que τ mesuré décroît fortement avec D , et ceci d'autant plus que la tourbe est plus fibreuse.

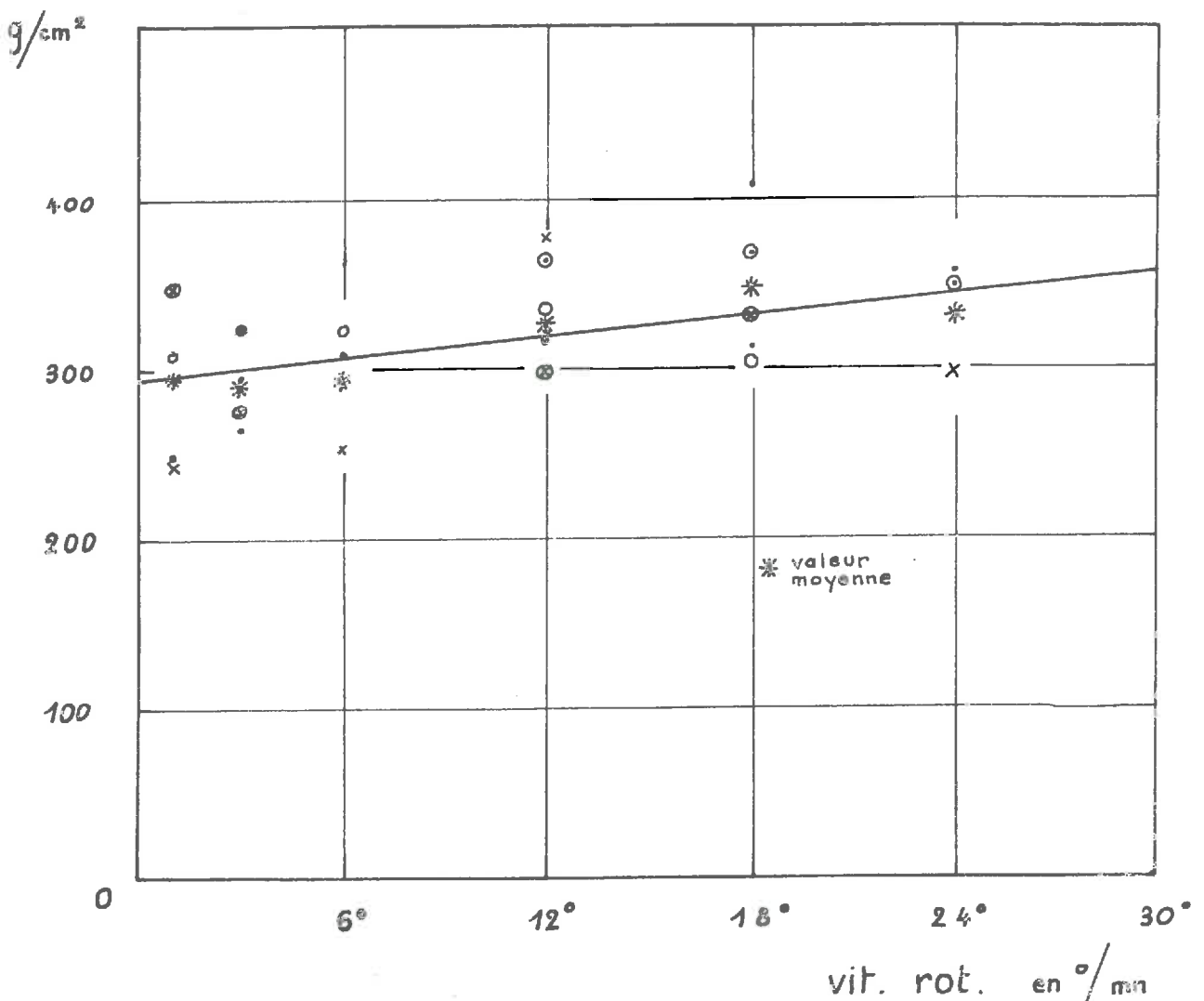
On peut essayer de donner plusieurs raisons à ce phénomène :

INFLUENCE de la VITESSE de ROTATION du SCISSOMETRE sur τ_{max}

Essais effectués sur la tourbe
noire de Bourgoin [P5]
avec un scissomètre à 4 pales H 214 mm
D 100 mm

caractéristiques moyennes de la tourbe
M.O% 65 PF% 77 w% 590 G 1,46

fig 8

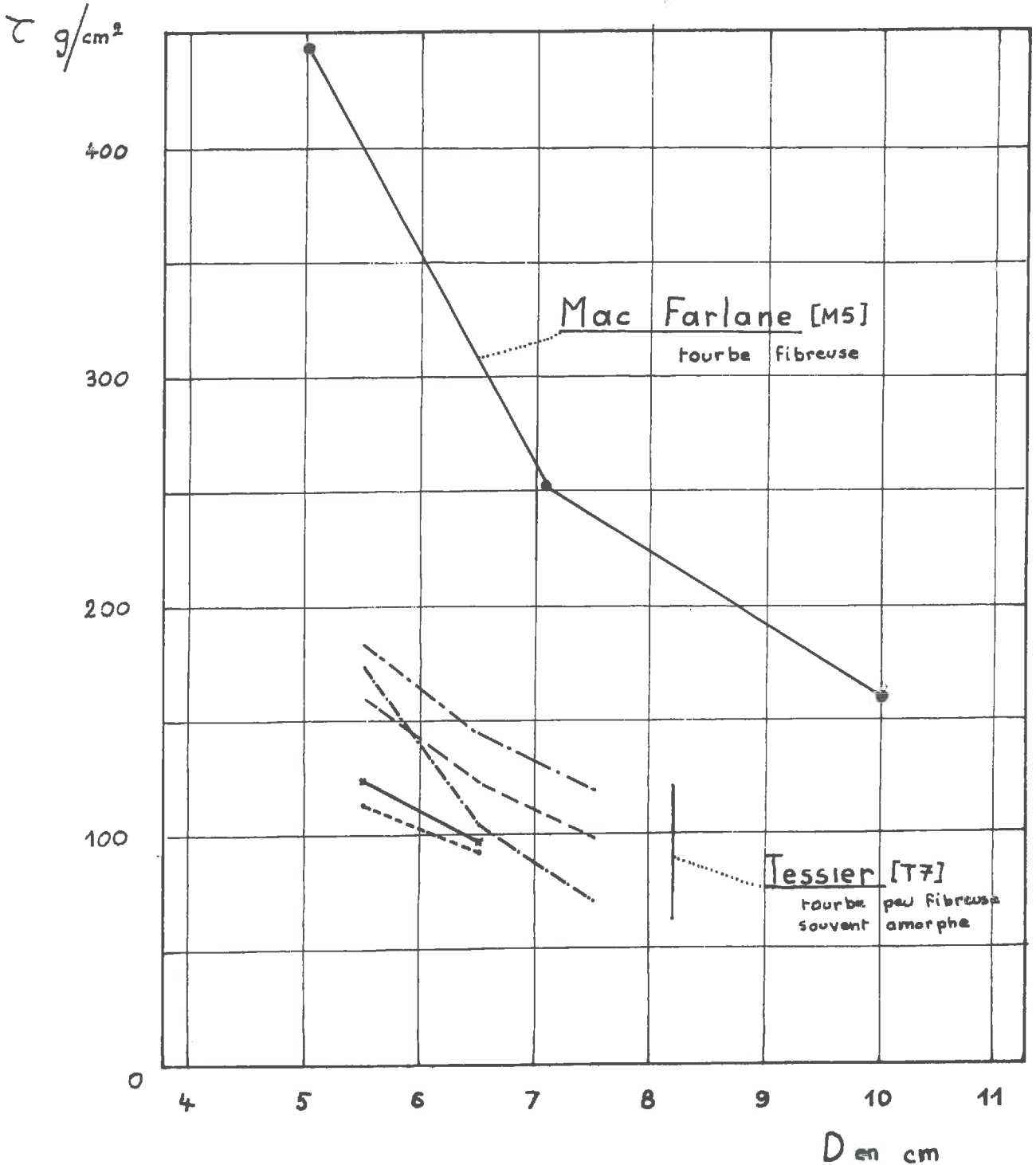


INFLUENCE du DIAMÈTRE du SCISSOME

sur τ_{max}

Essais pour $H/D = 2$
sur tourbe du Canada

fig 9



Tout d'abord, la nature fibreuse de la tourbe. Ce paramètre est étudié en détail dans le paragraphe suivant.

D'autre part, plus l'échantillon est grand, plus le drainage de l'eau est difficile. On mesure donc avec un petit scissomètre un τ plus drainé qu'avec un grand scissomètre, donc un τ de valeur plus importante.

En outre, les frottements parasites (sur la tige de l'appareil par exemple) sont proportionnellement plus forts pour un petit diamètre que pour un grand. Cela tend également à faire accroître le τ mesuré.

Pour finir, plus le scissomètre est petit, plus sa surface en coupe est grande par rapport à la section du cylindre. Ainsi quand on l'enfonce dans le sol il va surconsolider la zone de l'essai de façon plus importante que ne le fait un grand appareil. Comme nous le verrons plus loin, τ , pour la tourbe, croît très vite avec une pression de consolidation, et le τ mesuré sera aussi plus fort pour un faible diamètre que pour un grand.

Cherchons maintenant quelle taille de scissomètre est la meilleure. RIPLEY et LEONOFF R13 avec un appareil de $D = 6,3$ cm, mesurent un τ au vane double du τ mesuré avec d'autres méthodes (analyse de la stabilité, par exemple). ANDERSON et HEMSTOCK A7 avec $D = 11,5$ cm ont par contre une mesure de τ identique au scissomètre et par d'autres méthodes (analyse de la stabilité). A Bourgoin, différents essais de laboratoire, triaxiaux non drainés, compression simple..., donnent une résistance au cisaillement voisine de celle trouvée "in situ" avec un vane de $D = 100$ mm.

Ainsi on peut estimer que la taille optimale à adopter es

D = 10 cm

H = 20 cm

Si l'on est au-dessus de ces valeurs, les résultats restent voisins, mais si l'on est en dessous il faudra tenir compte d'un important facteur correctif sous peine de surévaluer la valeur de la résistance au cisaillement.

-Influence du nombre de palettes.

Une étude de HELENELUND V 12 montre un phénomène très particulier. Des essais scissométriques effectués sur une tourbe fibreuse avec un appareil muni de 2, 3, 4 et 6 lames, ont donné des courbes effort-déformation où au moins deux valeurs maximales purent être relevées -(cf. figure 10 page 50)-. La déformation correspondant à l'écart de deux maximum est sensiblement égale à l'angle fait par deux lames consécutives.

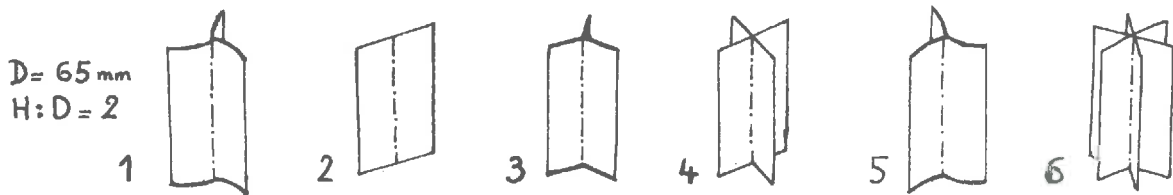
Ceci tend à prouver que la rotation du scissomètre ne crée pas uniquement une rupture par cisaillement sur la périphérie de l'appareil, mais aussi une flexion qui tend à faire replier les fibres vers l'extérieur. On a ainsi, l'auteur dit l'avoir vérifié expérimentalement, une partie comprimée entre les palettes et tendue à l'extérieur de celles-ci. Quand on a tourné de l'angle de deux palettes on se retrouve dans la position initiale et le phénomène de flexion est à ce moment nul. Au fur et à mesure que l'on tourne cela se reproduit jusqu'à ce que les fibres soient brisées et on mesure alors la résistance au cisaillement du sol remanié.

ESSAIS SCISSOMETRIQUES SUR ⁶⁰UNE TOURBE A SPHAINES FIBREUSE DE FINLANDE (Helena Lund 1966) [H 12]

w% de 950 à 1050

pH = 4,3

$\delta = 0,97 \text{ t/m}^3$



Différents genres de scissomètre employés pour les essais sur la tourbe

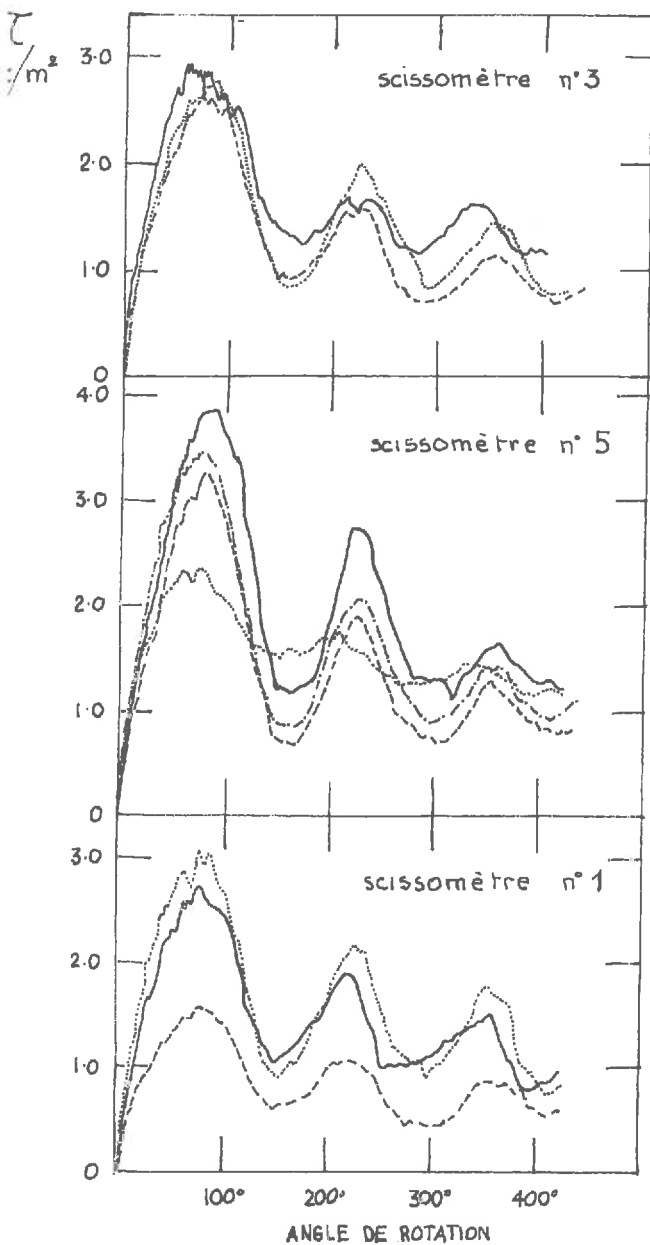
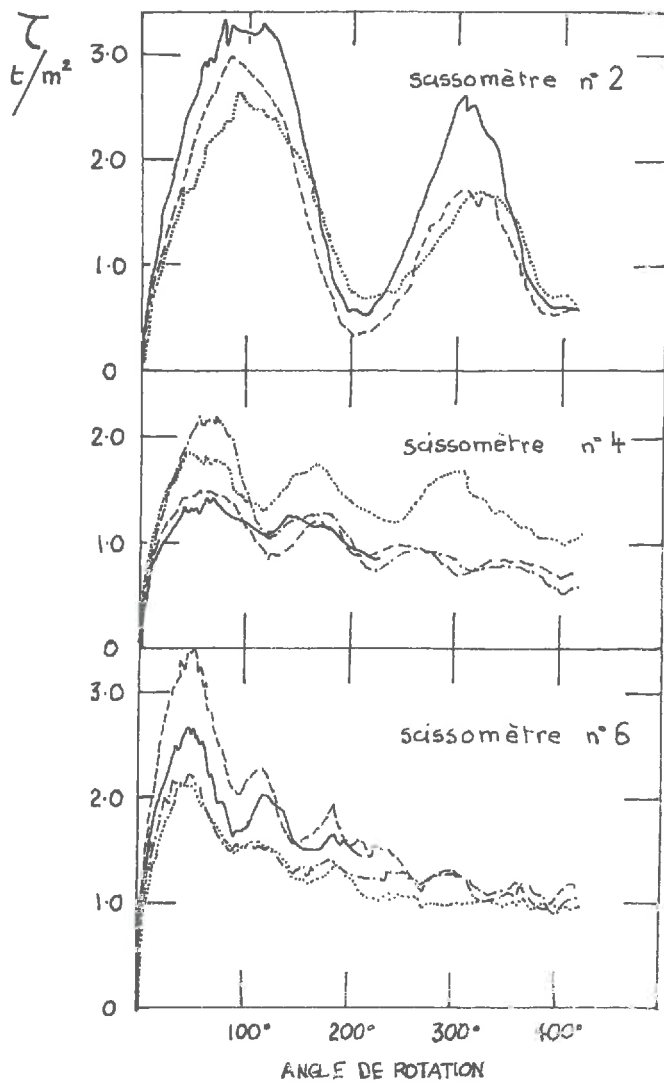


fig 10



Il semble donc que la résistance au cisaillement d'une tourbe fibreuse dépende non seulement du frottement interne des fibres, mais aussi de leur nombre et de leur résistance propre. Si la tourbe est peu fibreuse ou amorphe (Bourgoin par exemple), ce phénomène de pics successifs est moins net. On l'a constaté sur la tourbe de Bourgoin.

Prendre pour τ en place le pic maximum est une erreur souvent commise, ce qui explique que les mesures au scissomètre donnent souvent des valeurs plus grandes que celles obtenues par d'autres moyens.

1.1.23. Réflexions et conclusions.

La valeur de τ mesurée au scissomètre semble donc peu sûre ; on vient de voir que les raisons de cette insécurité tendent presque toutes à surestimer la résistance au cisaillement en place.

Si l'on reprend les hypothèses fondamentales du calcul de l'essai au vane, on s'aperçoit qu'elles sont toutes erronées pour la tourbe :

- La surface de rupture n'est pas un cylindre, particulièrement pour les tourbes fibreuses,
- La répartition des contraintes n'est vraisemblablement pas uniforme à cause des grandes hétérogénéité et anisotropie du matériau,
- L'essai est fortement drainé car la tourbe est très perméable,
- Les frottements parasites jouent un rôle, surtout pour les appareils de petit diamètre.

Ainsi donc, si l'expérience montre que l'on peut déduire τ d'un essai scissométrique (D = 10 cm H = 20 cm), c'est presque par hasard. Il n'est pas évident, en outre, que les conditions qui sont bonnes pour une tourbe amorphe le soient pour une tourbe fibreuse. C'est donc avec une certaine justesse que des auteurs comme LEA L3 affirment que le vane test a surtout une valeur qualitative pour la tourbe.

1.1.24. Valeur de la résistance au cisaillement du sol remanié.

Pour déterminer cette valeur, on opère comme pour l'argile : on effectue quatre tours, on laisse reposer un minute et on fait la mesure. On obtient des résultats de l'ordre du tiers ou de la moitié des valeurs "non remaniées". Souvent on tient compte uniquement de cette valeur pour des calculs de stabilité. Les explications données plus haut sur la surestimation de τ non remanié justifient en partie cette méthode.

1.2. METHODES DE LABORATOIRE.

1.2.1. Généralités.

=====

Habituellement, le procédé le plus précis pour déterminer la résistance au cisaillement d'un sol est de prélever des échantillons non remaniés et de leur faire subir un certain nombre d'essais.

Pour la tourbe, le problème est complexe :

- Il est difficile, sinon impossible, d'avoir des échantillons intacts, quel que soit le procédé de carottage utilisé. Ceci tient au fait que la tourbe est de nature fibreuse, qu'on rencontre parfois des racines ou des morceaux de bois, et que la très grande compressibilité du matériau entraîne une consolidation durant la prise d'échantillon.

- L'anisotropie et l'hétérogénéité de la tourbe font que le problème de la représentativité prend une importance capitale. Les propriétés de deux carottes voisines et à première vue presque identiques, peuvent ^{être} notablement différentes.

- Tailler des échantillons pour faire les essais est délicat pour les mêmes raisons que celles indiquées pour le carottage.

- Pendant les essais, les déformations et distorsions sont très grandes, l'interprétation des résultats est donc difficile.

C'est un peu à juste titre que MAC FARLANE M5, parmi beaucoup d'autres, met en doute la validité des résultats obtenus au laboratoire, pour les sols tourbeux.

Toutefois, HANRAHAN et DUNNE H9 estiment qu'au point de vue qualitatif le fait de remanier un échantillon de tourbe ne change pas beaucoup ses propriétés car les valeurs relatives subsistent.

1.2.2. Essai de compression simple.

=====

On estime souvent que cet essai est inadapté car un drainage inconnu et important se produit durant la compression.

GOODMAN et LEE 67 mentionnent des essais ainsi effectués tout en notant que des hétérogénéités (morceaux de bois, racines) les ont obligés à recommencer de nombreuses fois.

C'est HANRAHAN H4,6 que a le plus utilisé ce mode opératoire. Pour des échantillons non consolidés, il constate un drainage très fort (W% passe de 920 à 575), une déformation très importante (l'échantillon passe de 8 cm de haut à 4 cm) et une rupture très difficile à estimer car aucun plan net n'apparaît. Alors qu'un essai non drainé (utilisation d'une capote) indique un τ presque nul pour une tourbe donnée, un essai de compression simple classique indique un $\tau = 200 \text{ g/cm}^2$ pour une déformation de 20 %, pour cette même tourbe.

Le même auteur fait une comparaison entre τ mesuré par un essai scissométrique de laboratoire et par un essai de compression simple.

Tourbe remaniée - W% = 800	
Essai au scissomètre :	Compression simple
1,3 x 1,3 cm	7,5 x 3,8 cm
$\tau_{\text{max}} = 110 \text{ g/cm}^2$	$\tau_{\text{max}} = 185 \text{ g/cm}^2$
pour une rotation de 50°	pour une déformation de
	1,3 cm

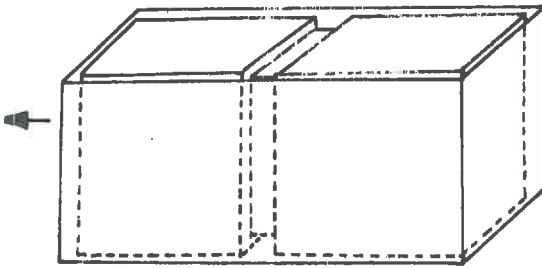
Le drainage, dans le second essai, est plus important que dans le premier car l'essai est plus lent. L'auteur explique ainsi la différence de résultat.

Il ressort donc que les conditions (drainage, déformation, rupture) de cet essai étant mal définies, il n'est pas très approprié pour la tourbe.

1.2.3. Essai de traction simple.

=====

Cet essai, non classique pour les sols, semble à HELENELUND H12 l'essai simple le plus correct. On le fait directement sur le lieu de prélèvement.



Un parallélépipède de tourbe (30x20x25cm) est fixé par des cloisons dans une boîte divisée en deux parties, dont l'une est mobile horizontalement. La section de l'échantillon à la limite des deux parties de la boîte est réduite de 2 cm pour éviter que la rupture ne se fasse au niveau des clous. Un anneau dynamométrique permet de déterminer la force que l'on exerce quand on tire la partie mobile. On procède aux essais en accroissant la force de traction de 2 Kg/mn.

L'avantage de cet essai est que le drainage est faible, ce qui fait qu'il semble assez bien adapté aux tourbes. Toutefois il manque des études diverses pour apprécier la valeur des résultats. Ceux de HELENELUND H12 sont figurés page 62. Il en résulte que ceux donnés par le scissomètre sont plus forts que ceux donnés par l'essai de traction simple. Entre autres explications on peut rappeler l'effet amplificateur du vane et le faible drainage occasionné par l'essai de traction.

RESISTANCE au CISAILLEMENT

VALEURS DONNEES par L'ESSAI de
TRACTION et par L'ESSAI SCISSOMETRIQUE

HELENELUND 1968 [H 12]

			ESSAI de TRACTION	ESSAI au SCISSOMETRE
PROVENANCE et CARACTERISTIQUES de la TOURBE ETUDIEE	PROFOND. (m)	CLASSE echelle Von Post	τ g/cm ² valeur moy. <small>le nombre d'essais effectués est par parenthèses</small>	τ g/cm ² valeur moy. <small>le nombre d'essais effectués est par parenthèses</small>
MER BLEUE (Ottawa) W% de 685 à 1168 γ de 0,89 à 0,98 g/cm ³ Tourbe à Sphaignes	0 - 0,2	H ₁	50 (5)	} 137 (7)
	0,2 - 0,4	H ₂	63 (29)	
	0,5 - 0,7	H ₃	88 (9)	
	0,7 - 0,9	H ₄	86 (4)	
	0,8 - 1,0	H ₅	78 (5)	
	1,0 - 1,2	H ₇	81 (3)	
ESPOO (Helsinki) W% de 950 à 1050 γ = 0,97 g/cm ³ Tourbe à Sphaignes	0,27 - 0,32	H ₁	30 (2)	150
	0,53 - 0,80	H ₃	56 (3)	
VESSÖ (Porvoo) Tourbe à Sphaignes	0 - 0,2	H ₁	52 (11)	

1.2.4. Essais au viscosimètre.

=====

Cet essai, peu courant dans les laboratoires de Mécanique des Sols, a été utilisé pour la tourbe, entre autres par LEUSSINK L9 , KZYWICKI et WILSON K8 .

LEUSSINK L9 utilise un viscosimètre à rotation. Un échantillon remanié de hauteur h et de rayon moyen r occupe l'espace annulaire entre un cylindre externe fixe de rayon r_1 et un cylindre interne coaxial tournant à la vitesse Ω et de rayon r_2 . Le moment M requis pour tourner le cylindre interne est donné par un moteur et mesuré électriquement. La résistance cisaillement τ est donnée par :

$$\tau = \frac{M}{2 \cdot \pi \cdot h} \cdot \frac{1}{r^2}$$

LEUSSINK obtient ainsi des résultats voisins de ceux donnés par des essais plus classiques. Toutefois, si pour une tourbe amorphe on conçoit que le fait d'opérer sur un échantillon totalement remanié n'est pas trop grave, il n'en est pas de même pour des tourbes fibreuses.

1.2.5. Essais triaxiaux.

=====

Peu d'essais triaxiaux ont été effectués sur la tourbe. Nous essayerons d'analyser pourquoi.

1.2.51. Résultats obtenus.

- Le Canadien ADAMS A2,4 a publié divers travaux présentés sur les figures 11, 12, 13 pages 64,65,66. Sur la première série d'essais on a :

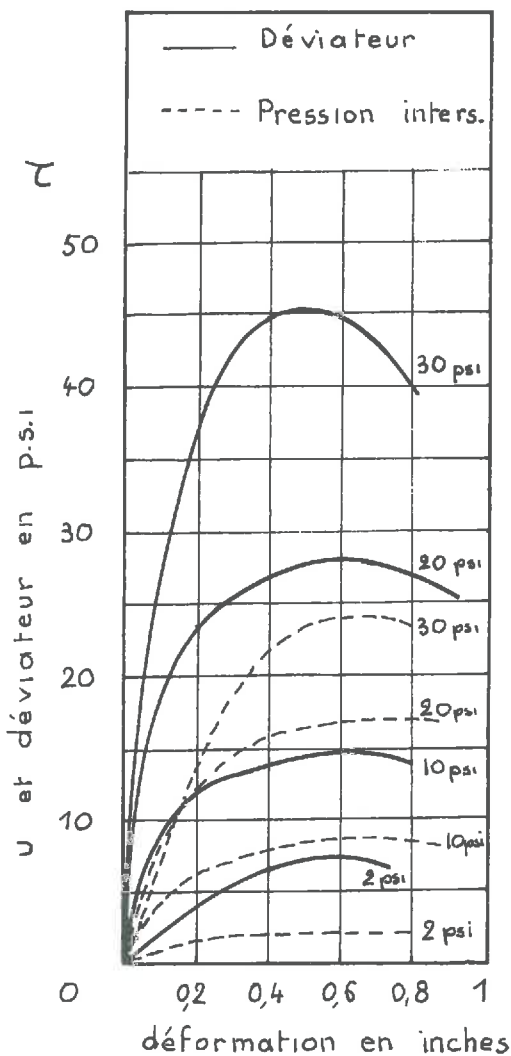
ESSAI TRIAXIAL NON DRAINE AVEC MESURE de u

ADAMS 1961 Tourbe du Canada [A2]
ligneuse - finement fibreuse

Echantillon non remanié 4,5 x 1,9 inches

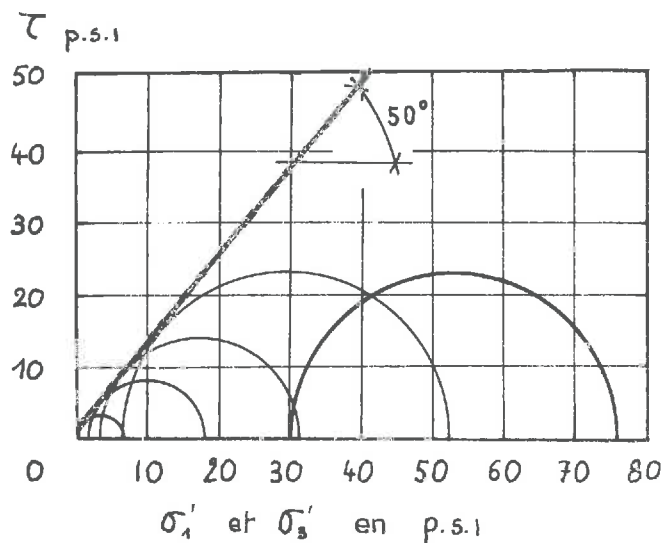
vitesse d'écrasement 0,012 cm mn

w% initial 400
pH 5,6
G 1,62
PF% de 77,5 à 88



COURBE EFFORT-DEFORMATION

fig 11



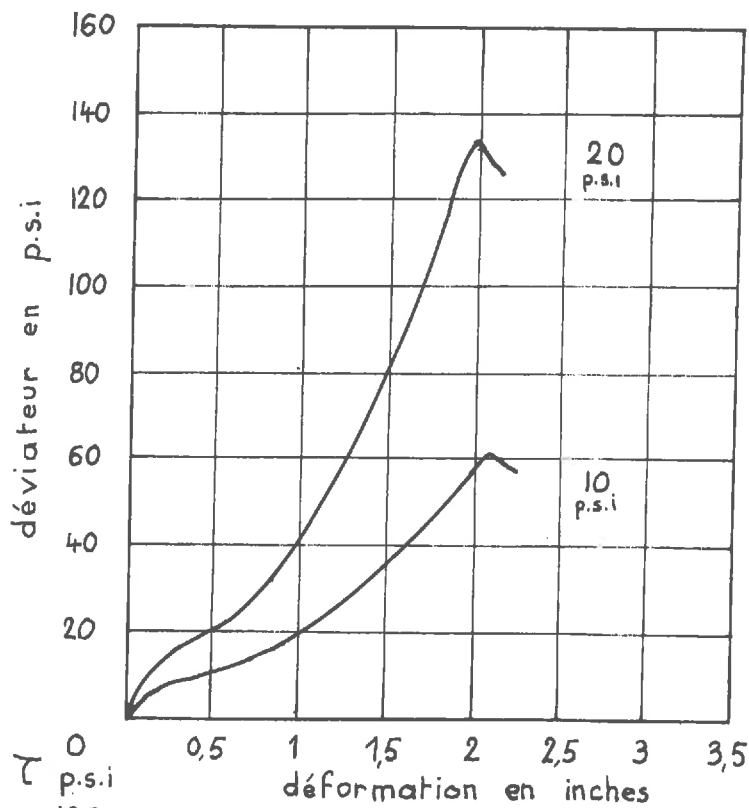
DROITE ENVELOPPE
DES CERCLES DE MOHR

ESSAI TRIAXIAL DRAINE

ADAMS 1961

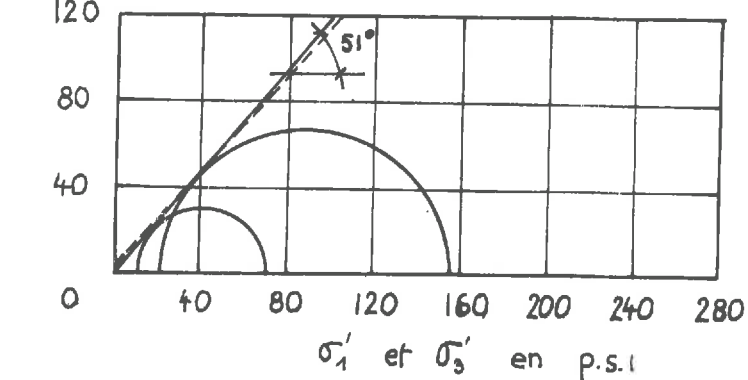
Tourbe du Canada [A2]
ligneuse - finement fibreuse
caractéristiques identiques
à l'essai non drainé précédent

Fig 12



COURBE
EFFORT
DEFORMATION

— enveloppe
pour essais
drainés
- - - enveloppe
pour essais
non drainés



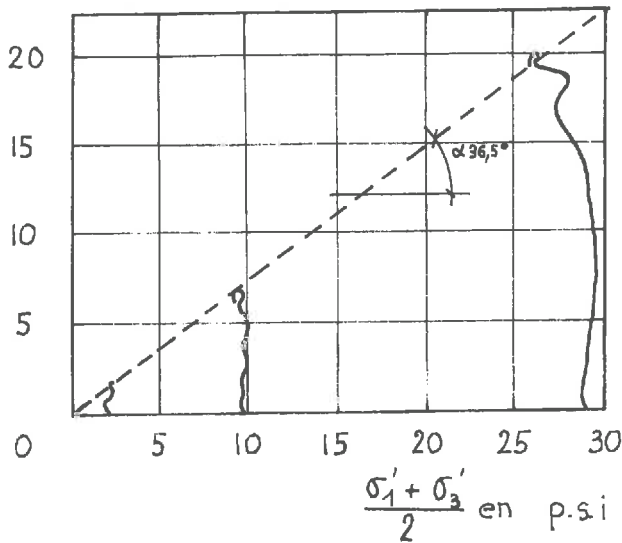
DROITE
ENVELOPPE
DES CERCLE
DE MOHR

ESSAI TRIAXIAL NON DRAINE AVEC MESURE de u

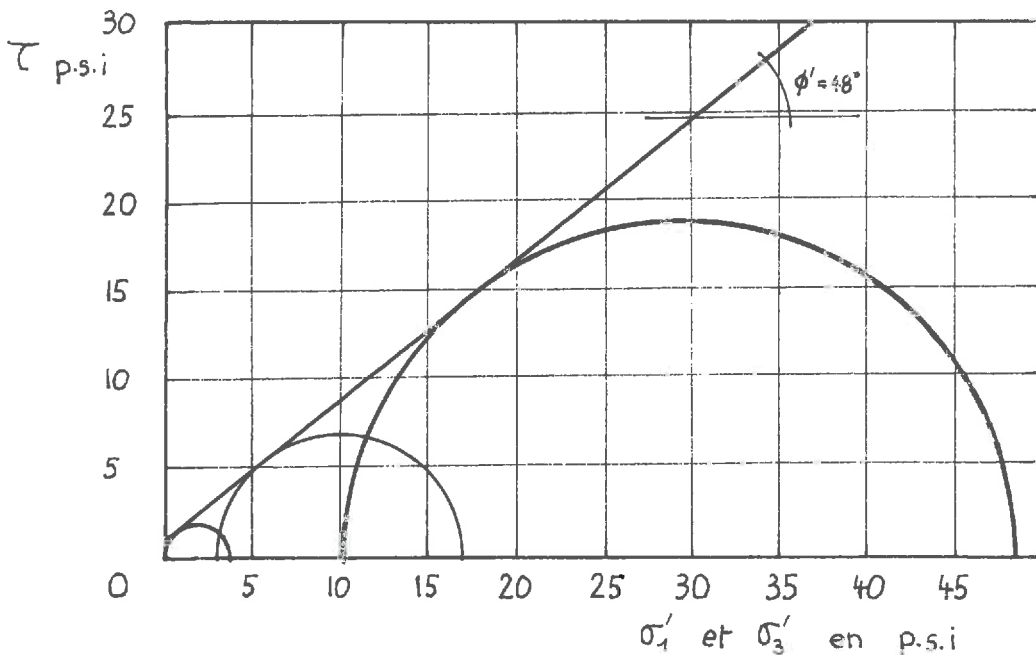
ADAMS 1965

Tourbe du Canada [A4]
assez fibreuse
Echantillon non remanié

Fig 13

$$\frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2} \text{ en p.s.i.}$$


w% initial	42,5
pH	6,7
G	1,73
PF %	84



DRÖITE
ENVELOPPE
DES CERCLES
DE MOHR

$$\varphi' = 50^\circ \quad C' = 140 \text{ g/cm}^2 \quad \varphi_d = 51^\circ \quad C_d = 20 \text{ g/cm}^2$$

et sur la seconde :

$$\varphi' = \varphi_d = 48^\circ \quad C' = C_d = 50 \text{ g/cm}^2$$

Dans les deux cas, pour des essais non drainés, on constate que u croît très vite pour atteindre une valeur voisine de la contrainte isotrope. La saturation de l'échantillon est assurée par l'application d'une contre-pression dont valeur n'est pas précisée.

Pour les essais drainés, dont la durée est de l'ordre de 3 mois, on constate que le changement de volume de l'échantillon (en tenant compte de l'eau drainée) est très faible et qu'il n'est pas besoin d'en tenir compte dans les calculs.

- L'Irlandais HANRAHAN H6, 8, 9 a publié des travaux présentés sur la figure 14 page 68. On y voit que pour un grand nombre d'essais, on a comme valeur moyenne :

$$\varphi' = 43,5^\circ \quad C' = 55 \text{ g/cm}^2$$

Une courbe effort-déformation type est donnée, où il est indiqué que la pression interstitielle est lue à la base de l'échantillon (pierre poreuse) et au milieu (plaque de céramique)

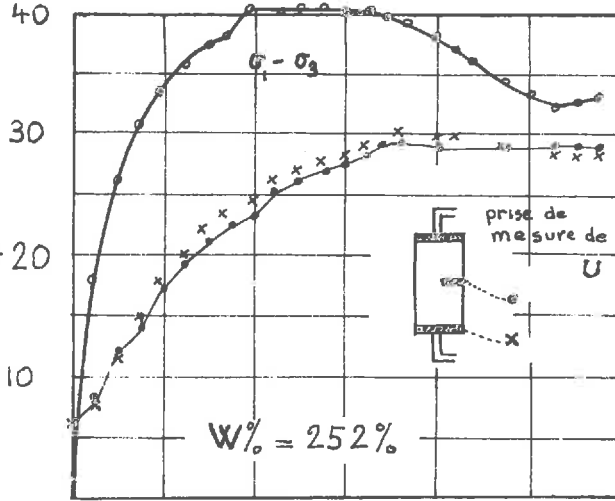
La vitesse d'écrasement adoptée entraîne des essais de 6 à 8 heures. La pression interstitielle est sensiblement égale, au cours de l'essai, au pied et au milieu de l'échantillon. La présence d'air est estimée au maximum à 1 %.

72 ESSAI TRIAXIAL NON DRAINE AVEC MESURE de U

HANRAHAN 1965 [H9]
fig 14

Tourbe d'Irlande mal décomposée
Echantillon remanié (grosses fibres ôtées)
20 x 10 cm

contrainte
p.s.i



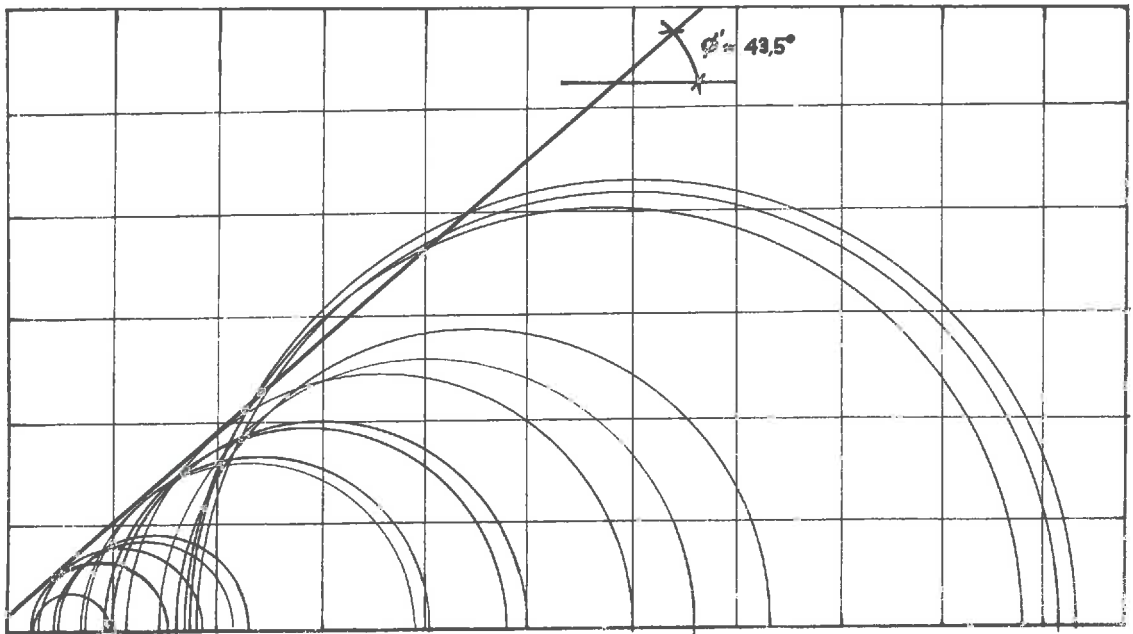
**COURBE
EFFORT
DEFORMATION**

pour la tourbe
étudiée la pres-
sion interstitielle
est mesurée à la
base et au milieu
de l'échantillon

pression dans la
cellule : 38,3 p.s.i

vitesse de cisaillement 20
0,006 cm/mn

τ p.s.i



DROITE ENVELOPPE DES CERCLES DE MOHR
basée sur le maximum de $\sigma_1 - \sigma_3$

σ_1 et σ_3
en p.s.i

D'autre part, HANRAHAN montre que le critère de rupture adopté $(\sigma_1 - \sigma_3)_{\max}$ ou $(\sigma'_1 / \sigma'_3)_{\max}$ ne modifie pas le résultat, bien que dans le premier cas le maximum soit atteint pour des déformations allant de 10 à 18 % et dans le second de 12 % à 23 %.

1.2.52. Commentaires et conclusions.

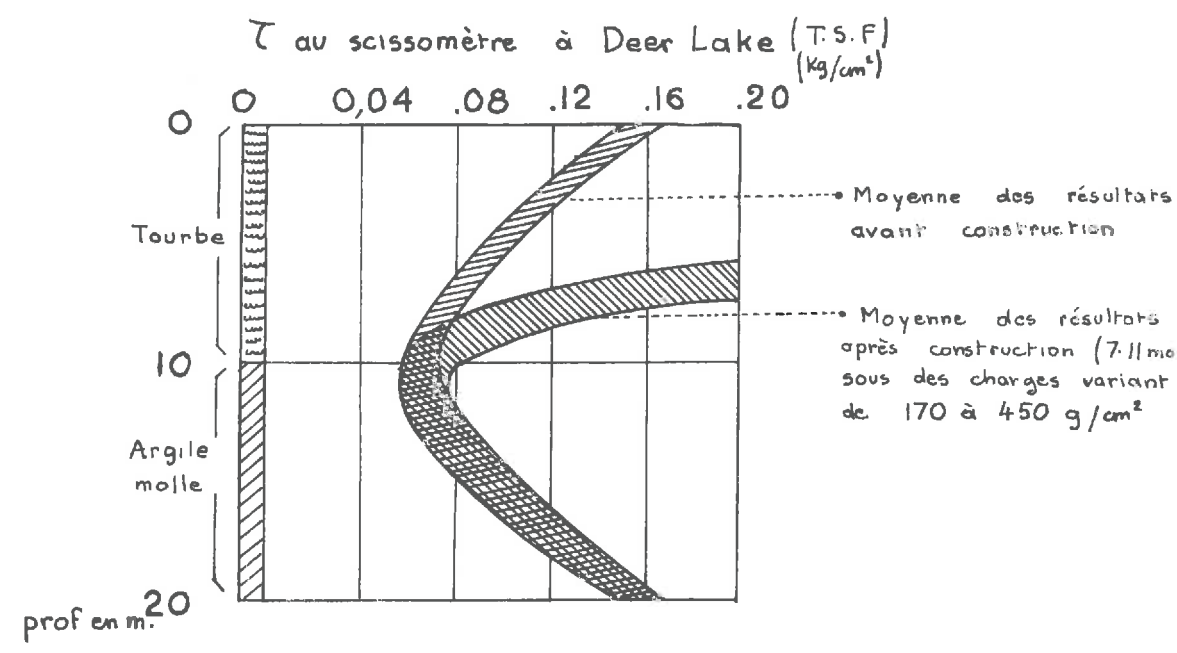
La première et la plus importante constatation est que la résistance au cisaillement, pour les tourbes normalement consolidées (c'est le cas général), croît très vite avec la pression de consolidation. Ceci se confirme "in situ" où l'on remarque que la tourbe, même légèrement surchargée, voit sa résistance croître notablement (figures 15, 16 pages 70 et 71). Ce fait expérimental explique les "angles de frottements effectifs" étonnamment grands que l'on trouve. La nature de la tourbe rend difficile la notion "d'angle de frottement intergranulaire" et $\text{tg } \phi'$ n'est que le facteur liant l'accroissement de résistance au cisaillement sous une contrainte effective.

Pour "l'angle de frottement apparent" ϕ , différents essais non consolidés effectués sur la tourbe de Bourgoin montrent qu'il est très faible, sinon nul. Ceci est logique car dans un essai, non consolidé non drainé, quelle que soit la contrainte isotrope, la résistance au cisaillement ne peut pas changer avec des teneurs en eau aussi fortes et une saturation aussi complète.

D'autre part, on constate que les pressions interstitielles croissent très vite au cours de l'écrasement et que les déformations à la rupture sont très importantes. Ceci indique que les problèmes de tassements seront capitaux.

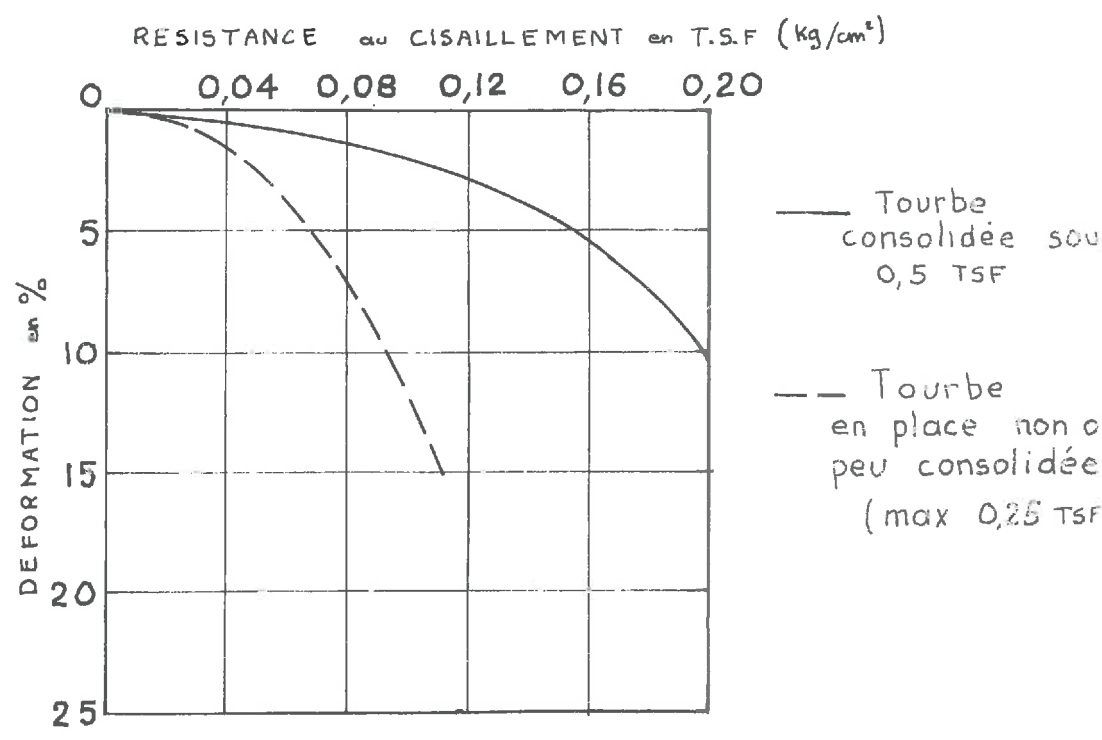
AMELIORATION de τ avec la PRESSION de CONSOLIDATION

LEA-BRAWNER SUR LA TOURBE DU CANADA (Brit. Columbia) [L4]



τ à prendre en compte pour les calculs de stabilité

fig 15



AMELIORATION de τ avec la PRESSION de CONSOLIDATION

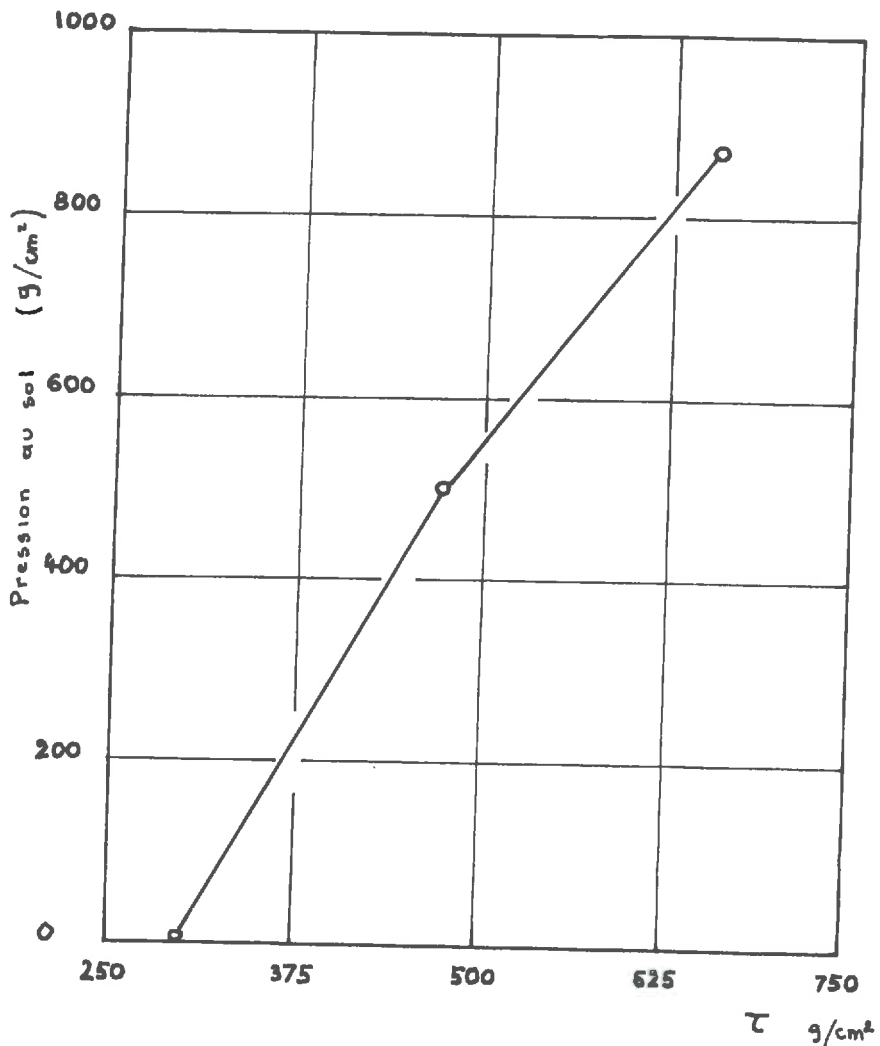
Essai effectué sur la tourbe noire de Bourgoin
caractéristiques moyennes [P5]

MO% 65 PF% 77 w% 590 G 1,46

scissomètre à 4 pales H 214 mm
D 100 mm

Vitesse de cisaillement
circonférentielle
 $V_c = 5,23 \text{ cm/mn}$

fig 16



D'après les résultats précédents, il semble qu'il serait utile et instructif de développer les essais triaxiaux sur la tourbe, non seulement pour avoir des données quantitatives pour des cas particuliers, mais aussi pour essayer d'obtenir des corrélations plus générales.

Toutefois, des inconvénients graves rendent ces essais difficilement interprétables et réalisables.

- Il est difficile de tailler un échantillon non remanié. La structure fibreuse est détruite par un remaniement.
- Au cours d'un essai drainé les déformations sont très grandes. L'homogénéité des contraintes et des déformations est alors mal assurée. Un élargissement des têtes peut être un remède partiel.
- Si on opère à des vitesses usuelles pour un essai drainé, on ne peut pas empêcher la formation d'un gradient de teneur en eau, du fait de la consolidation incomplète. HANRANAN indique que l'on trouve souvent des différences de 25 % à 45 % entre le haut et le bas. Des vitesses très faibles, des essais homogènes, des drainages appropriés peuvent être des causes d'améliorations.
- La tourbe humide (partie colloïdale très fine) bouche souvent le papier filtre utilisé comme drain.
- On citera pour mémoire les problèmes de carottage "in situ".

1.3. METHODE PARTANT DE CALCULS THEORIQUES.

Analyse de la stabilité.

Quand un glissement de terrain a lieu en site tourbeux, on peut en déduire, en analysant la stabilité, un τ moyen à la rupture, et ceci en prenant des relevés topographiques précis avant, pendant et après la rupture.

D'après les auteurs qui ont utilisé ce moyen, c'est, surtout quand une partie d'un remblai routier avait rompu la tourbe sous-jacente, le moyen le plus précis.

Cette méthode a des limitations évidentes. Il est toutefois très utile de comparer les résultats trouvés ainsi après une rupture "in situ" avec ce que l'on avait prévu avant, à partir d'essais.

2. RESULTATS OBTENUS.

S'ajoutant aux résultats déjà présentés, nous donnons dans les pages suivantes des mesures faites par différents auteurs, selon les types de tourbe et selon les techniques. Ces courbes seront ensuite analysées.

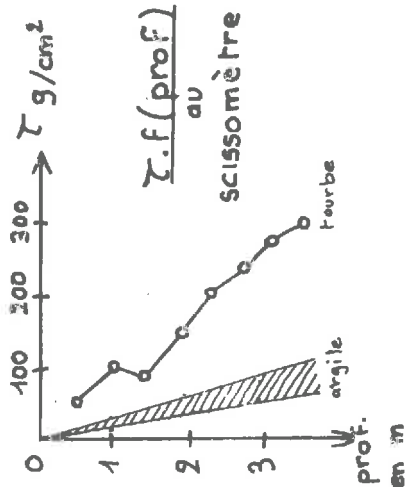
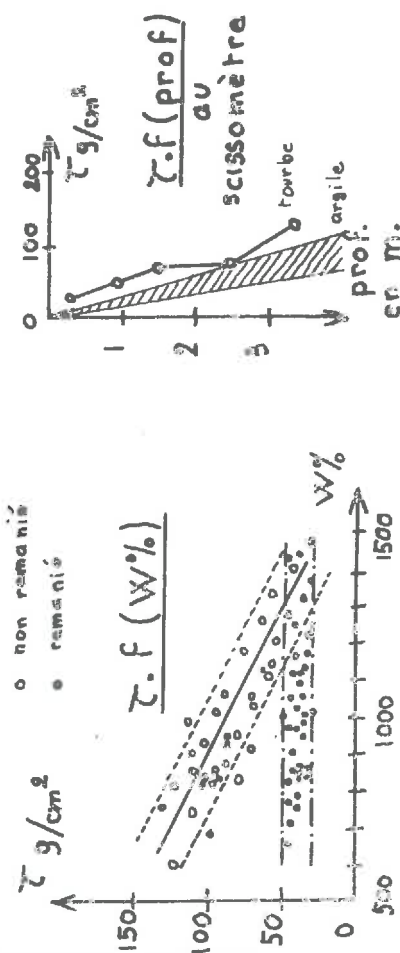
Sur les courbes donnant τ avec la profondeur, c'est-à-dire la variation de la cohésion avec la pression de consolidation due au poids des terres supérieures, nous avons représenté l'équivalent pour une argile moyenne normalement consolidée. Pour ce faire, nous avons utilisé une formule donnée par SKEMPTON (5)

$$\frac{C_u}{\sigma_c} = 0,11 + 0,0037 I_p$$

où pour I_p nous avons pris des plages de valeurs allant de 20 à 50. Les droites extrêmes ont alors pour équation, si $\gamma' = 1 \text{ g/cm}^3$:

$$C_u = 0,184 h \quad C_u \text{ g/cm}^2$$

$$C_u = 0,295 h \quad h \text{ en cm}$$

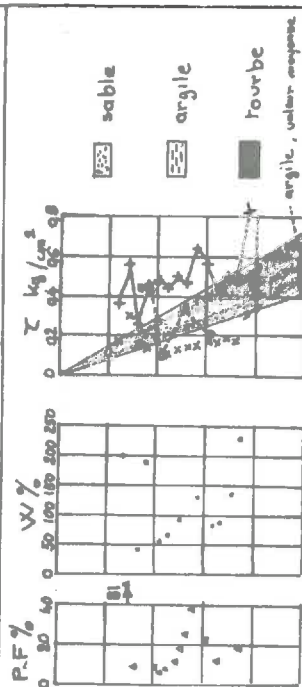
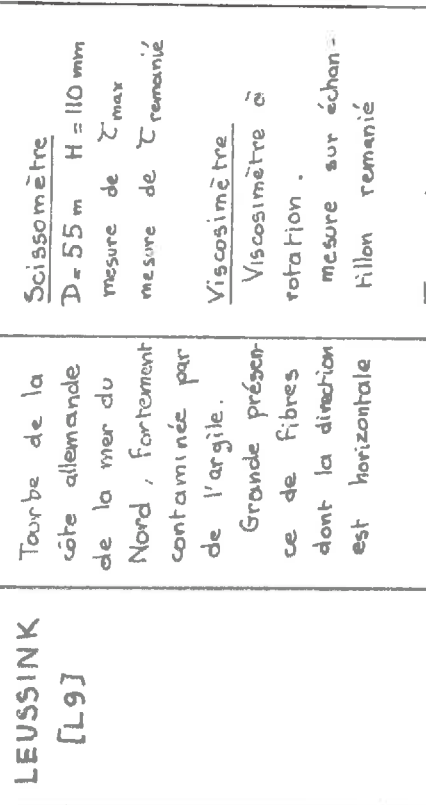
Référence	Tourbe	Essais	Résultats
HARDY THOMSON [H41]	Tourbe fibreuse sous sol argileux $\bar{\alpha}_s = 1,4 \text{ g/cm}^3$ $W\% = 470 \text{ à } 760$	<u>Scissomètre</u> $D = 10,1 \text{ cm}$ mesure de τ_{\max} <u>Compression simple</u> bonne corrélation avec essais scissométriques <u>Calcul par analyse de la stabilité</u> $\tau = 80 \text{ g/cm}^2$	$\tau_{\text{scisso}} > \tau_{\text{anal. stabilité}}$ Rotation de 50° du scissomètre pour τ_{\max} 
ANDERSON HEMSTOCK [A7]	Tourbe finement fibreuse - amorphe $\% \text{ cendres } 10 \text{ à } 15$ $W\% 650 \text{ à } 1450$	<u>Scissomètre</u> $D = 11,5 \text{ cm}$ mesure de τ_{\max} mesure de $\tau_{\text{remanié}}$ <u>Calcul par analyse de la stabilité</u> (cerce de Fellemus) $\tau = 80 \text{ g/cm}^2$	$\tau_{\text{scissomètre}} \approx \tau_{\text{analyse stabilité}}$ τ croît avec le $\% \text{ cendres}$ 

Référence	Tourbe	Essais	Résultats
<p>MAC FARLANE (Ontario 61) [M5]</p>	<p>Tourbe fibreuse sous sol argileux</p>	<p><u>Scissomètre</u> Diamètres différents 5,1 cm 7,1 cm 10,1 cm mesure de τ_{max} mesure de W% Rotation de 50° du sassomètre pour τ_{max}</p>	<p style="text-align: center;">$\tau \cdot f(\text{prof.}, w\%)$ ou scissomètre</p>
<p>ADAMS [A4J]</p>	<p>Tourbe ligneuse finement fibreuse W% = 400 pH = 5,6 G = 1,62</p>	<p><u>Essais Triaxiaux</u> (détails dans le texte)</p>	<p style="text-align: center;">$\tau \cdot f(\sigma_e)$ ou triaxial (non drainé)</p> <p>$\phi' = 50^\circ$ $c' = 140 \text{ g/cm}^2$</p> <p style="text-align: right;">argille - valeur moyenne</p>

Référence	Tourbe	Essais	Résultats												
RIPLEY LEONOFF [R19]	Tourbe amorphe granulaire ou lignee fine- ment fibreuse	<u>Scissomètre</u> D = 6,4 cm mesure de τ_{max} mesure de $\tau_{remanié}$ <u>Calcul par analyse de la stabilité:</u> $\tau_{calculé} \approx \frac{1}{2} \tau_{scisso}$	<table border="1"> <thead> <tr> <th>τ_{max} scissomètre</th> <th>W%</th> <th>Profondeur m</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>175 g/cm²</td> <td>1300</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td>165 g/cm²</td> <td>1100</td> <td>4,5</td> </tr> <tr> <td>210 g/cm²</td> <td>1200</td> <td>6</td> </tr> </tbody> </table> <p>$\tau_{remanié} \approx \frac{1}{2} \tau_{non\ remanié}$</p>	τ_{max} scissomètre	W%	Profondeur m	175 g/cm ²	1300	3	165 g/cm ²	1100	4,5	210 g/cm ²	1200	6
τ_{max} scissomètre	W%	Profondeur m													
175 g/cm ²	1300	3													
165 g/cm ²	1100	4,5													
210 g/cm ²	1200	6													
MICKLEBOROUGH [M15]	Tourbe lignee finement fibreuse W% 150 à 300 δ_s 0,97 à 1,11	<u>Scissomètre</u> D = 6,4 cm mesure de τ_{max}	<p style="text-align: center;">τ (prof.) du scissomètre</p>												
GOODMAN LEE [G7]	Tourbe amorphe avec quelques fibres $\delta_s = 1,50 \text{ g/cm}^3$ W% = 300 à 400	<u>Essai de Compression simple</u> essai Standard mesure de R_c	<table border="1"> <thead> <tr> <th>R_c kg/cm²</th> <th>δ_s g/cm³</th> <th>W%</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0,130</td> <td>1,51</td> <td>400</td> </tr> <tr> <td>0,170</td> <td>1,50</td> <td>280</td> </tr> <tr> <td>0,240</td> <td>1,52</td> <td>220</td> </tr> </tbody> </table>	R_c kg/cm ²	δ_s g/cm ³	W%	0,130	1,51	400	0,170	1,50	280	0,240	1,52	220
R_c kg/cm ²	δ_s g/cm ³	W%													
0,130	1,51	400													
0,170	1,50	280													
0,240	1,52	220													

Référence	Tourbe	Essais	Résultats
ANDERSON HAAS [A6]	Tourbe amorphe granulaire fortement contaminée par des matières minérales	<p>Scissomètre mesure de τ_{max} mesure de $\tau_{remanié}$</p> <p>Calcul par analyse de la stabilité τ calculé intermédiaire entre τ_{scisso} et $\tau_{remanié}$</p>	<p>τ (prof.) ou scissomètre</p> <p>— non remanié - - - remanié</p> <p>les droites tracées, figurant des corrélations, sont des droites des moindres carrés</p> <p>τ (prof.)</p> <p>τ (W%)</p>
MAC FARLANE [M4]	<p>Tourbe à mousses Tourbe de marais</p> <p>Tourbe du Japon</p> <p>Tourbe très humide</p> <p>Tourbe de la Province d'Alberta (Canada)</p>	<p>Scissomètre (GB)</p> <p>" "</p> <p>Scissomètre (Japon)</p> <p>Triaxial (Floride)</p> <p>Scissomètre</p> <p>Calcul par analyse de la stabilité</p>	<p>τ_{max} de 95 à 175 g/cm²</p> <p>τ_{max} de 105 à 260 g/cm²</p> <p>τ_{max} de 50 à 245 g/cm²</p> <p>$c' = 98$ g/cm²</p> <p>τ_{max} de 60 à 110 g/cm²</p> <p>τ par la rupture circulaire 77 g/cm²</p> <p>τ par la méthode des coins de 87 à 110 g/cm²</p> <p>$\tau_{vertical} = 2 \tau_{horizontal}$</p>

Référence	Tourbe	Essais	Résultats
<p>ADAMS (Ontario 1964) [A3]</p>	<p>Nature de la tourbe variant avec la profond- eur (cf courbes)</p>	<p>Scissomètre D = 5 cm H = 7,5 cm mesure de τ_{max} mesure de W%</p>	<p>The graph for Adams (A3) consists of two main plots. The top plot shows shear stress τ in g/cm² on the y-axis (0 to 400) against depth in meters on the x-axis (0 to 400). A dotted line shows τ increasing from 0 at the surface to a peak of approximately 350 g/cm² at 250m depth, then decreasing to about 250 g/cm² at 400m. A shaded area at the top (0-100m) represents soil layers: 'superficie' (0-10m), 'argileuse' (10-20m), 'peu fibreuse' (20-100m), and 'argile' (100-400m). The bottom plot shows water content W% on the y-axis (400 to 800) against depth in meters on the x-axis (0 to 400). A dashed line shows W% fluctuating between 450% and 600%. A soil profile on the right shows layers: 'superficie' (0-10m), 'argileuse' (10-20m), 'peu fibreuse' (20-100m), 'non ligneuse' (100-250m), 'peu fibreuse' (250-350m), and 'argile' (350-400m).</p>
<p>BROCHU PARE [B9]</p>	<p>Tourbe fibreuse Tourbe amorphe</p>	<p>Scissomètre mesure de τ_{max}</p>	<p>The graph for Brochu (B9) consists of two main plots. The top plot shows shear stress τ in g/cm² on the y-axis (0 to 600) against depth in meters on the x-axis (0 to 600). A dotted line shows τ increasing from 0 at the surface to a peak of approximately 550 g/cm² at 350m depth, then decreasing to about 450 g/cm² at 600m. A shaded area at the top (0-100m) represents soil layers: 'superficie' (0-10m), 'argileuse' (10-20m), 'peu fibreuse' (20-100m), 'non ligneuse' (100-200m), 'peu fibreuse' (200-350m), and 'argile' (350-600m). The bottom plot shows water content W% on the y-axis (400 to 600) against depth in meters on the x-axis (0 to 600). A dashed line shows W% fluctuating between 400% and 550%. A soil profile on the right shows layers: 'superficie' (0-10m), 'argileuse' (10-20m), 'peu fibreuse' (20-100m), 'non ligneuse' (100-200m), 'peu fibreuse' (200-350m), and 'argile' (350-600m).</p>
<p>$\tau_{TOURBE FIBREUSE} > \tau_{TOURBE AMORPHE}$ • pas de corrélation visible avec la profondeur</p> <p>$\tau_{TOURBE FIBREUSE}$ de 100 g/cm² à 200 g/cm² $\tau_{TOURBE AMORPHE}$ de 70 g/cm² à 180 g/cm²</p>			<p>prof. en m.</p>

Référence	Tourbe	Essais	Résultats
LEUSSINK [L9]	Tourbe de la côte allemande de la mer du Nord, fortement contaminée par de l'argile. Grande présence de fibres dont la direction est horizontale	<p><u>Scissomètre</u> D = 55 mm H = 110 mm mesure de τ_{max} mesure de τ remanié</p> <p><u>Viscosimètre</u> Viscosimètre à rotation. mesure sur échantillon remanié</p> <p><u>Triaxial</u> essai non consolidé, non drainé. échantillons non remaniés de 9,6x3 cm</p>	 <p>Profondeur (cm) 0 5 10 15 20 25</p> <p>P.F. % 0 20 40</p> <p>W % 0 50 100 150 200 250</p> <p>τ kg/cm^2 0 0.2 0.4 0.6 0.8</p> <p> sable argile tourbe <small>argile, valeur moyenne</small> </p> <p> + Scissomètre (non remanié) x Scissomètre (remanié) o Viscosimètre </p> <p><u>Profil des caractéristiques du sol en fonction de la profondeur</u></p>
			 <p> • Viscosimètre + Triaxial </p> <p> Viscosimètre / Triaxial (kg/cm^2) $\tau_{remanence}$ (kg/cm^2) </p> <p> Comparaison des résistances au cisaillement obtenues par divers procédés de mesure. </p> <p style="text-align: right;">↑ suite page suivante</p>

Référence	Tourbe	Essais	Résultats																												
LEUSSINK (suite)			<p>argile τ_{max} de 300 à 500 g/cm² $\tau_{romanté}$ de 100 à 200 g/cm²</p> <p>tourbe τ_{max} de 550 à 850 g/cm² $\tau_{romanté} > 300$ g/cm²</p> <p>τ ne croît pas visiblement avec la profondeur</p> <p>$\tau_{visco} \approx \tau_{triaxial} \approx 0,5 \tau_{sasso}$.</p> <p>Ceci est expliqué car avec le viscosimètre ou le triaxial le plan de rupture est dans la zone la plus faible et avec le scissomètre le plan de rupture est imposé perpendiculairement à la stratification</p>																												
BRAWNER LEA [L4]	Etude générale sur différentes sortes de tourbe	<p><u>Scissomètre</u> mesure de τ_{max}</p> <p><u>Triaxiaux</u> essais non drainés consolidés mesure du % déform.</p>	<p>On trouve que τ décroît avec la profondeur, mais ceci provient de ce que la tourbe est très fibreuse en surface et amorphe granulaire en profondeur.</p> <p><u>Courbes effort-déformation</u></p> <table border="1"> <caption>Approximate data from the 'Courbes effort-déformation' graph</caption> <thead> <tr> <th>Déformation (%)</th> <th>Tau (kg/cm²) - Tourbe Fibreuse</th> <th>Tau (kg/cm²) - Tourbe Amorphe</th> <th>Tau (kg/cm²) - Argile Silteuse (mini)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>~10</td> <td>~8</td> <td>~5</td> </tr> <tr> <td>10</td> <td>~15</td> <td>~12</td> <td>~8</td> </tr> <tr> <td>15</td> <td>~18</td> <td>~14</td> <td>~10</td> </tr> <tr> <td>20</td> <td>~20</td> <td>~15</td> <td>~11</td> </tr> <tr> <td>25</td> <td>~20</td> <td>~15</td> <td>~11</td> </tr> </tbody> </table>	Déformation (%)	Tau (kg/cm ²) - Tourbe Fibreuse	Tau (kg/cm ²) - Tourbe Amorphe	Tau (kg/cm ²) - Argile Silteuse (mini)	0	0	0	0	5	~10	~8	~5	10	~15	~12	~8	15	~18	~14	~10	20	~20	~15	~11	25	~20	~15	~11
Déformation (%)	Tau (kg/cm ²) - Tourbe Fibreuse	Tau (kg/cm ²) - Tourbe Amorphe	Tau (kg/cm ²) - Argile Silteuse (mini)																												
0	0	0	0																												
5	~10	~8	~5																												
10	~15	~12	~8																												
15	~18	~14	~10																												
20	~20	~15	~11																												
25	~20	~15	~11																												

3. PROPRIETES DE LA RESISTANCE AU CISAILLEMENT DES TOURBES.

3.1. GENERALITES.

La première constatation est que la tourbe a une meilleure résistance au cisaillement qu'une argile normalement consolidée saturée. Cette résistance reste assez faible, mais croît vite avec une pression de consolidation.

Ensuite, on doit signaler que l'application d'une contrainte entraîne une déformation considérable avant la rupture (un scissomètre peut tourner de 50° , un échantillon au triaxial se réduire de 20 %). Il s'ensuit que très souvent les problèmes de tassements seront déterminants car ils interviendront pour gêner les constructions bien avant les problèmes de rupture.

On a passé en revue tous les moyens classiques de la Mécanique des Sols pour déterminer expérimentalement τ , excepté l'essai à la boîte de cisaillement de CASSAGRANDE où le fait d'imposer un plan de rupture et des conditions de drainage inconnues entraîne des résultats non significatifs, ce qui explique qu'aucun auteur ne relate de tels essais.

On a constaté que si les mesures étaient qualitativement significatives, aucun mode opératoire n'était absolument satisfaisant quantitativement. Ceci est bien entendu lié à la nature fibreuse, à l'hétérogénéité, à l'anisotropie de la tourbe qui font qu'appliquer les théories des milieux continus est assez illusoire.

3.2. CORRELATIONS.

- MAC FARLANE M4 cite qu'entre les divers procédés de mesure, les corrélations suivantes peuvent être faites :

τ calculé à partir de la stabilité \approx

τ remanié au scissomètre \approx

τ mesuré au laboratoire \approx

0,3 à 0,5 τ non remanié au scissomètre.

On peut ajouter que les divers auteurs sont assez en accord, en apportant la restriction suivante : τ non remanié au scissomètre de \varnothing 10 cm \approx autres méthodes.

On en déduira que pour un sol comme la tourbe, la détermination de la résistance au cisaillement ne doit pas s'effectuer par un seul moyen. Une utilisation judicieuse des procédés précédents permet par recoupements une bonne détermination de τ .

- Les différentes courbes indiquent que τ :

- . croît avec la profondeur et le degré de consolidation,
- . croît avec la fibrosité du matériau,
- . décroît avec la teneur en eau,
- . décroît avec la teneur en matières organiques.

Toutefois, ces tendances appellent des réserves :

. jusqu'à 1,5 m de profondeur, de fortes irrégularités interviennent dans la valeur de τ , et même ensuite certains chercheurs estiment qu'il n'est pas évident que la résistance croisse avec la profondeur. On peut expliquer cela par le fait que parfois la nature de la tourbe change avec la profondeur et qu'il est alors absurde de vouloir découvrir une évolution logique.

. une tourbe fibreuse a un τ horizontal plus fort qu'une tourbe amorphe, mais les fibres amènent un renforcement dans la direction parallèle à la stratification, ce qui n'est plus le cas dans la direction perpendiculaire. Dans la réalité, les plans de rupture se développent dans le sol plus ou moins selon les chemins de moindre résistance. Il est donc logique et sûr de prendre en compte dans les calculs la plus faible valeur trouvée après des essais faits dans différentes directions.

3.3. DIVERSES PROPRIETES.

3.3.1. Sensibilité.

=====

La nature de la tourbe rend cette notion très floue. Aucun mode opératoire définissant un échantillon remanié n'est admis. Certains auteurs estiment qu'elle est grande (1,5 à 4).

3.3.2. Mesure et valeur de K_0 .

=====

$$K_0 = \frac{\sigma'_3}{\sigma'_1}$$

K_0 est le coefficient de poussée des terres au repos.

Sa détermination se fait généralement directement à partir d'essais triaxiaux avec conditions de déformation latérale nulle. Il peut être utile de connaître K_0 quand on veut simuler au laboratoire les conditions de contraintes sur un élément de tourbe en place (essais de consolidation au triaxial...).

BISHOP B4 préconise deux sortes d'essais dont nous ne rappellerons pas le détail ; ce sont :

- les essais non drainés sur éprouvettes partiellement saturées
- les essais drainés sur éprouvettes saturées ou sèches.

Pour la tourbe, seuls les essais drainés sont pratiqués. Nous présenterons deux études :

. ADAMS A2 - Pour évaluer la nullité du déplacement latéral, il utilise la comparaison entre le volume de l'échantillon et le volume d'eau expulsé.

L'échantillon a été préconsolidé à 700 g/cm^2 . La figure 17 page 85 montre la variation de K_0 en fonction de la déformation verticale. On voit que K_0 part d'une valeur élevée pour atteindre 0,175. ADAMS estime que la valeur élevée du début n'a pas grande signification et qu'elle est due à la préconsolidation.

. A l'INSA de Lyon I 1 une étude a été menée sur la tourbe de Bourgoin :

ESSAI⁸⁹ K₀
(drainé)

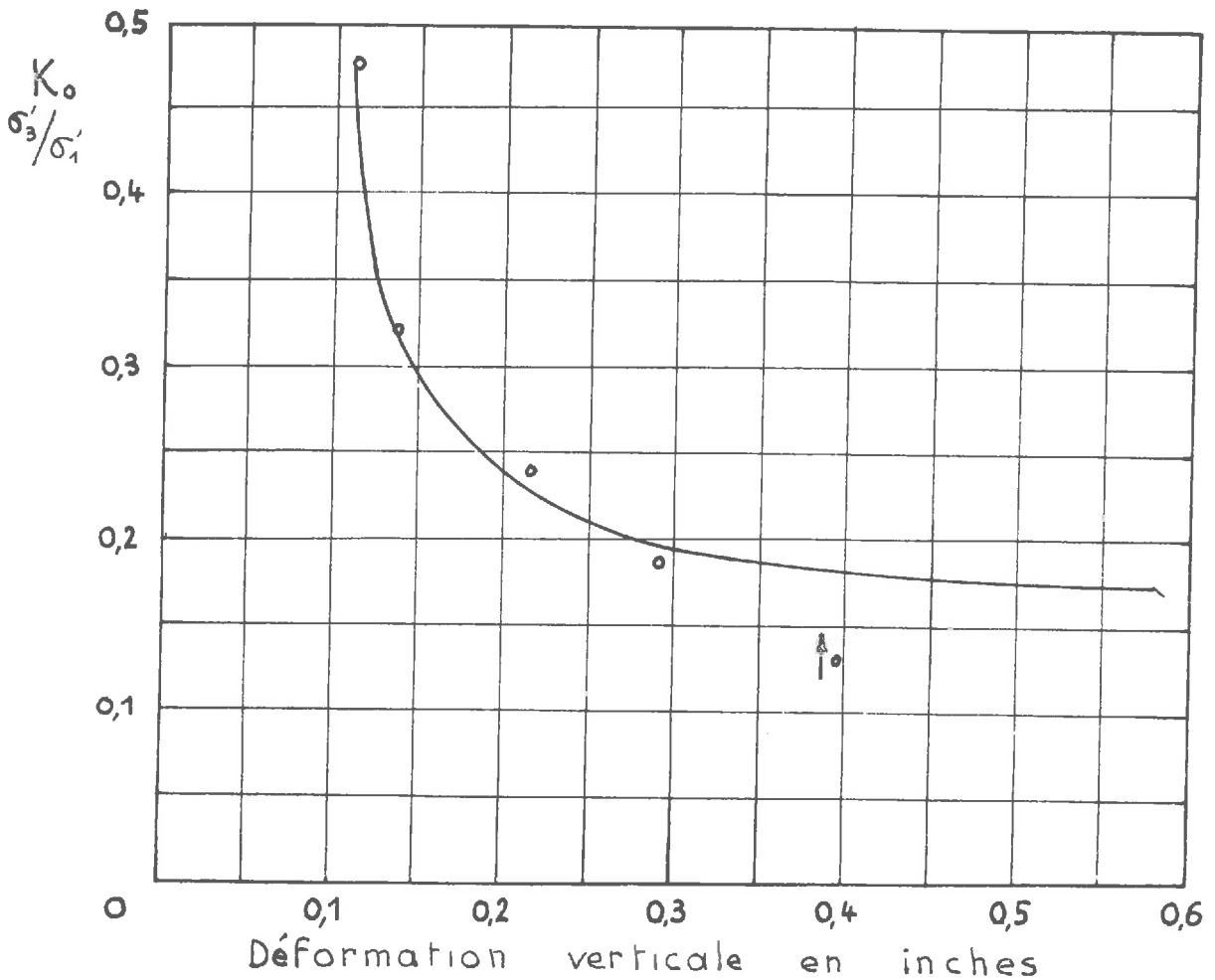
ADAMS 1961

Tourbe du Canada [A2]
ligneuse - finement fibreuse

Echantillon non remanié
préconsolidé à 700 g/cm²

w% initial	400	G	1,62
pH	5,6	PF %	de 77,5 à 88

fig 17



- le chargement est effectué par une presse classique à la vitesse de 0,2 mm/mn,
- l'ajustement de la pression latérale est obtenu grâce à un cylindre de contrôle manuel,
- l'absence de déplacement latéral est obtenue par un indicateur de déformation latérale du type de celui recommandé par BISHOP (appareil de zéro avec index de Mercure).

Une étude statistique a été faite sur les 9 essais effectués, on a tracé les courbes moyennes et la dispersion à 70 % en fonction des valeurs expérimentales (écart-type majoré par les coefficients de student). Seul le résultat global est présenté (figure 18 page 87), les courbes des différents essais étant assez semblables.

En conclusion, on constate que la valeur de K_0 pour la tourbe semble être voisine de 0,2, ce qui est nettement plus faible que pour les sols minéraux où l'on admet souvent 0,5.

3.4. CONCLUSION.

Les tourbes ont une résistance au cisaillement moyenne (100 g/cm² à 300 g/cm²), qui croît vite avec une pression de consolidation.

Sous une couche de tourbe se trouve souvent de l'argile molle très saturée. Il ne faut surtout pas oublier dans les calculs de stabilité que dans la plupart des cas de rupture c'est cette couche d'argile qui va se rompre d'abord car ses propriétés vis-à-vis du cisaillement sont inférieures à celles de la tourbe.

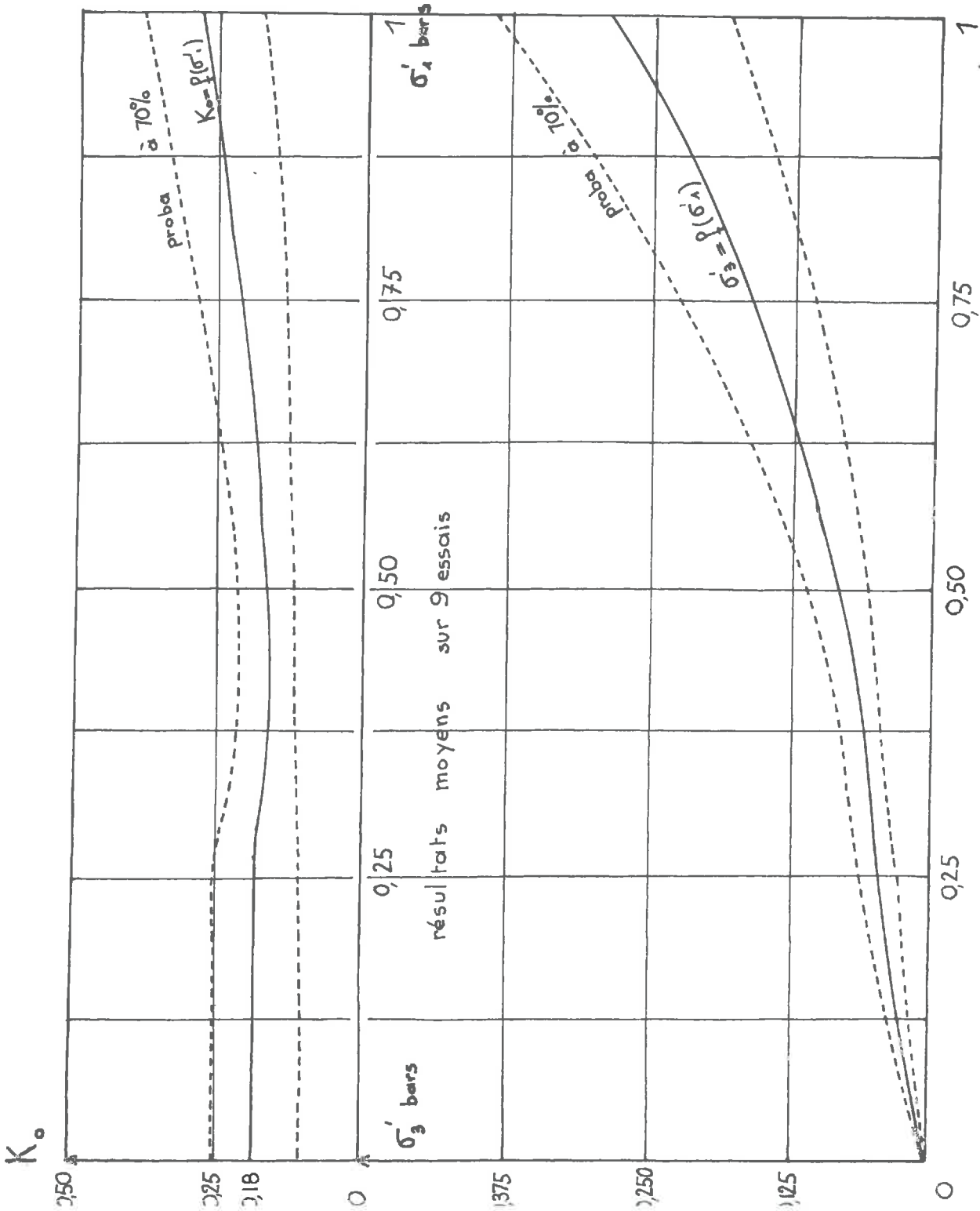
ESSAI K_0

(drainé)

Essai effectué sur la tourbe noire de Bourgoir
caractéristiques moyennes [P5-11]

MO% 65 PF% 77 w% 590 G 1,46

Fig 18



C H A P I T R E I V
=====

C O M P R E S S I B I L I T E

1. GENERALITES.

Afin de bien poser le problème de la compressibilité de la tourbe, nous reproduisons, pour commencer ce chapitre, les conclusions de MAC FARLANE M7 . Elles résultent d'une étude bibliographique et peuvent être considérées comme une base de départ.

- En général, les courbes représentatives du tassement (au laboratoire et "in situ") en fonction de $\log t$ présentent la forme en "S" caractéristique. C'est toutefois nettement moins marqué que pour les sols minéraux. Il est difficile de définir une limite précise entre la fin de la "consolidation primaire" et de début de la "compression secondaire".

- Au laboratoire, la phase initiale de la consolidation s'effectue très vite, en quelques minutes, et constitue au moins 50 % du tassement final.

- La grandeur du tassement pendant la période "primaire" varie linéairement avec l'épaisseur de la couche de tourbe. On peut donc prévoir cette phase "in situ" par des essais de Laboratoire.

- Suivant les auteurs, et donc suivant les types de tourbes, la vitesse de la "phase primaire" de consolidation est proportionnelle soit à l'épaisseur, soit à celle-ci élevée à la puissance 1,5 , soit à son carré.

- Le tassement total est obtenu au bout d'un temps très long- plusieurs mois même pour des petits échantillons- ce qui est dû à des effets secondaires.

- La compression "secondaire" est de nature visqueuse ou plastique. Sa grandeur est fonction de la température, de la nature de la tourbe et de l'état de contrainte. Elle est indépendante des conditions de drainage. La compression "secondaire" est très grande pour les tourbes, son ordre de grandeur "in situ" peut être calculé à partir d'essais de consolidation très longs.

- La compression "secondaire" est une fonction linéaire du logarithme du temps (au laboratoire et in situ). La pente de la droite (coefficient de compression "secondaire") dépend de l'histoire des contraintes appliquées, et de la valeur de la contrainte nouvelle.

- La perméabilité d'une tourbe normalement consolidée est initialement très élevée, mais diminue rapidement avec la compression. Elle est fonction de la grandeur et de la durée de l'application de la charge. Elle est plus grande dans le sens horizontal que vertical, le rapport d'anisotropie variant de 3 à 6.

- Si la surcharge est ôtée totalement pendant ou après la période de compression "secondaire", on doit prendre en compte le gonflement qui peut être très important.

- Le gaz (provenant de la décomposition des matières organiques) dans les pores interstitiels, est un facteur qui peut rendre difficile l'interprétation des caractéristiques du tassement en fonction du temps.

- Les drains de sable verticaux n'accélèrent pas les tassements de la tourbe, ils peuvent cependant améliorer la résistance au cisaillement de la tourbe pendant la construction.

2. DONNEES PHYSIQUES COMPLEMENTAIRES.

S'ajoutant aux données physiques générales du Chapitre II, nous parlerons de celles qui se rapportent plus spécifiquement aux problèmes de compressibilité.

2.1. INDICE DES VIDES.

2.1.1. Définition.

=====

Elle est identique à celle donnée pour les sols minéraux :

W teneur en eau
 S_r degré de saturation
 γ_s poids spécifique de la partie solide
 γ_w poids spécifique de l'eau

$$e = \frac{W \gamma_s}{\gamma_w \cdot S_r}$$

2.1.2. Propriétés.

=====

Les tourbes ont un indice des vides généralement très élevé. Il varie souvent de 5 à 15 avec des extrêmes de 3 à 25.

L'indice des vides décroît avec le degré de décomposition de la tourbe. Il est plus élevé pour une tourbe fibreuse que pour une tourbe amorphe.

2.1.3. Corrélation avec la teneur en eau.

=====

De par la définition de e , la relation $e-W\%$ devrait être linéaire et constante pour un certain type de tourbe (γ_s , γ_w , S_r donnés).

Toutefois, de par les différentes valeurs que prennent les chercheurs pour δ_s (mesure au picnomètre ou utilisation de formules basées sur les teneurs en matières organiques), de par les différentes valeurs de S_r (voisin de 1), de par les différences de teneur en eau en fonction de la température de séchage, cette relation n'est pas strictement fonctionnelle.

A partir d'un grand nombre d'essais donnés par différents auteurs, nous avons essayé de déduire une relation statistique permettant de déterminer e en connaissant $W\%$. Nous avons fait figurer pages 93, 95 les différentes courbes obtenues, avec des détails sur leur provenance et sur leur interprétation. On peut dire que la corrélation trouvée est très bonne (0,988) et qu'une formule moyenne empirique semble pouvoir être utilisée (droite moyenne entre les deux droites de régression).

$$e = 0,0175 W - 0,65$$

2.2. PERMEABILITE.

2.2.1. Définition.

=====

Elle se définit comme pour les autres sols à partir de la loi de DARCY.

C'est donc, en principe, une caractéristique de l'écoulement dû aux forces gravitationnelles, sous l'influence d'une pression hydrostatique positive.

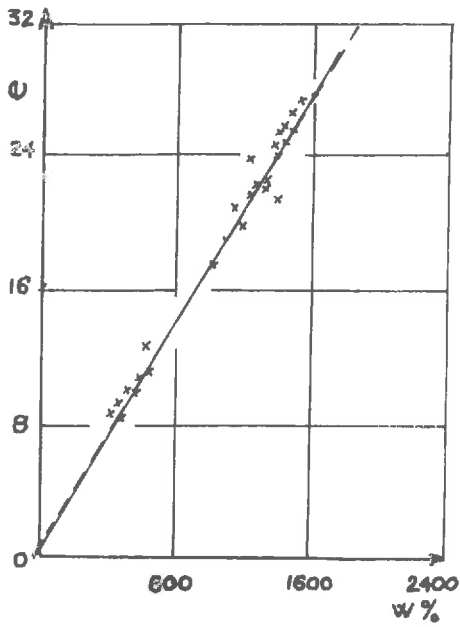


fig 19

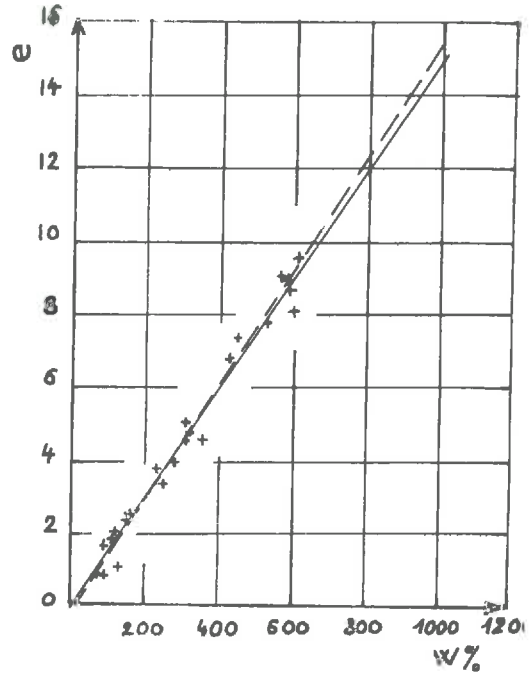


fig 20

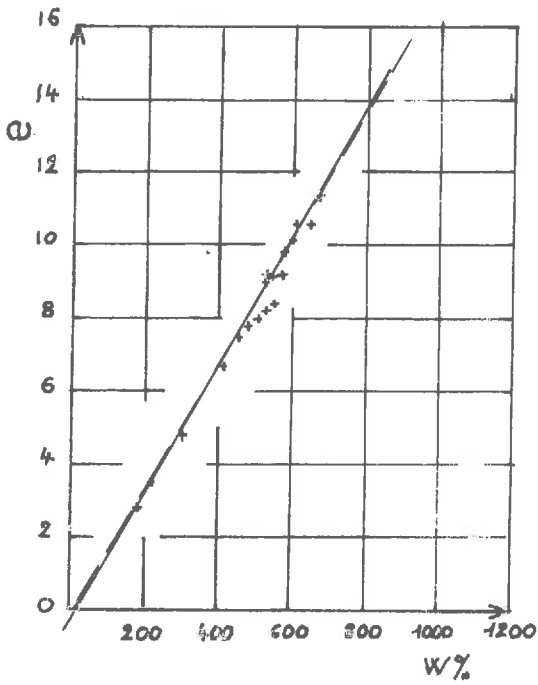


fig 21

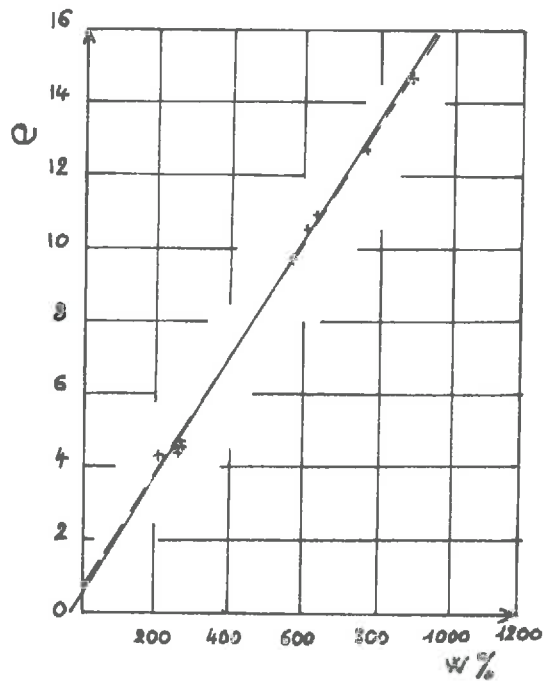


fig 22

-FIGURE 19-

LEA BRAWNER L4,5 sur deux sortes de tourbe du Canada :

- . tourbe fibreuse très pure (matières minérales 5 %) avec W% et e grands
- . tourbe amorphe assez contaminée (matières minérales de 10 à 15%). W% et e sont plus faibles.

Les teneurs en eau sont déterminées après séchage à 110°C.

Le coefficient de corrélation est 0,992.

-FIGURES 20, 21-

BROCHU et PARE B9 sur deux sortes de tourbe du Québec :

- . tourbe assez fibreuse (figure 20) venant de NAPIERVILLE, 15 à 20 % de cendres,
- . tourbe moyennement fibreuse (figure 21) provenant d'ORSAINVILLE, 15 % de cendres.

Les teneurs en eau sont déterminées après séchage respectivement à 100° et 110°C.

Les coefficients de corrélation sont 0,986 et 0,990.

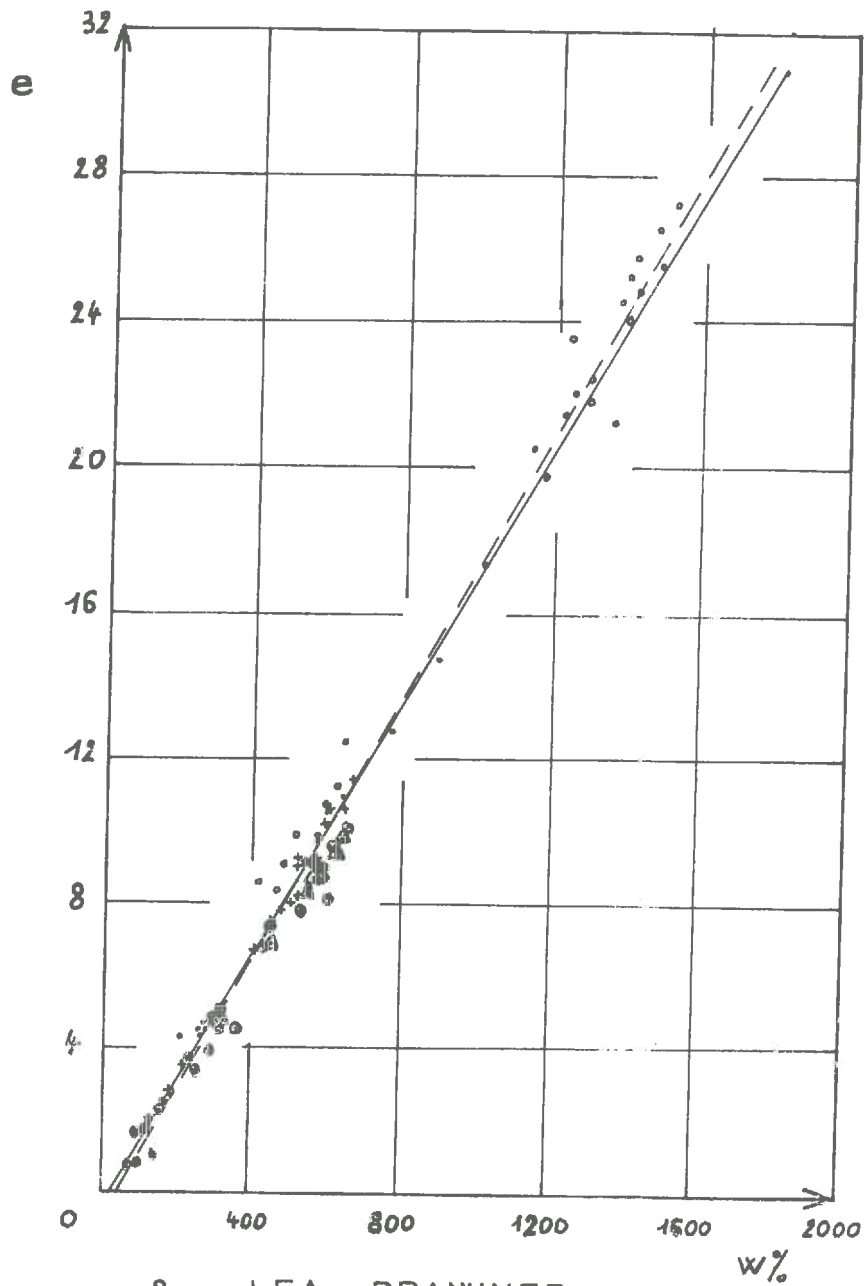
-FIGURE 22-

TESSIER T6,7 sur une tourbe du sud de MONTREAL (ST ELIE D'ORFORD).

. tourbe amorphe, 10 % de cendres. Teneur en eau déterminée après séchage à 100°C.

Dans tous les cas, δ_s a été déterminé sur la base de MO %, en prenant 1,5 g/cm³ pour la matière organique et 2,7 g/cm³ pour la matière minérale.

CORRELATION (e.W %)



- LEA, BRAWNER
- SAINT ELIE D'ORFORD
- + ORSAINVILLE
- ⊕ NAPIERVILLE
- △ BOURGOIN

Fig 23

COMMENTAIRES SUR L'ENSEMBLE (Figure 23 page 95).

En plus de tous les résultats précédents, on a ajouté quelques valeurs provenant de la tourbe de BOURGOIN.

Le coefficient de corrélation est 0,9878.

Les droites de régression ont pour équation :

$$W = 55,8 e + 46,2 \qquad e = 0,017 W - 0,49$$

En appliquant la méthode décrite à l'Annexe 1 page 195 , on calcule les erreurs-types maximales :

$$W \% \text{ par rapport à } e = 77,5 \%$$

$$e \text{ par rapport à } W \% = 1,38$$

On a donc à peu près 10 % d'erreur relative maximale en utilisant ces relations.

2.2.2. Propriétés.

=====

La tourbe est caractérisée par une perméabilité très variable (entre 10^{-2} et 10^{-9} cm/s). On peut voir à cela deux sortes de raisons :

- la structure physique des particules et leur arrangement affectent beaucoup la taille et la continuité des pores et tubes capillaires par lesquels l'eau s'écoule. Ainsi, une tourbe ligneuse aura une perméabilité plus forte qu'une tourbe humifiée colloïdale. De même, la proportion de matières minérales intervient

- le degré de consolidation a une grande importance, car il laisse plus ou moins de vides pour l'écoulement de l'eau. Ainsi on étudiera particulièrement les relations entre l'indice des vides et la perméabilité.

D'autre part, du fait de l'anisotropie de la tourbe, la perméabilité change selon la direction considérée.

Un rapport américain donne, comme moyennes :

$$K_{\text{vertical}} = 1,06 \cdot 10^{-3} \text{ cm/s}$$

$$K_{\text{horizontal}} = 7,06 \text{ à } 46 \cdot 10^{-4} \text{ cm/s}$$

Une statistique japonaise indique :

$$K_{\text{vertical}} = 2 \text{ à } 7 \cdot 10^{-3} \text{ cm/s}$$

$$K_{\text{horizontal}} = 2 \text{ à } 13 \cdot 10^{-3} \text{ cm/s}$$

Il semble donc que dans la majorité des cas $K_V < K_H$, le rapport d'anisotropie pouvant atteindre 6.

2.2.3. Corrélation avec l'indice des vides.

- L'indice des vides pouvant être extrêmement grand, on pourrait s'attendre à mesurer des perméabilités plus fortes que 10^{-2} cm/s. On peut expliquer cette faible perméabilité, eu égard au grand indice des vides, par la présence d'air et surtout par des liaisons entre l'eau et les particules, ce qui fait qu'une partie de l'eau est retenue par la tourbe.

- Sur une tourbe donnée, nos calculs montrent qu'une corrélation linéaire $e - \log K$ est meilleure que $\log e - \log K$ indiquée par certains auteurs.

Si on regroupe différents résultats d'essais, afin d'en déduire une corrélation générale, on arrive à une assez bonne conclusion. Sur les pages 100, 101, 103, nous avons fait figurer les courbes obtenues en exploitant divers rapports, ainsi que leur provenance et leur interprétation.

La dispersion relative de la corrélation générale peut s'expliquer par :

- . la nature de la tourbe qui joue un rôle mal connu,
- . le fait que les auteurs opèrent la mesure de $W\%$ (donc de e) après séchage à différentes températures (65°C - 80°C - 100°C),
- . le fait que les auteurs déterminent K soit expérimentalement (perméamètres), soit théoriquement à partir d'un essai oedométrique auquel on applique la théorie de TERZAGHI sur la consolidation primaire ($K = \frac{a_v C_v \delta_w}{1 + e}$), cette seconde méthode ne

signifiant pas grand-chose car la théorie utilisée ne se vérifie pas pour les sols organiques,

- le groupement de résultats hétérogènes fait forcément baisser la valeur de la corrélation, toutefois celle-ci est utile car elle peut servir de base à des études théoriques (consolidation avec K variable).

En prenant une droite moyenne entre les deux droites de régression calculées, on déduit les formules empiriques suivantes :

$$\underline{- \log K = 9,93 - 0,58 e}$$

$$\underline{- \log K = 0,01 W + 10,3}$$

-:-:-:-

Fig 24

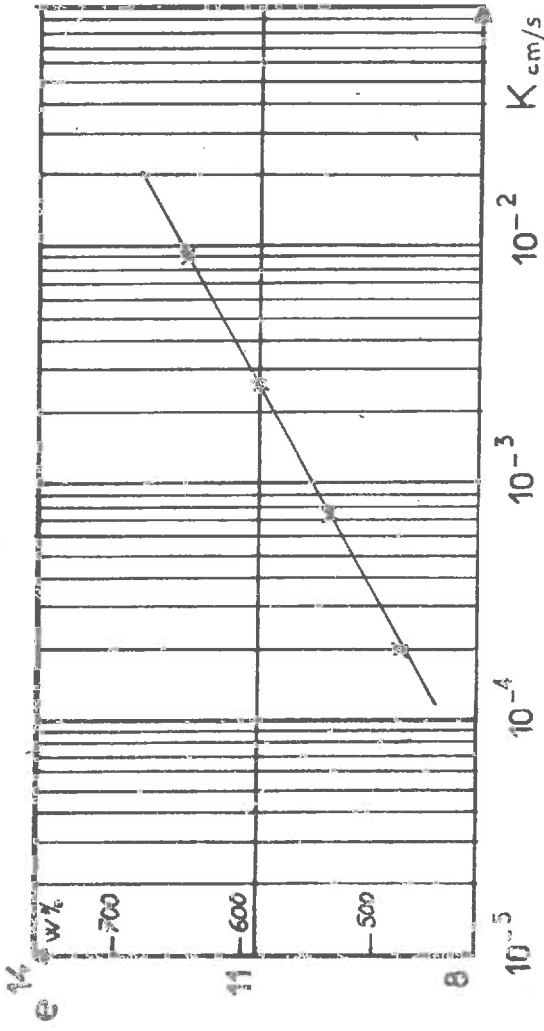


Fig 25

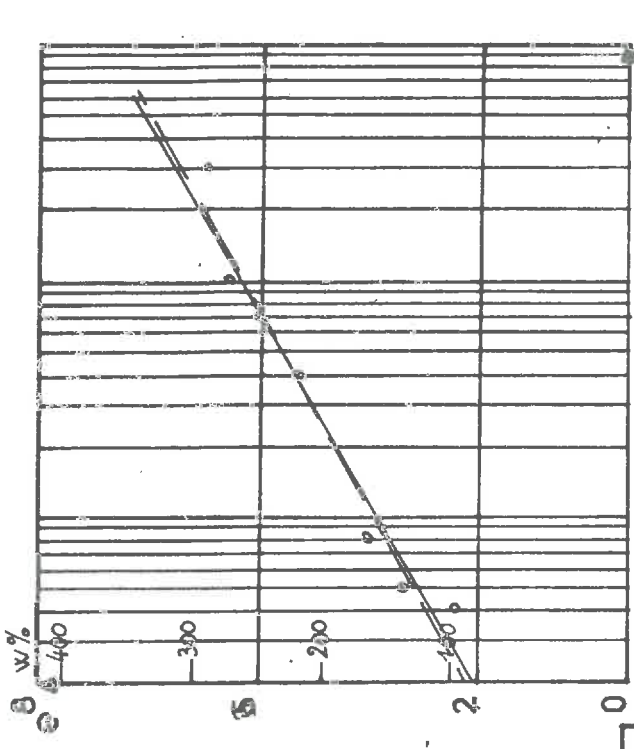


Fig 26

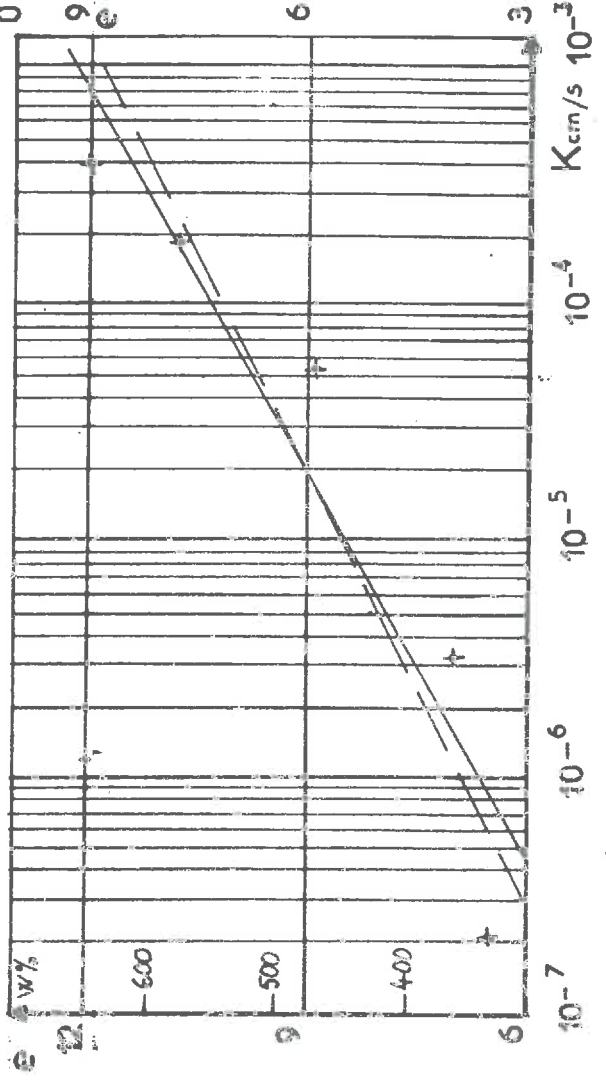


Fig 27

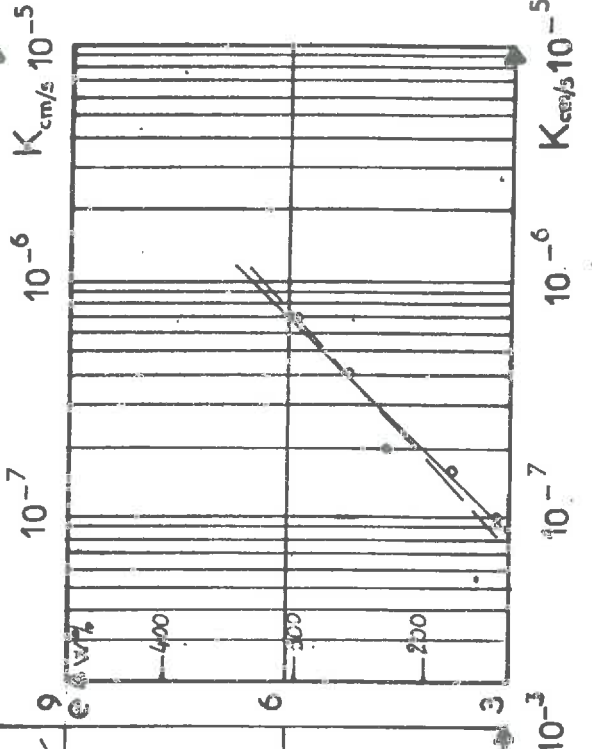


Fig 28

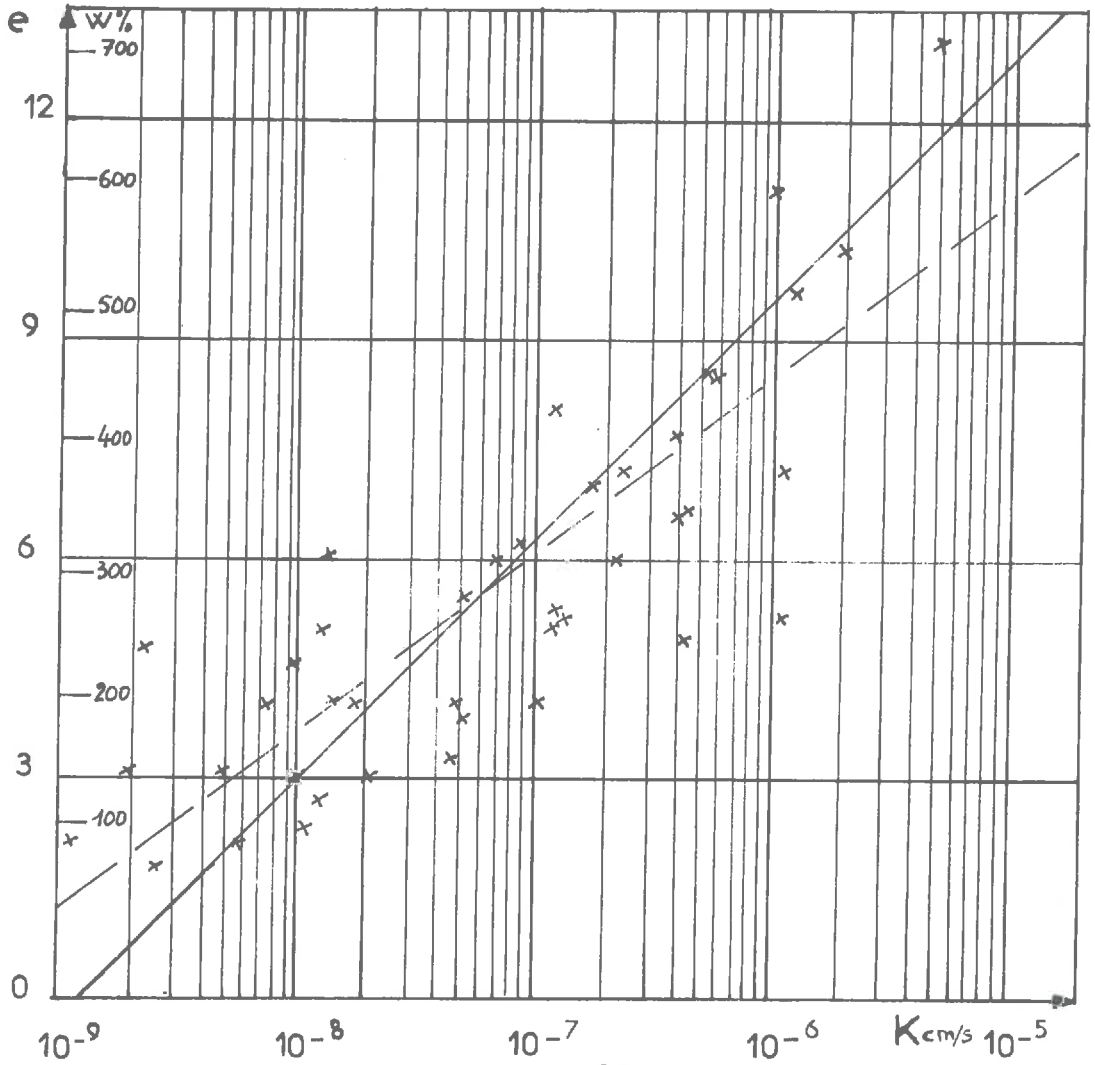
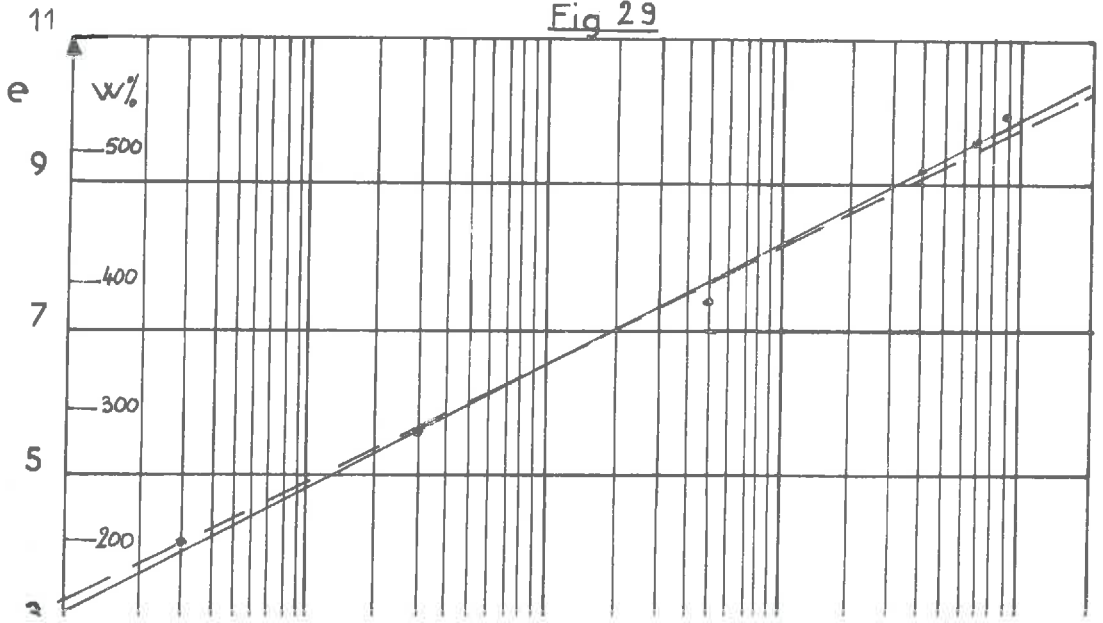


Fig 29



-FIGURES 24 et 26-

HANRAHAN H 4 a effectué des essais en mesurant K au perméamètre, W% après séchage à 100°C et δ_s expérimentalement.

- . tourbe peu humifiée (Figure 24). Corrélation parfaite.
 $e = -1,814 (-\log K) + 15,701$; $(-\log K) = -0,55 e + 3,65$
- . tourbe assez peu fibreuse (Figure 26). Coefficient de corrélation $r = 0,942$.
 $e = 1,634 (-\log K) + 16,746$; $(-\log K) = -0,543 e + 9,623$

-FIGURES 27 et 28-

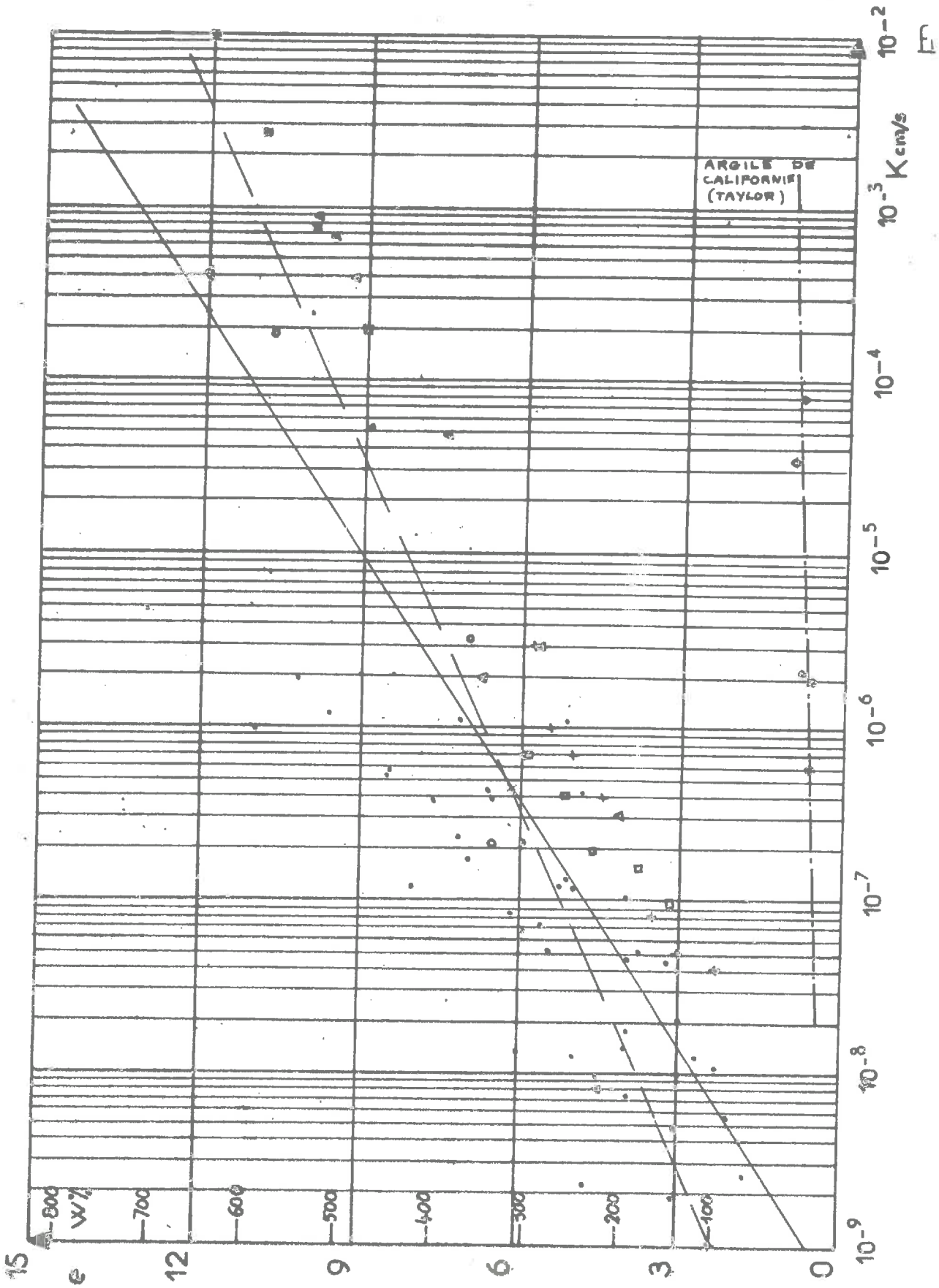
LEA BRAWNER L4 ont effectué des essais en mesurant W% après séchage à 110°C et en calculant δ_s par la formule de COOK (poids spécifique de la seule matière organique pris : 1,5 g/cm³).

- . tourbe amorphe (Figure 27). K déterminé au perméamètre.
 $r = 0,979$
 $e = -3,077 (-\log K) + 24,931$, $(-\log K) = -0,311 e + 3,041$
- . tourbe finement fibreuse (Figure 23). K déterminé par le calcul "théorique". $r = 0,838$
 $e = -2,341 (-\log K) + 22,329$, $(-\log K) = -0,300 e + 3,819$

-FIGURES 25 et 29-

WATANABEE W5 a effectué des essais sur des tourbes du Japon. K est mesuré au perméamètre. Rien d'autre n'est précisé, mais il faut savoir que les Japonais déterminent en général W% après séchage à 65°C.

- . Figure 25 - $r = 0,980$
 $e = -1,81 (-\log K) + 16,13$, $(-\log K) = -0,53 e + 3,80$
- . Figure 29 - $r = 0,998$
 $e = -1,663 (-\log K) + 14,925$, $(-\log K) = -0,599 e + 3,956$



COMMENTAIRES SUR L'ENSEMBLE (FIGURE 30)

Tous les résultats précédents sont regroupés. On a mis, pour comparer, une courbe identique donnée par TAYLOR T3 pour l'argile.

Le coefficient de corrélation est 0,829 (seulement 0,79 pour $\log e - \log K$).

Les droites de régression ont pour équation

$$e = -1,463 (-\log K) + 15,490 \quad (-\log K) = -0,470 e + 9,268$$

En appliquant la méthode décrite à l'Annexe 1, page 195, on calcule les erreurs types maximales :

$$e \text{ par rapport à } K = 1,84$$

$$K \text{ par rapport à } e = X 11$$

La corrélation est meilleure qu'il ne paraît car, par rapport aux droites d'ajustement, les points qui sont en dessous correspondent à la tourbe japonaise où e est sous évalué par rapport aux autres essais (WZ après séchage à 65°C) et les points qui sont au-dessus correspondent à des essais où K a été calculé à partir de la théorie de TERZAGHI qui, nous l'avons dit plus haut, ne s'applique pas.

3. DONNEES STATISTIQUES.

Les deux paramètres le plus souvent employés quand on parle de tassements sont l'indice de compression C_c et le module oedométrique E' . Pour tous les sols on s'accorde sur le fait que E' n'est constant que dans un très petit intervalle de pression et que, pour un accroissement de contrainte donné, sa valeur croît si la pression augmente. Par contre, comme le dit TERZAGHI, la courbe de consolidation en place, pour les argiles courantes, apparaît comme une droite en coordonnées semi-logarithmiques ($e - \log p$) représentée par $e - e_0 = -C_c \log \frac{p_0 + \Delta p}{p_0}$ où C_c est une constante dans un intervalle de pression étendu.

Pour la tourbe, les Figures 31, 32 pages 106, 107, montrent que C_c n'est pas constant et qu'il décroît notablement si p augmente.

A travers les résultats publiés dans la littérature, nous avons essayé de faire des corrélations entre ces facteurs et l'indice des vides.

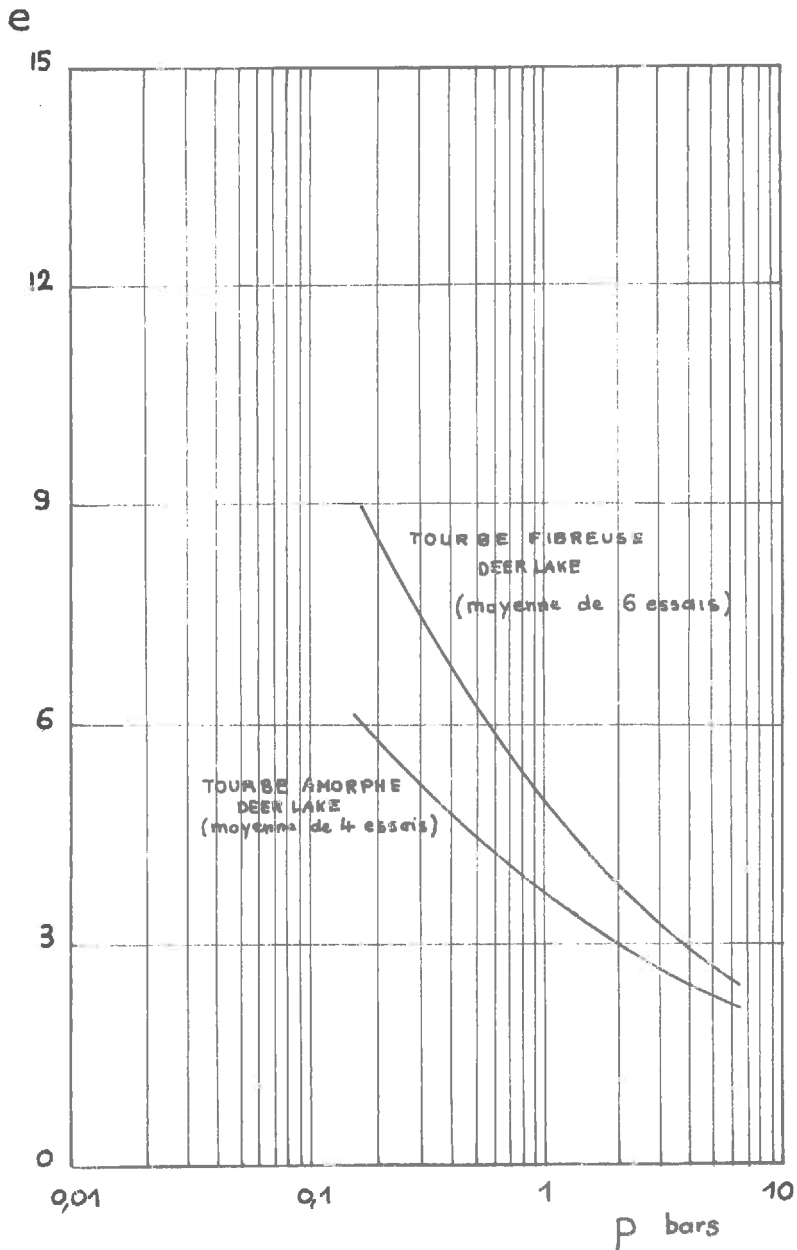
3.1. INDICE DE COMPRESSION.

3.1.1. Définition.

$$C_c = - \frac{\Delta e}{\Delta \log \sigma}$$

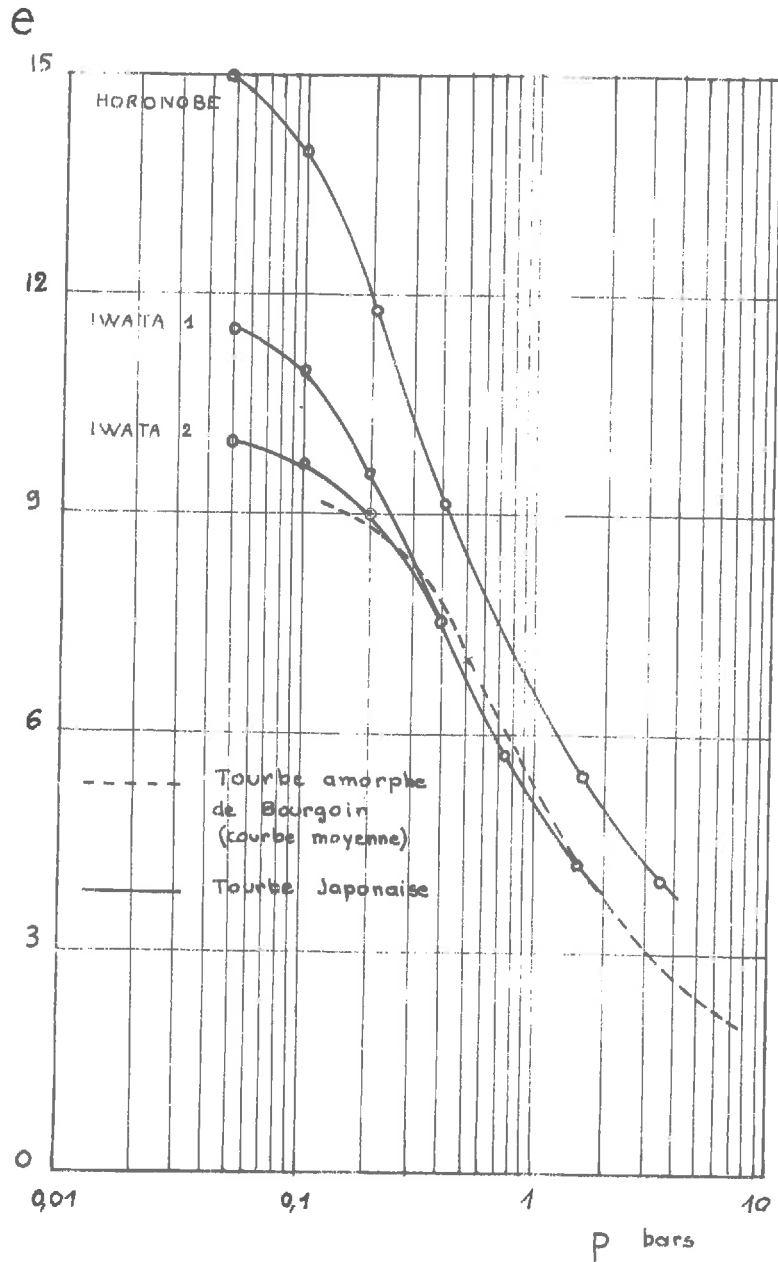
COURBES e - $\log p$ POUR LA TOURBE
mise en évidence d'un C_c variable [L4]

fig: 31



COURBES e - $\log p$ POUR LA TOURBE
mise en évidence d'un C_c variable [W5]

fig: 32



C_c est très grand pour la tourbe. Alors que pour une argile, des valeurs de 2,5 (Montmorillonite) sont extrêmes et que des valeurs inférieures à 1 sont courantes, pour une tourbe on peut atteindre 15 et couramment 4.

MAC FARLANE M6 rapporte qu'au Japon on considère qu'une relation linéaire existe entre e et C_c .

KEENE K4 déduit d'essais de laboratoire et "in situ" les relations suivantes :

$$C_c = 0,01 W \quad 0,6 \leq \frac{C_c}{1+1_0} \leq 0,45 \quad \text{pour les tourbes où PFZ} > 70 \%$$

$$0,25 \leq \frac{C_c}{1+1_0} \leq 0,3 \quad \text{pour les tourbes fortement contaminées}$$

3.1.2. Résultats. =====

Les résultats partiels et globaux avec leur analyse sont présentés sur les Figures 33, 34, 35, 36 page 109 et Figure 37 page 111. Nous justifierons dans le paragraphe 3.3. les formules empiriques suivantes :

$$C_c = 0,75 e \quad C_c = 0,013 W - 0,5$$

Fig 33

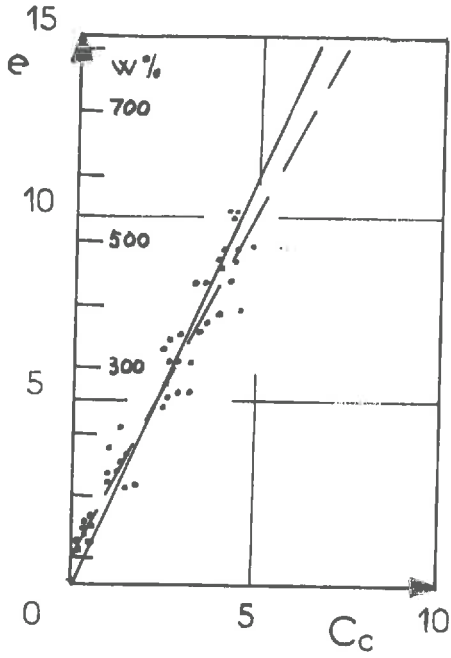


Fig 34

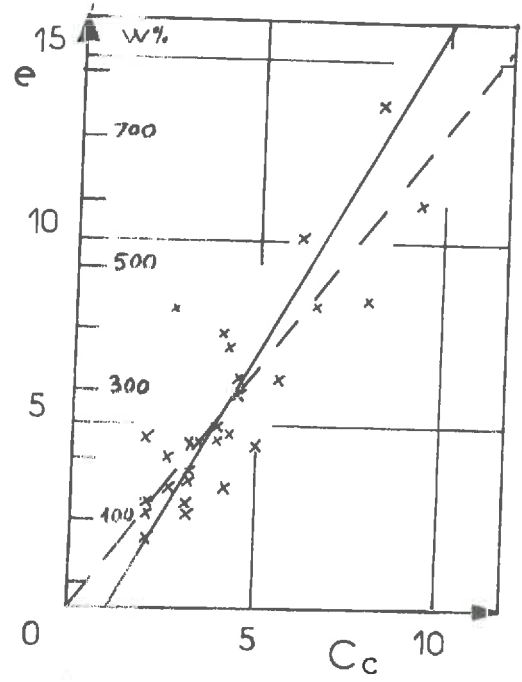


Fig 35

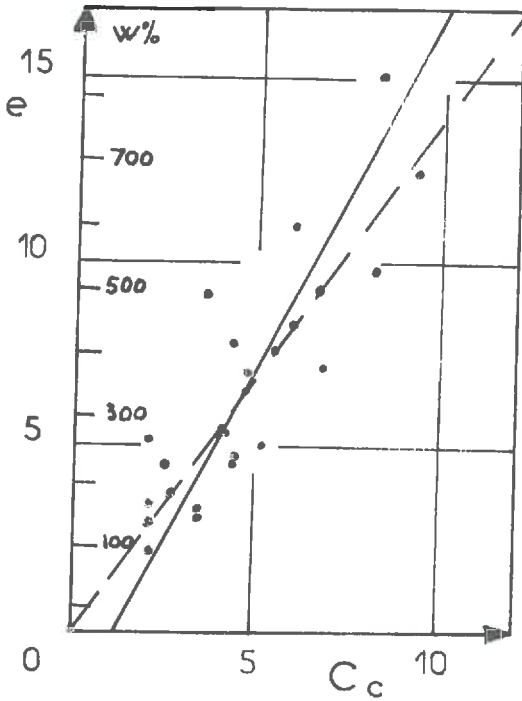
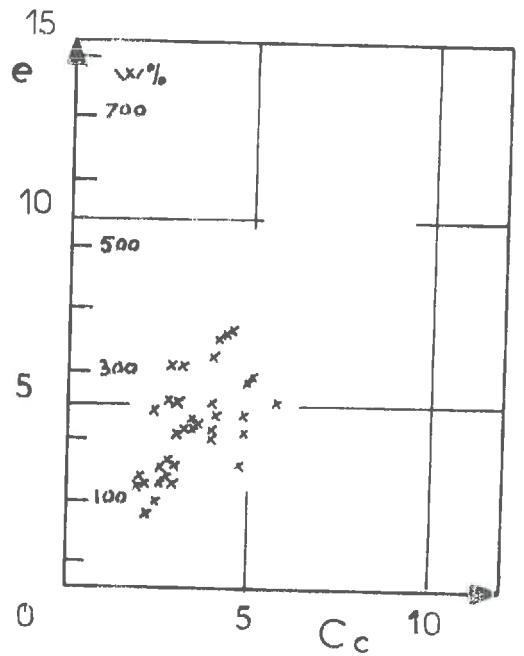
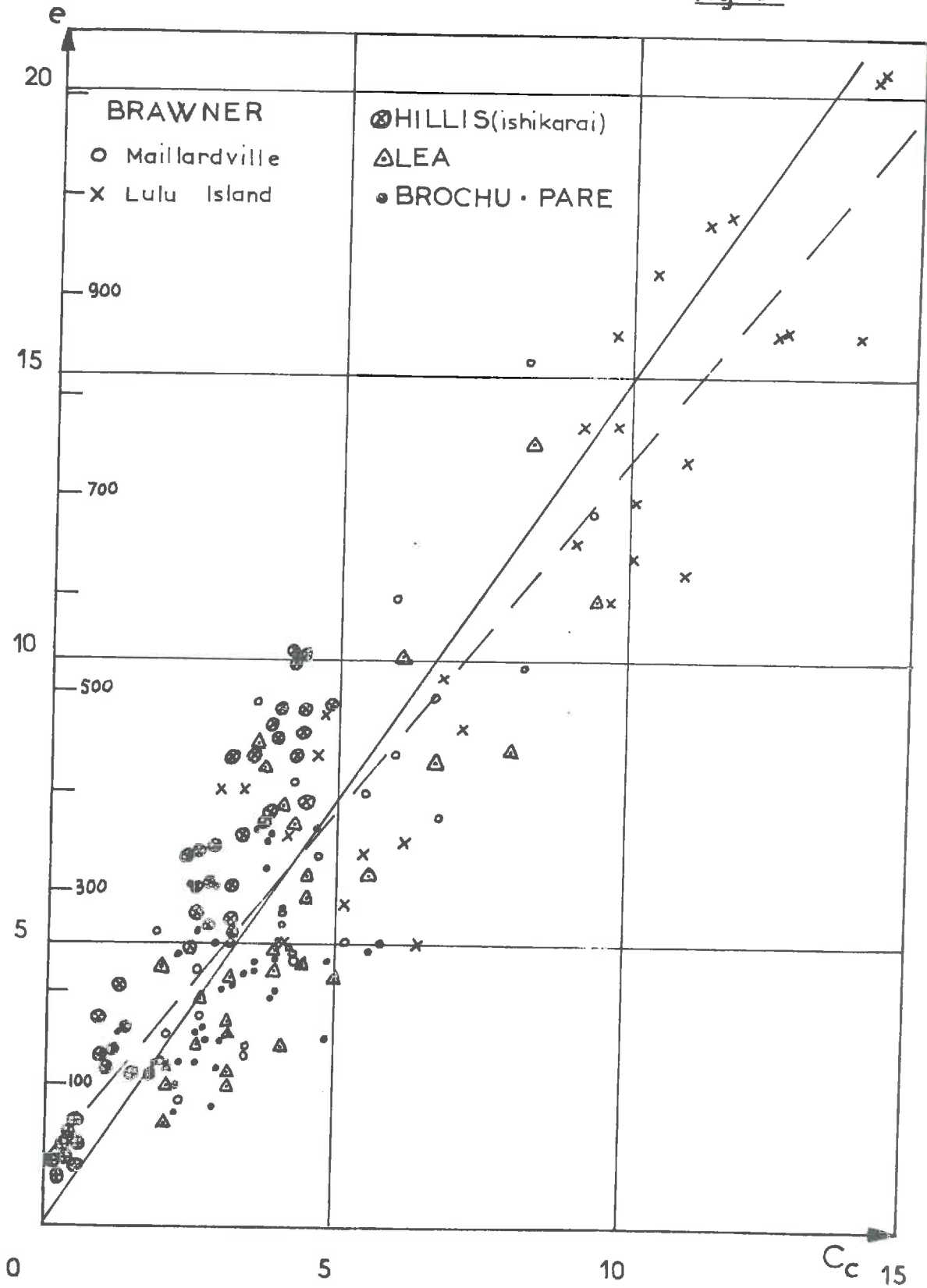


Fig 36



Référence	Tourbe	Essais	Résultats
HILLIS [H13] fig: 33 Pg:	Japonaise (Ishikarai)	pas de précisions W% au Japon souvent après séchage à 65°C	$\tau = 0,96$ $C_c = 0,49e - 0,23$ $e = 1,87 C_c + 0,86$ e plus petits que ceux calculés avec W% à 100°C. explication possible du fait que ces points sont au dessus de la moyenne vu plus loin
LEA [L3] fig: 34 Pg	Canada granulaire très finement fibreuse	W% obtenue après séchage à 100°C pas d'autres précisions.	$\tau = 0,853$ $C_c = 0,57e + 1,10$ $e = 1,27 C_c + 0,10$
BRAWNER [B6,7] fig 35 Pg	Canada (Maillardville) finement fibreuse	W% obtenue après séchage à 110°C δ_3 avec formule de Cook (-1,5 - 2,7)	$\tau = 0,849$ $C_c = 0,53e + 1,18$ $e = 1,34 C_c + 0,30$
BROCHU et al. [B9] fig: 36 Pg:	Canada - Québec (Napierville, Orsainville, S'Elie d'Orford) assez fibreuse, moy. fibreuse, amorphe	W% obtenue après séchage à 100°C δ_3 avec pycnomètre	gamme d'indice des vides trop étroite pour chercher une corrélation.
BRAWNER [B6,7] fig: 37 Pg:	Canada Lulu Island assez fibreuse	W% obtenue après séchage à 110°C δ_3 avec formule de Cook (-1,5 - 2,7)	points ajoutés sur la figure regroupant tous les résultats.

fig 37



COMMENTAIRES SUR L'ENSEMBLE (FIGURE 37).

Le coefficient de corrélation est 0,90.

Les droites de régression ont pour équation :

$$C_c = 0,67 e + 0,06 \qquad e = 1,23 C_c + 1,13$$

En appliquant la méthode décrite à l'Annexe 1 page 195 on calcule les erreurs-types maximales :

C_c	par rapport à e	1,48
e	par rapport à C_c	2,01

Sur la figure d'ensemble, on a une impression de dispersion assez forte, mais en regardant de plus près on voit que les points les plus en dehors sont ceux provenant des résultats japonais, et l'on dit précédemment quelle était la raison.

3.2. MODULE OEDOMETRIQUE.

3.2.1. Définition.

$$E' = \frac{\Delta \sigma'}{\frac{\Delta h}{h_0}} = \frac{\Delta \sigma' (1 + e_0)}{\Delta e}$$

On rappellera que dans l'hypothèse de l'élasticité infinitésimale linéaire, ce qui est faux pour la tourbe, on a :

$$E' = \frac{E (1 - \nu)}{(1 + \nu) (1 - 2\nu)}$$

E module d'YOUNG
 ν coefficient de Poisson

et que l'on démontre

$$\nu = \frac{K_0}{1 + K_0}$$

La tourbe étant très compressible, E' est très faible. Alors que pour des argiles molles E' descend rarement en dessous de 20 kg/cm², on arrive pour les sols purement organique à 1 kg/cm².

De plus, la variation de E' avec e , c'est-à-dire le degré de consolidation, est considérable.

3.2.2. Résultats.

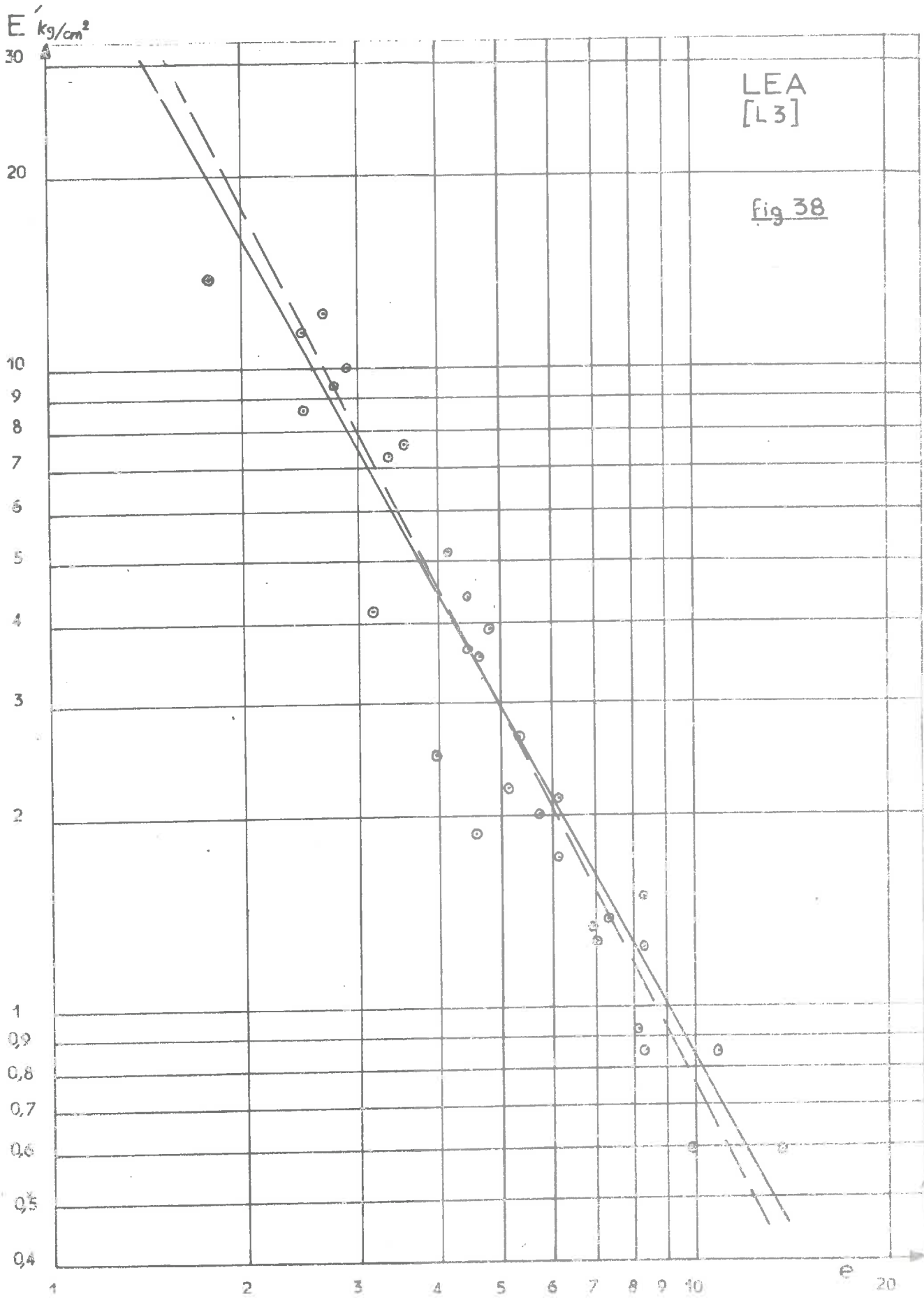
Les résultats partiels et globaux sont présentés sur les Figures 38, 39, 40, 41, 42, 43, pages 114, 115, 116, 117, 118, 119, 120.

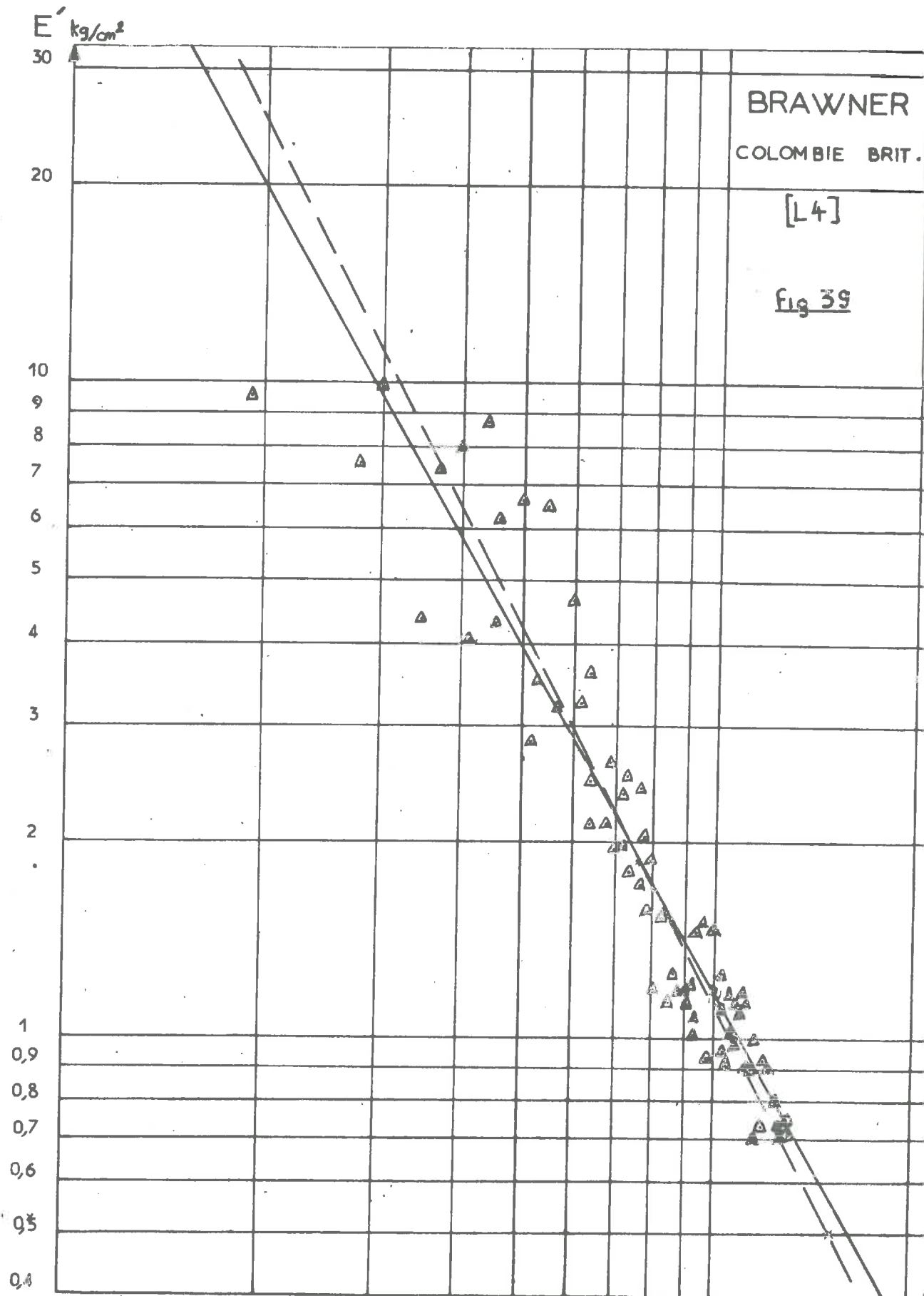
Les calculs montrent que la corrélation $\log e - \log E'$ est meilleure que $e - \log E'$.

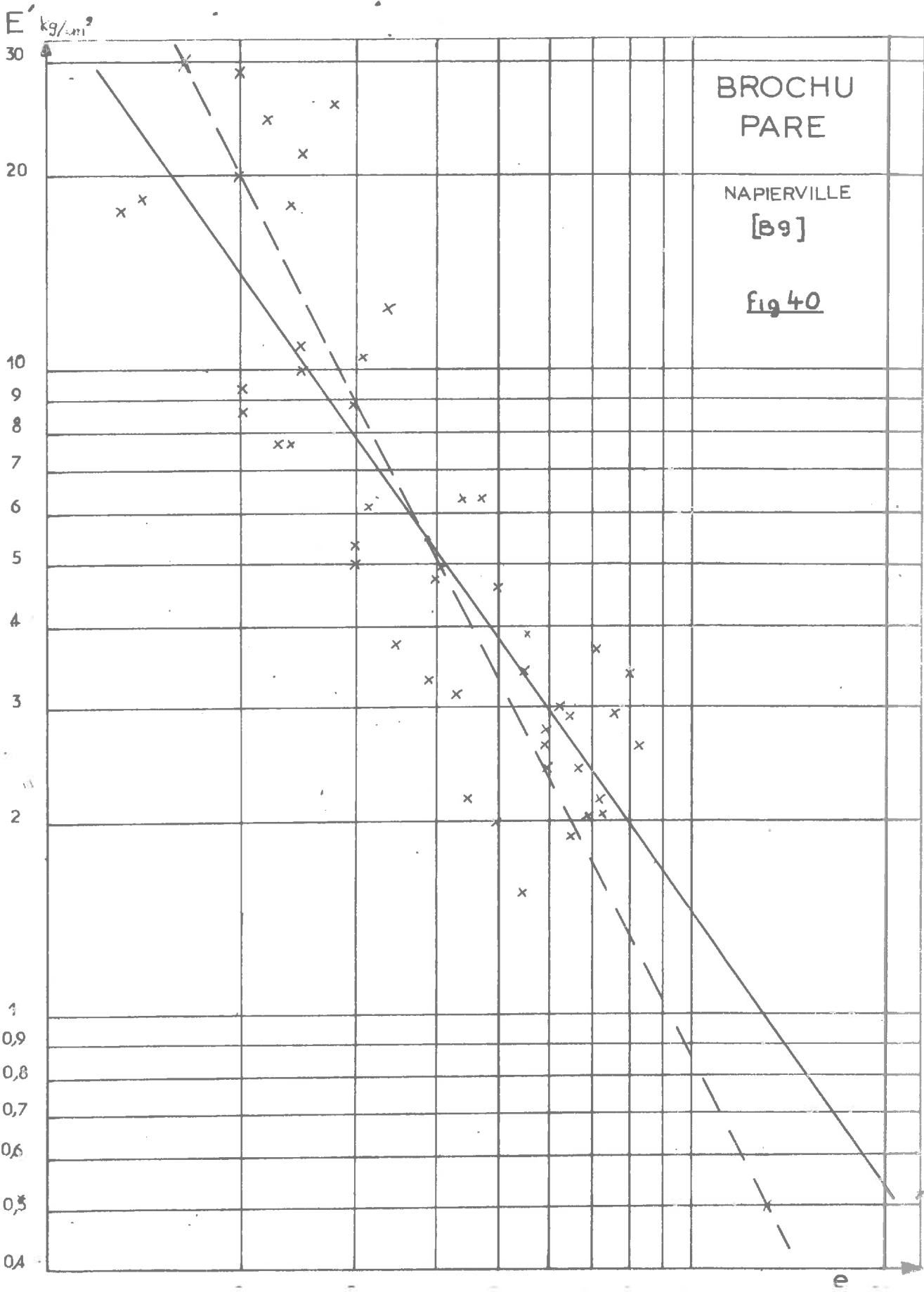
Dans le résultat d'ensemble, nous avons aussi représenté les résultats en échelle arithmétique, ce qui rend visuellement bien compte du phénomène.

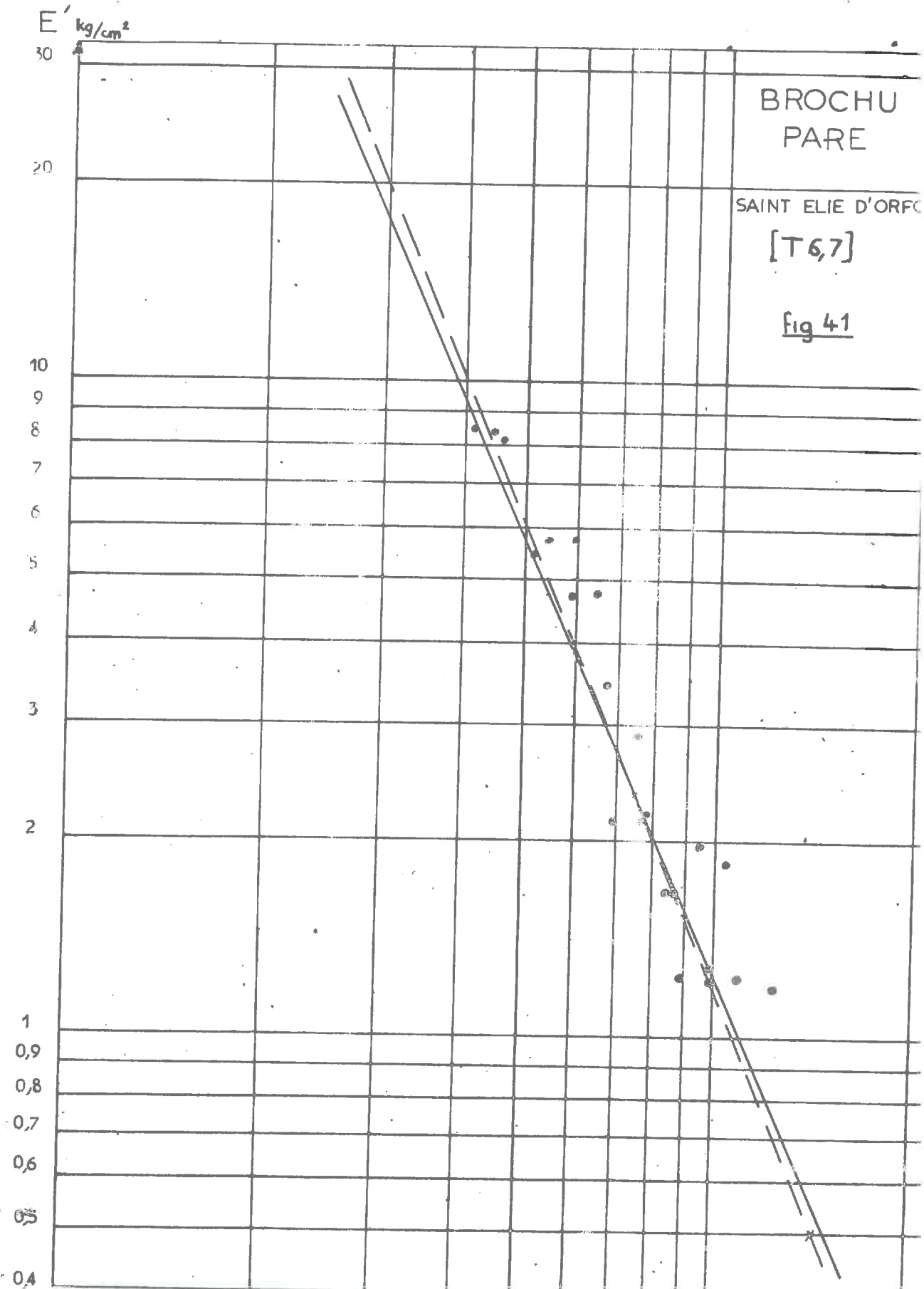
Nous justifierons dans le paragraphe 3.3. la formule empirique suivante, qui est la droite moyenne des deux droites de corrélation :

$$\log E' = 1,8 - 1,75 \log e$$





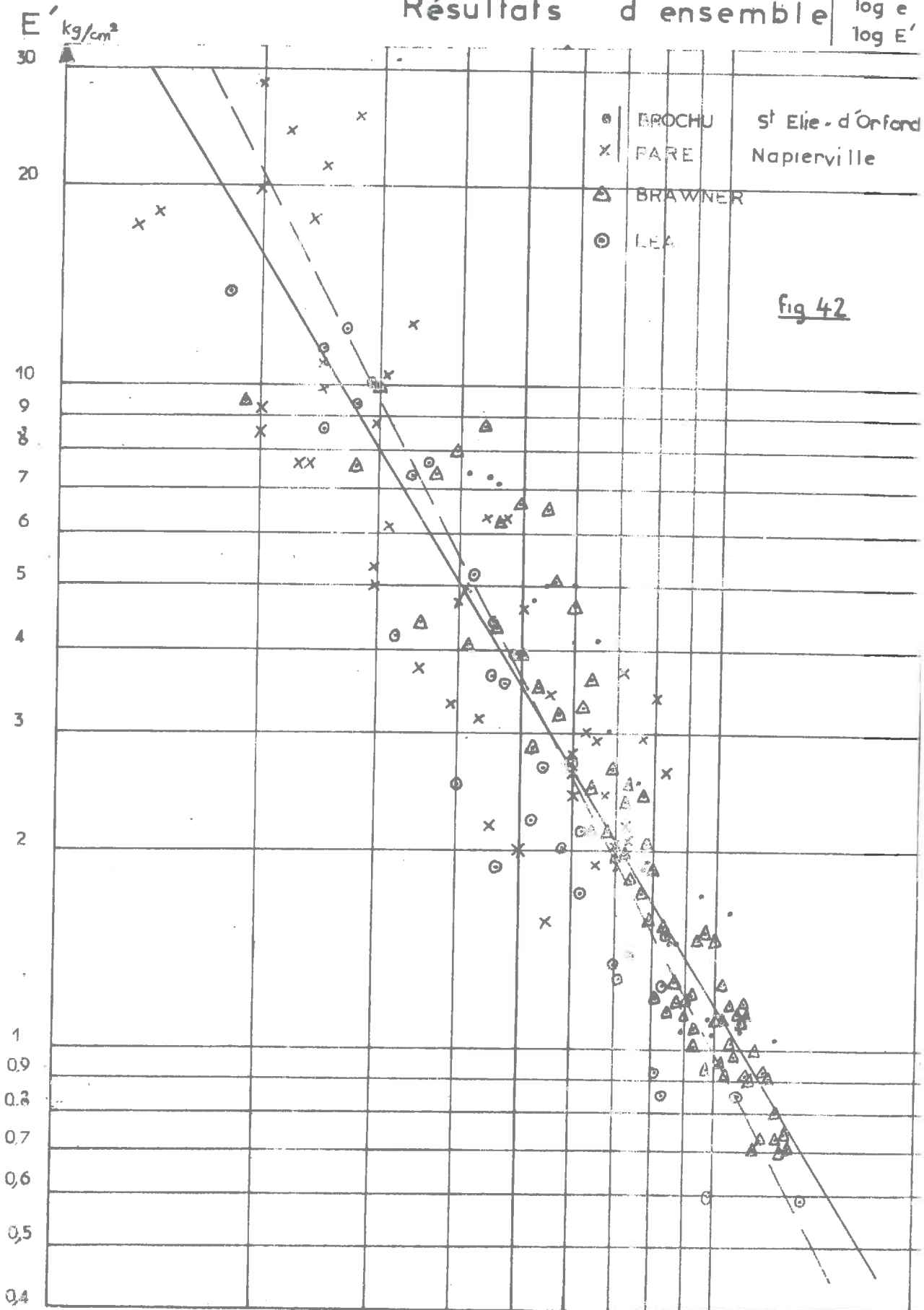


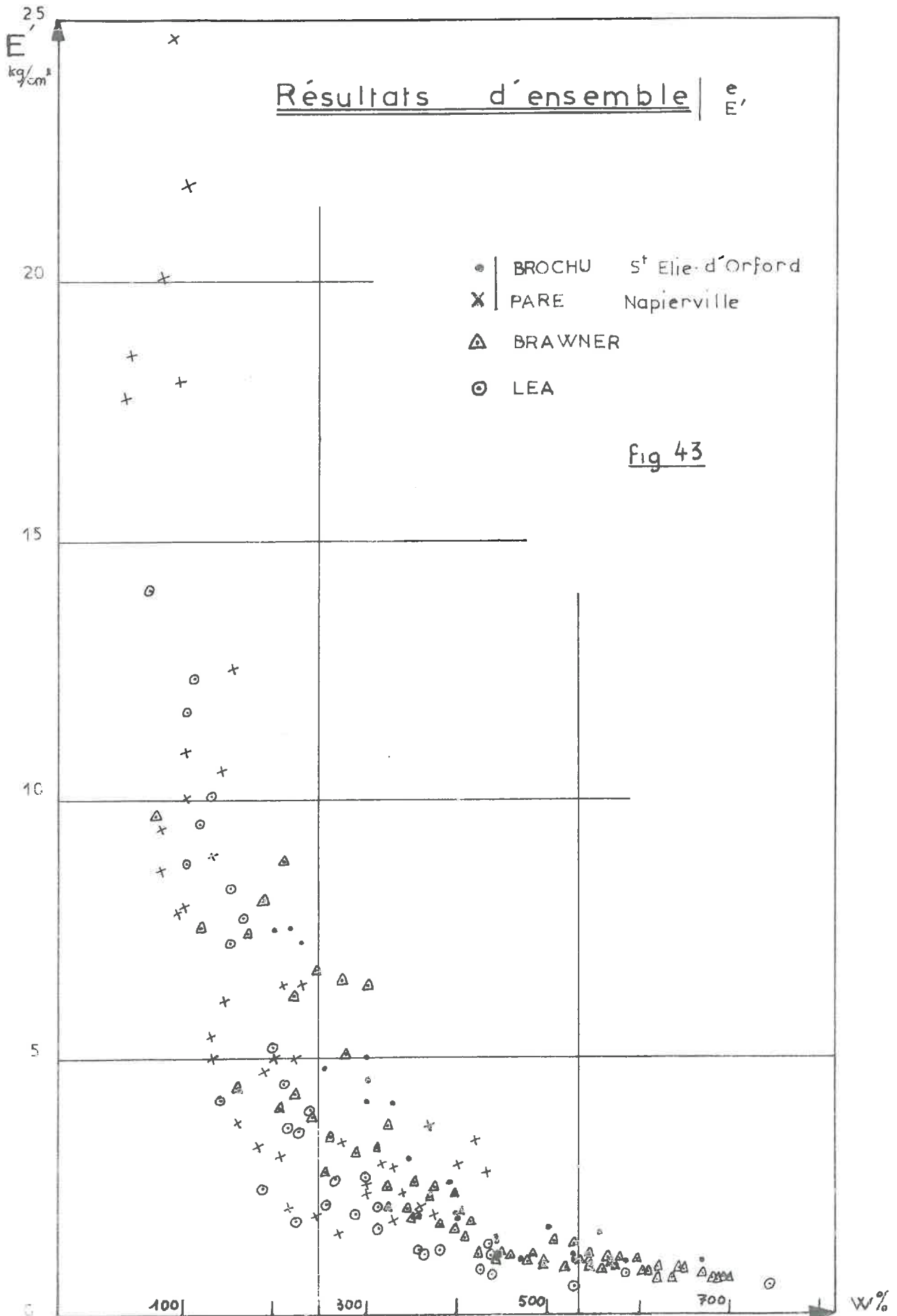


Référence	Tourbe	Essais	Résultats
LEA [L3] fig: 38 Pg:	Canada granulaire très finement fibreuse	w% obtenue après séchage à 100°C pas d'autres préci- sions.	$z = 0,91$ pour $e - \log E'$ $z = 0,95$ pour $\log e - \log E'$ $\log e = -0,506$ $\log E' = +0,957$ $\log E' = -1,822$ $\log e = +1,748$
BRAWNER [L4] fig: 39 Pg:	Canada assez peu fibreuse dans l'ensemble	w% obtenue après séchage à 110°C γs avec la formule de COOK (1,5 et 2,7)	$z = 0,95$ $\log e = -0,52$ $\log E' = +1,02$ $\log E' = -1,73$ $\log e = +1,80$
BROCHU et al. fig: 40,41 Pg: [89] [18,7]	Canada - Québec Napierville fig: Tourbe assez fibreuse. % cendres de 15 à 20 St Elie d'Orford Tourbe amorphe % cendres 10%	w% obtenue après séchage à 100°C δs avec pycnomé- tre.	$z = 0,85$ $\log e = -0,508$ $\log E' = +0,966$ $\log E' = -1,414$ $\log e = +1,574$ $z = 0,96$ $\log e = -0,42$ $\log E' = +1,03$ $\log E' = -2,19$ $\log e = +2,29$

Résultats d'ensemble

log e
log E'





COMMENTAIRES SUR L'ENSEMBLE (FIGURES 42, 43)

La corrélation la meilleure est en log-log.

Le coefficient de corrélation est 0,925.

Les droites de régression ont pour équation :

$$\log e = - 0,53 \log E' + 1,00 \quad \log E' = -1,60 \log e + 1,60$$

En appliquant la méthode décrite à l'Annexe 1 page 195 on calcule les erreurs-types maximales :

$$\begin{array}{ll} e \text{ par rapport à } E' & \times 1,25 \\ E' \text{ par rapport à } e & \times 1,49 \end{array}$$

La corrélation est donc assez bonne et donne un ordre d'idée assez juste.

3.3. COMMENTAIRES SUR CES RESULTATS.

Après l'établissement de ces formules empiriques, il nous asemblé nécessaire de préciser certaines notions pour replacer ces formules vis-à-vis de la théorie.

3.3.1. Généralités et Définitions.

=====

- Dans ce qui suit nous ne tiendrons pas compte de l'influence du temps, mais seulement des tassements finaux obtenus au bout d'un temps infini (en pratique très long). La représentation graphique est constituée de courbes tassement-charge. Si σ représente toujours la charge, le changement de forme est représenté de différentes manières :

ϵ déformation de l'échantillon

e indice des vides

W déplacement de l'échantillon

S déplacement relatif de l'échantillon (rapporté à la hauteur initiale h).

Soit un échantillon de hauteur h placé dans un oedomètre sous la charge σ . On peut définir :

$$d\epsilon = \frac{dh}{h} \quad \text{et} \quad \frac{1+e}{1+e_0} = \frac{h}{h_0}$$

e correspond à h , e_0 à h_0 hauteur de référence constante,

alors $W = h - h_0$ $S = \frac{W}{h_0}$

- A partir de ces définitions, on établit des relations dont nous nous servirons par la suite :

$$\begin{aligned} \cdot d\epsilon &= \frac{dh}{h} = \frac{de}{1+e} & \epsilon &= \text{Log} \frac{1+e}{1+e_0} = \text{Log} \left(1 + \frac{e-e_0}{1+e_0}\right) \\ \text{ou} \quad \exp \epsilon &= \frac{1+e}{1+e_0} & \text{et} \quad e &= (1+e_0) \exp \epsilon - 1 \end{aligned}$$

$$\cdot dW = dh = \frac{h_0}{1+e_0} de \quad \cdot ds = \frac{dW}{h_0} = \frac{dh}{h_0} = \frac{de}{1+e_0}$$

$$\cdot de = \frac{1+e_0}{h_0} dh = \frac{1+e_0}{h_0} dW = (1+e_0) ds$$

$$\cdot e = \frac{h}{h_0} (1+e_0) - 1 = \frac{W}{h_0} (1+e_0) + e_0$$

$$\cdot s = \frac{h}{h_0} - 1 = \frac{e-e_0}{1+e_0} \quad S = \exp \epsilon - 1$$

Si la déformation est petite, on peut écrire :

$$e \approx e_0 \quad h \approx h_0 \quad \text{ce qui entraîne}$$

$$\epsilon \approx \frac{e-e_0}{1+e_0} \approx \frac{de}{1+e_0} \quad d\epsilon = \frac{de}{1+e} \approx \frac{de}{1+e_0}$$

d'où

$$\underline{ds \approx d\epsilon \approx \epsilon}$$

On confond alors ϵ avec sa propre différentielle. C'est une erreur fréquente que de le faire même si la déformation est importante.

- Courbes représentatives.

. Courbe σ - ϵ de pente $-E'$ module oedométrique. Cette courbe est remplacée dans la pratique par :

- courbe σ - S de pente $-F'$
- courbe $\text{Log } \frac{\sigma}{\sigma_0} - e$ de pente $-1/C_c$

Ces courbes définissent :

$$(1) \quad E' = - \frac{d\sigma}{d\epsilon}$$

$$(2) \quad F' = - \frac{d\sigma}{ds}$$

$$(3) \quad C_c = - \frac{de}{d(\text{Log } \frac{\sigma}{\sigma_0})} = - 2,3 \sigma \frac{de}{d\sigma}$$

En utilisant les relations vues plus haut, on a :

$$E' = \frac{2,3 (1+e)}{C_c} \sigma$$

$$F' = \frac{2,3 (1+e_0)}{C_c} \sigma$$

$$E' = F' \cdot \exp \epsilon = \frac{1+e}{1+e_0} F'$$

3.3.2. Lois simples.

=====

Ces définitions posées, on voit que les facteurs sont liés. Examinons quelles incompatibilités entraînent l'adoption d'une loi simple linéaire entre C_c et e , soit $C_c = ae + b$.

$$\text{d'après (3)} \quad \frac{d\sigma}{de} = -2,3 \frac{\sigma}{C_c} = -2,3 \frac{\sigma}{ae+b}$$

$$\text{donc} \quad \frac{\sigma}{\sigma_0} = \left(\frac{ae+b}{ae_0+b} \right)^{-\frac{2,3}{a}} \quad (\sigma_0 \text{ correspond à } e_0)$$

Ceci entraîne pour E' :

$$E' = 2,3 \sigma_0 \frac{1+e}{ae+b} \left(\frac{ae+b}{ae_0+b} \right)^{-\frac{2,3}{a}}$$

et pour F' :

$$F' = 2,3 \sigma_0 (1+e_0) \frac{1}{ae+b} \left(\frac{ae+b}{ae_0+b} \right)^{-\frac{2,3}{a}}$$

Ce qui peut s'écrire :

$$\text{Log } \frac{F'}{\sigma_0} = \text{Log } 2,3 + \frac{2,3}{a} \text{Log } (ae_0+b) - \text{Log } (1+e) - \left(\frac{2,3}{a} + 1 \right) \text{Log } (ae_0+b)$$

$$(4) \quad \text{Log } \frac{F'}{\sigma_0} = \lambda - \mu \text{Log } (ae+b) \quad \lambda, \mu \text{ cste}$$

Nous nous intéresserons surtout à F' car dans la pratique, c'est ce que nous avons fait pour nos lois statistiques, on confond E' et F' ce qui est inexact.

(4) nous montre qu'une loi $C_c = ae+b$ est incompatible avec $\text{Log } \frac{F'}{\sigma_0} = v + w \text{Log } e$.

$$\text{De même, une loi } C_c = a(1+e) \text{ qui entraîne} \\ \text{Log } \frac{F'}{\sigma_0} = \alpha + \beta \text{Log } \frac{1+e}{1+e_0}.$$

$$\text{Par contre, une loi } C_c = ae \text{ entraîne :} \\ \text{Log } \frac{F'}{\sigma_0} = c - d \text{Log } e \quad d = \frac{2,3}{a} + 1 = \text{cste}$$

$$c = \text{Log } \left[\frac{2,3}{a} (1+e_0) \right] + \frac{2,3}{a} \text{Log } e_0 = \text{cste}$$

On a donc établi que si statistiquement on trouve des lois linéaires entre C_c et e d'une part et $\text{Log } e$ $\text{Log } F'$ d'autre part, elles ne peuvent être, pour être compatibles, que de la forme (F' et E' confondus) :

$$\underline{C_c = ae \quad \Leftrightarrow \quad \text{Log } \frac{E'}{E_0} = c - \text{Log } e}$$

En tenant compte des équations trouvées pour les droites de régression dans les paragraphes 3.1. et 3.2., on peut donc écrire deux lois statistiques compatibles :

$$\underline{C_c = 0,75 e \quad \log E' = 1,8 - 1,75 \log e}$$

Il serait bien sûr possible de trouver d'autres lois en essayant des corrélations diverses ($\text{Log } (1+e) - \text{Log } E'$ par exemple). Ce n'est pas notre but, qui était de montrer qu'on ne doit pas adopter des lois statistiques empiriques sans contrôler s'il n'existe pas une incompatibilité flagrante vis-à-vis des définitions.

4. DONNEES THEORIQUES.

4.1. MECANISME DE LA CONSOLIDATION.

4.1.1. Constatations expérimentales.

=====

Les courbes de consolidation $e - \log t$ n'ont pas toujours la forme classique en S. Si pour les premiers chargements, qui

correspondent à un $\frac{\Delta p}{P}$ infini ou très grand, donc à une vitesse de déformation élevée, on retrouve la forme habituelle, par contre les chargements suivants où $\frac{\Delta p}{P}$ est petit et la vitesse de déformation lente, ce n'est pas la même chose, comme le montre la Figure 44 page 128.

De plus, si dans le premier cas il semble que l'on puisse parler de "phase primaire" car le point d'annulation de la pression interstitielle correspond à une variation dans la courbe, il n'en est pas de même dans le second.

D'autre part, l'indice des vides initial joue un rôle certain dans l'évolution de la déformation en fonction du temps et de la charge.

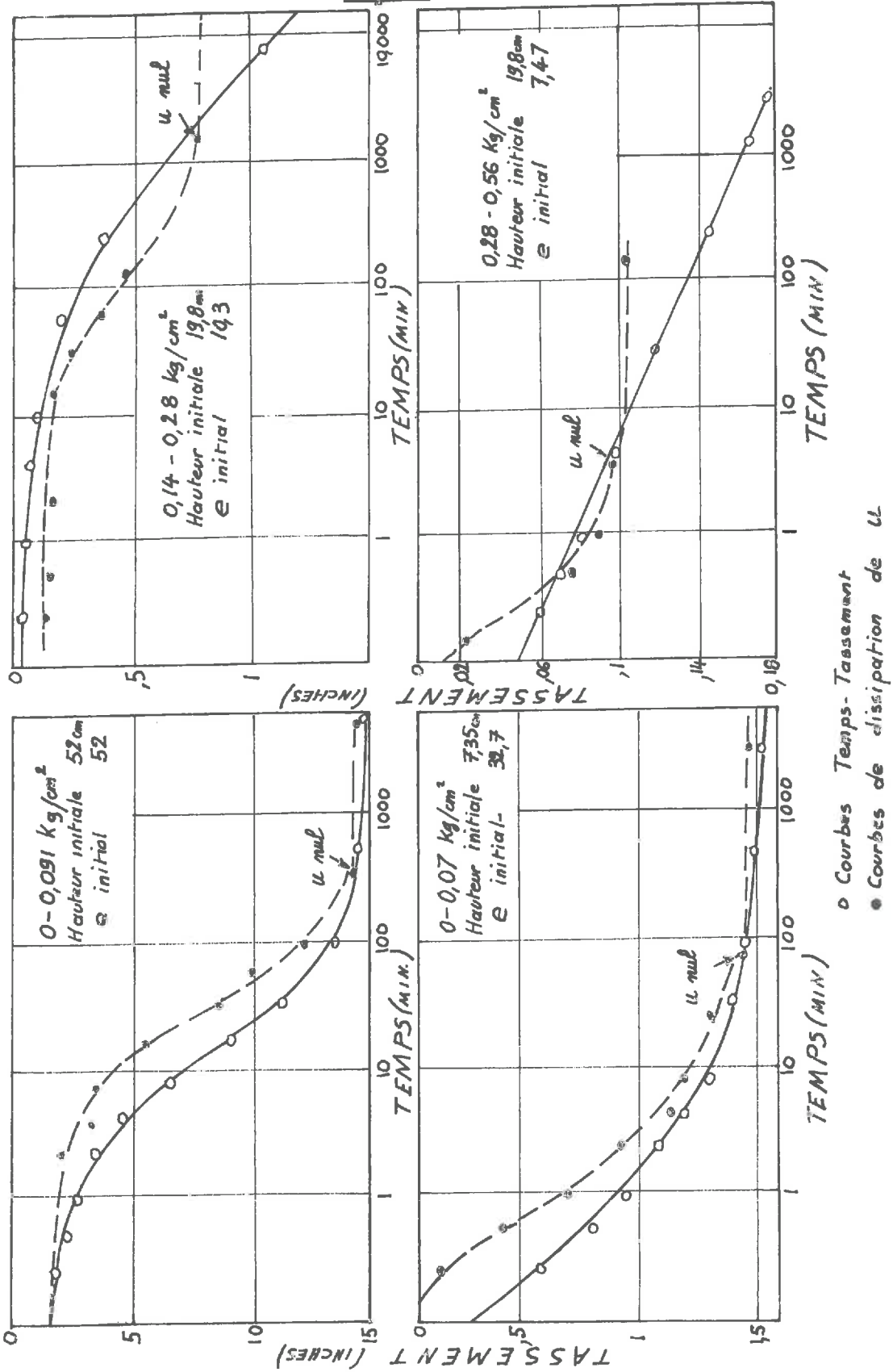
Ces considérations, s'ajoutant aux caractéristiques générales décrites au paragraphe 1 de ce chapitre, nous font rechercher le mécanisme de consolidation de la tourbe. Nous reprendrons les idées de BARDEN B3 pour essayer de donner des explications.

4.1.2. Mécanisme visqueux.

=====

Ce mécanisme visqueux est dépendant de la nature de l'eau liée qui existe certainement en forte proportion dans les tourbes amorphes, bien décomposées dont une importante partie est colloïdale.

Fig 44 [53]



4.1.21. Viscosité structurale.

Elle a été mise en relief pour les sols organiques par SCHROEDER et WILSON S3 qui ont essayé de décrire qualitativement la consolidation de la tourbe.

Deux choses se mêlent et jouent des rôles différents selon la vitesse de déformation elle-même régie par l'accroissement de charge et l'indice des vides initial :

- a)- Le drainage de l'eau (dissipation de la pression interstitielle),
- b)- La déformation proprement dite du squelette (produite par l'accroissement de contrainte effective). L'expérience semble prouver que cette déformation est essentiellement visqueuse non linéaire.

La constatation suivante met en relief le rôle de e et des deux facteurs précédents : soit deux échantillons de hauteurs différentes constitués du même matériau. Effectuons sur eux un essai oedométrique. Au premier chargement, l'indice des vides du plus grand échantillon décroît moins vite que celui de l'autre car le drainage de l'eau est plus difficile et interdit une grande vitesse de déformation. Au second chargement, les deux échantillons n'ont plus le même e . Le plus haut étant moins tassé que l'autre verra son squelette offrir une résistance visqueuse plus faible que le plus petit au second chargement. Ainsi, le drainage tend à retarder le tassement le plus haut, mais la résistance visqueuse tend à l'augmenter.

Par divers essais oedométriques sur de la tourbe amorphe remaniée, on peut construire dans un diagramme $\sigma - \frac{d\varepsilon}{dt}$ les courbes à e constant (Figure 45 page 131). C'est un véritable diagramme rhéologique du matériau, mais en contrainte totale.

Pour une étude fondamentale, il faut séparer contrainte effective et pression interstitielle (les paramètres rhéologiques quand on ne considère que les contraintes totales changent en fonction de l'essai, du système de contraintes, des conditions de drainage, alors que si la séparation est faite on considère des éléments infinitésimaux et on intègre suivant les conditions aux limites). Ceci a été fait qualitativement et les auteurs introduisent des courbes d'écoulement dues au drainage et dues à la viscosité structurelle (Figure 46 page 132).

La contrainte totale se décompose en une contrainte effective agissant sur le squelette et une pression interstitielle agissant sur le drainage.

On remarquera que rien n'est linéaire.

Les courbes ainsi décomposées par SCHROEDER et WILSON sont purement arbitraires et on peut imaginer d'autres combinaisons pour retrouver le diagramme rhéologique en contrainte totale qui lui est expérimental.

La notion de viscosité structurelle a été introduite par OSTWALD qui utilise une loi polynomiale pour la décrire.

Fig 45 [53]

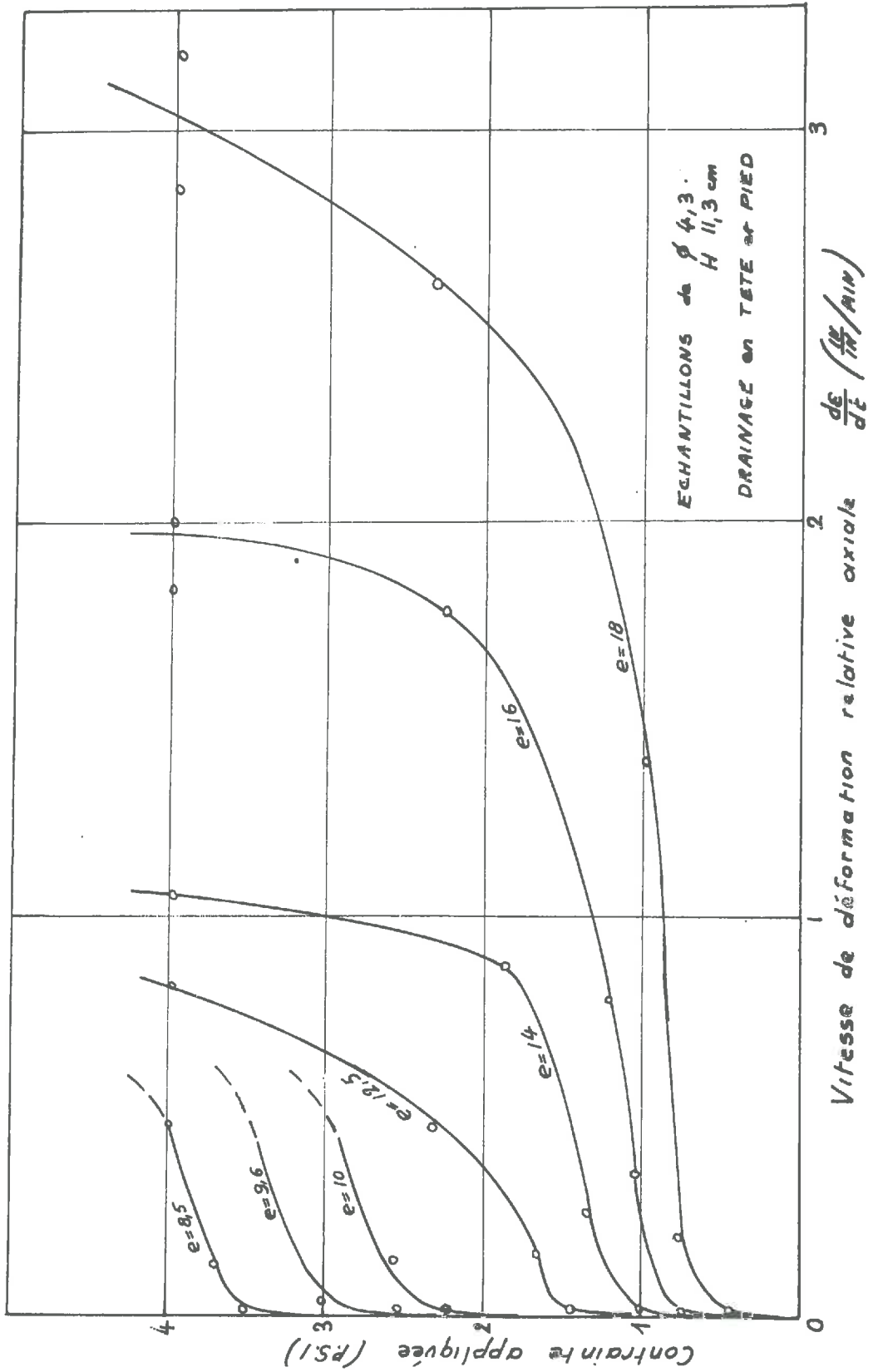


DIAGRAMME RHEOLOGIQUE Fig 46 [53]

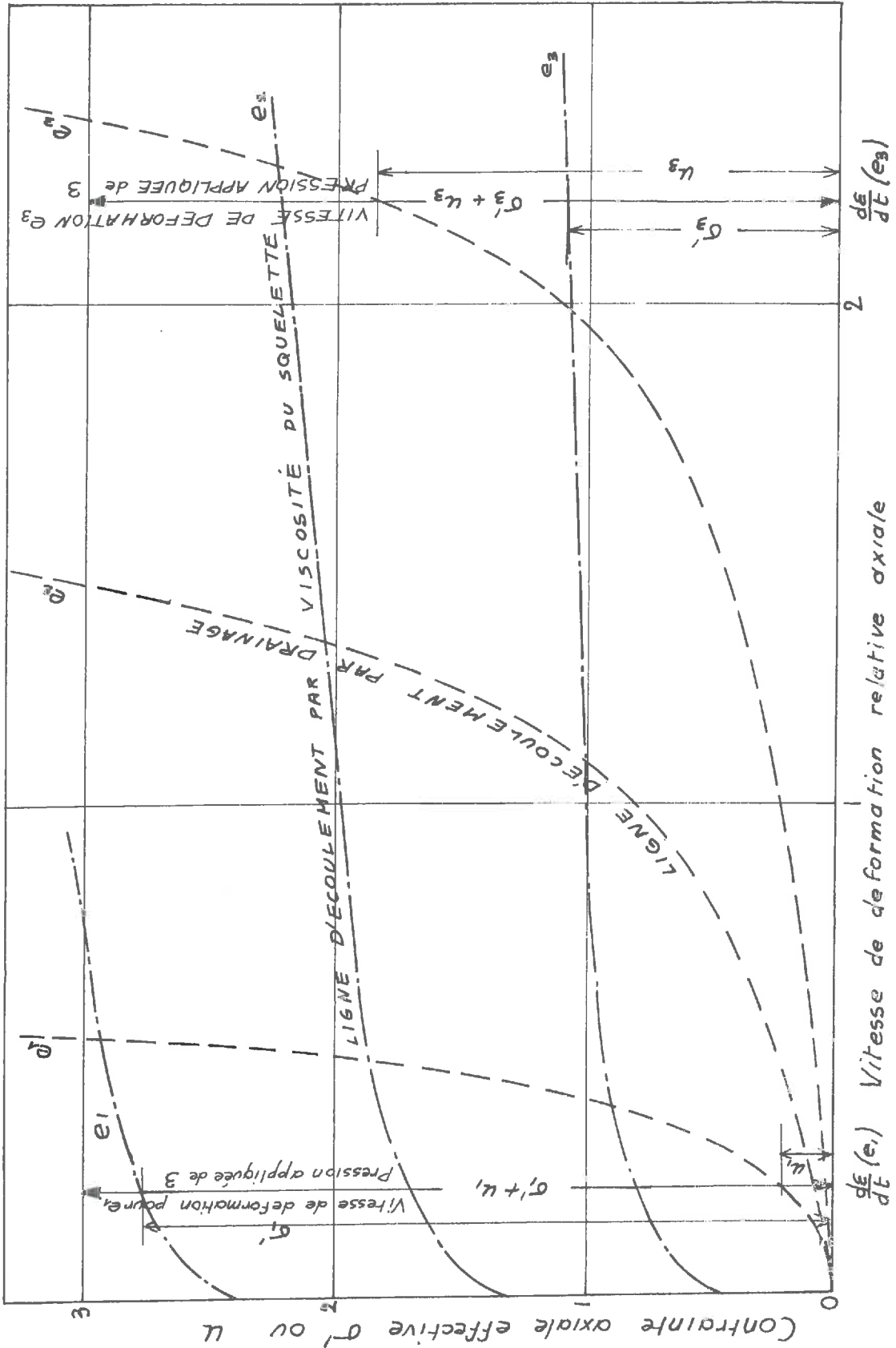


Fig 45 [53]

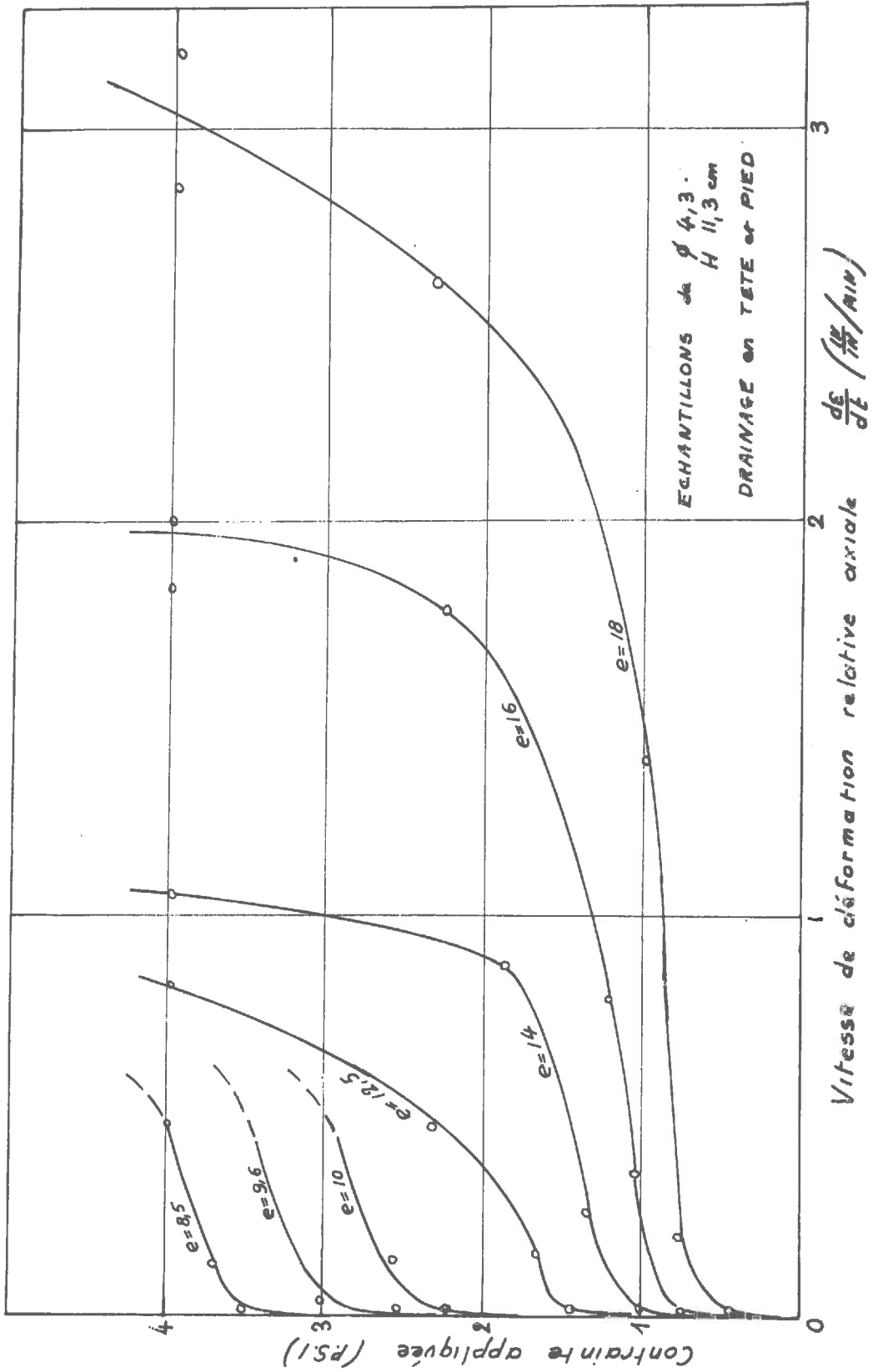
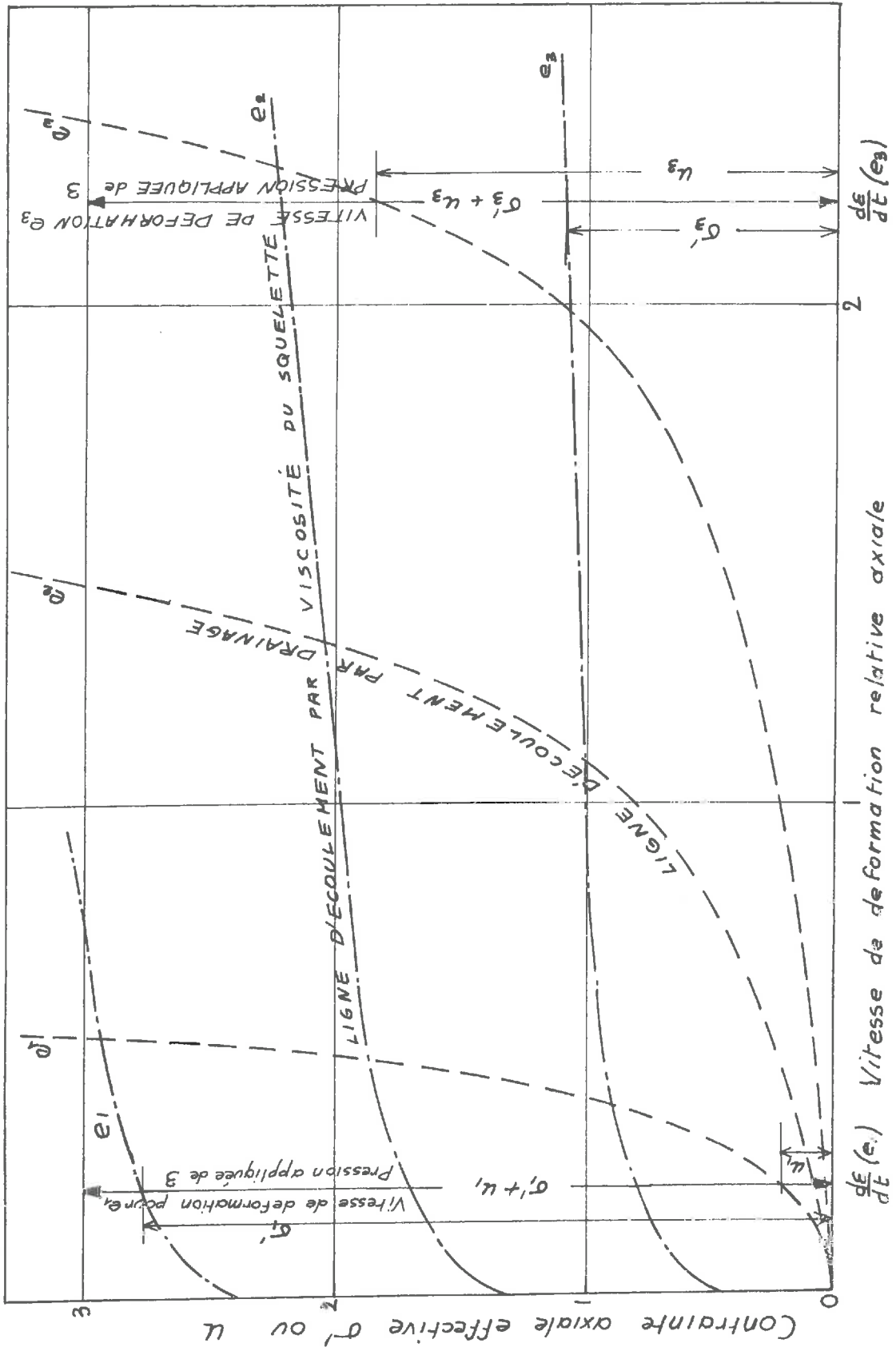


DIAGRAMME RHEOLOGIQUE Fig 46 [53]



Si on se réfère à la Figure 47, page 136 , on voit qu'au premier chargement d'un échantillon (grande vitesse de déformation), on est en A, où la résistance visqueuse est τ_A correspondant à un petit coefficient de viscosité. Ensuite, la vitesse de déformation décroissant, on passe en B où la résistance visqueuse est τ_B correspondant à un grand coefficient de viscosité.

Ceci explique en partie le rôle joué par $\Delta p/p$ sur les formes des courbes temps-tassement car un fort $\Delta p/p$ entraîne une grande vitesse de déformation et inversement.

4.1.22. Thixotropie.

SCHROEDER et WILSON n'en tiennent pas compte, mais elle va intervenir pour modifier l'écoulement visqueux apparent, comme le montre bien la Figure 48, page 136 . Son rôle est d'accroître le coefficient de viscosité en fonction du temps, alors que l'effet purement structural l'accroît en fonction inverse de la vitesse de déformation.

4.1.3. Mécanisme des micropores.

=====

Cet autre mécanisme, décrit par ADAMS A4 et BARDEN B2 pour des tourbes fibreuses, semble attaché au fait que l'eau est peu liée dans ces dernières, car la masse colloïdale n'est qu'une faible partie de la structure de l'ensemble. Les principes

physiques de base de ce processus ne sont pas encore déterminés et aucune solution n'existe à ce jour. Nous nous contenterons de donner l'aspect qualitatif.

La consolidation de la tourbe fibreuse apparaît au laboratoire comme "in situ" divisée en deux parties. La première est une phase rapide de compression assez importante (quelques minutes au laboratoire, quelques jours "in situ"). Apparaît ensuite une phase lente, de plus faible amplitude, linéaire avec $\log t$. Cette seconde période peut apparaître comme "secondaire", mais la pression interstitielle ne s'annule pas (BARDEN B3) et prouve qu'on a encore une "phase primaire" au sens de TERZAGHI.

Ces faits peuvent s'expliquer par la présence de deux structures distinctes.

Une est constituée par un système de macropores, dont le drainage initial gouverne la première phase. Celle-ci achevée, la charge se transmet à des systèmes isolés de micropores constitués par la tourbe plus homogène et compacte, systèmes reliés entre eux par les macropores. Le processus de drainage selon TERZAGHI se passe alors dans chaque élément.

Cette analyse explique un peu le fait que la première phase est fonction directe de la taille de l'échantillon et de la charge alors que la seconde est apparemment moins liée à ces deux facteurs.

Cette conception de la consolidation, enchaînement de consolidations selon TERZAGHI, rendrait le phénomène linéaire, mais il vient se greffer la forte décroissance de K qui perturbe tout et qui peut expliquer l'importance du facteur $\Delta p/p$ qui ne joue aucun rôle si le phénomène est linéaire.

Les deux mécanismes évoqués sont de nature physique différente. Nous parlerons surtout du premier dans l'étude théorique qui suit.

4.2. THEORIES DE LA CONSOLIDATION.

Notre but n'est pas de rappeler en détail toutes les théories mathématiques élaborées depuis TERZAGHI. Nous poserons les problèmes et verrons comment BARDEN E2,3 a essayé de les résoudre.

4.2.1. Généralités.

=====

Dans le premier mécanisme décrit, on a vu que deux phénomènes se superposaient :

- l'écoulement de l'eau (chute de u) régi par la loi de DARCY (ou analogue),
- la déformation du squelette régie par une loi de comportement. Ce qui a été dit tend à prouver que la loi est viscoélastique.

Pour la loi de comportement, on peut chercher un modèle rhéologique. La trame solide du squelette sera représentée par un ressort (élasticité linéaire ou pas) et la trame solide liée par des forces visqueuses par un dashpot (linéaire ou pas). Un accroissement de charge Δp est pris selon :

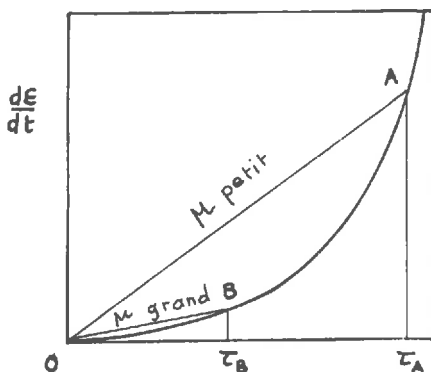
$$(1) \Delta p = \Delta \sigma' + p_v + u$$

Δp accroissement de charge totale

$\Delta \sigma'$ accroissement de charge sur le ressort

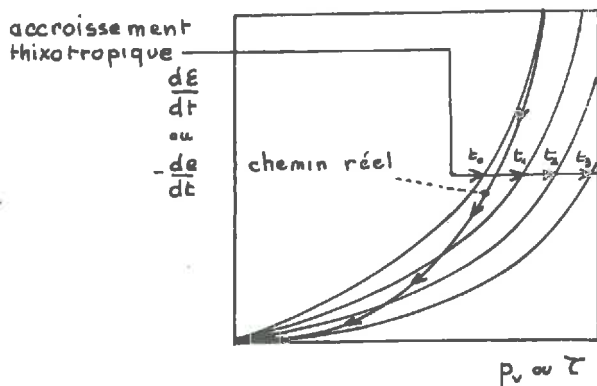
p_v accroissement de charge sur le dashpot

u excès de pression interstitielle.



VARIATION DE LA VISCOSITE EFFECTIVE

Fig 47



ACCROISSEMENT THIXOTROPIQUE DE LA VISCOSITE EFFECTIVE

Fig 48

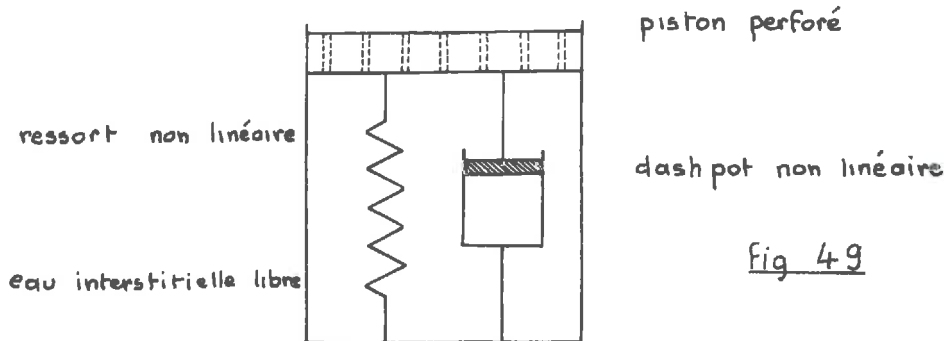


Fig 49

ANALOGIE POUR LA CONSOLIDATION D'UN PETIT ELEMENT

Une analogie mécanique de l'ensemble est représentée sur la figure 49 page 136, où la déformation du squelette est figurée par un solide de KELVIN (ressort en parallèle avec un dashpot) et l'écoulement de l'eau par un cylindre fermé par un piston troué. C'est l'analogie classique de TERZAGHI avec un dashpot en plus.

A l'annulation de u , la vitesse de déformation est uniquement gouvernée par le transfert de toute la contrainte du dashpot au ressort..

4.2.2. Ecoulement de l'eau.

=====

Dans la théorie unidimensionnelle, le gradient hydraulique est $i = -\frac{1}{\gamma_w} \frac{\partial u}{\partial z}$.

La loi de DARCY est parfois généralisée sous la forme $v = ki^n$, mais pour la tourbe on n'a pas constaté que $n \neq 1$.

La perméabilité K n'est pas constante. On a vu que :

$$e = I \text{ Log } \frac{K}{K_n} = f(\sigma')$$

I cste

K_n valeur fictive de K pour $e = 0$.

Pour la tourbe on peut donc écrire, de façon générale, la loi de DARCY sous la forme :

$$(2) \quad v = -\frac{K_n}{\gamma_w} (\exp f(\sigma')) \frac{1}{I} \frac{\partial u}{\partial z}$$

4.2.3. Modèle rhéologique du squelette.

=====

4.2.31. Le ressort.

Il représente la compressibilité de l'élément quand l'équilibre final est atteint.

Les courbes ($e - \sigma'$) montrent que pour la tourbe le ressort n'est pas linéaire car la compressibilité décroît quand la contrainte effective croît. De même C_c n'est pas une constante.

Ceci prouve que les lois généralement adoptées dans les calculs ne s'appliquent pas :

$$(3) \quad \frac{\partial e}{\partial \sigma'} = - a_v \quad \text{linéarité donnée par TERZAGHI dans sa théorie}$$

$$(4) \quad \frac{\partial e}{\partial \sigma'} = - \frac{C_c}{\sigma'} \quad \text{relation logarithmique empirique donnée par TERZAGHI pour l'argile}$$

Les corrélations étudiées au début du chapitre montrent que pour la tourbe une loi du type $\text{Log } e = - J \text{ Log } \frac{\sigma'}{\sigma'_n}$ est assez juste. (J est e , σ'_n valeur fictive de σ' pour $e = 0$) soit :

$$(5) \quad \frac{\partial e}{\partial \sigma'} = - J \frac{e}{\sigma'}$$

On peut signaler que BARDEN et BERRY B2 ont fait, pour des argiles, des calculs avec une loi du type (4) et que, pour eux, l'introduction de cette non linéarité est peu importante.

Pour la simplicité des calculs et pour diminuer le nombre de paramètres, il peut donc être préférable de garder une loi linéaire du type (3).

4.2.32. Le dashpot.

Les deux facteurs à considérer sont :

- . la viscosité structurale,
- . la thixotropie.

SCHIFFMAN S 1 propose comme loi générale :

$$(6) \quad \frac{1}{\mu} = \sum_0^k \phi_n \cdot \exp C_n \tau + \sum_0^p \phi_m \cdot \exp -C_m t$$

Il ne semble pas actuellement possible d'introduire une telle loi dans la théorie de la consolidation, car le traitement mathématique est impossible et la détermination physique des paramètres problématique. BARDEN B3 estime qu'on peut négliger le deuxième terme qui représente la thixotropie (accroissement de μ avec le temps), quitte à l'introduire intuitivement dans le résultat final. Il estime d'autre part que pour un traitement mathématique il est préférable d'adopter la loi polynomiale d'OSTWALD pour représenter la viscosité structurale que la loi exponentielle de SCHIFFMAN.

$$\frac{d\epsilon}{dt} = \sum_1^m A_n \tau^n \Rightarrow \frac{1}{\mu} = \sum_1^m A_n \tau^{n-1}$$

Quand on introduit une telle loi dans la théorie de la consolidation, on remplace conventionnellement $\frac{d\varepsilon}{dt}$ par $\frac{de}{dt}$ et τ par p_v :

$$(7) \quad - \frac{de}{dt} = \frac{\sum_{i=1}^n B_i}{1} p_v^n$$

4.2.4. Loi générale. =====

Il est actuellement impossible de tenir compte des facteurs que l'on vient d'énumérer. RAYMOND BLOU a fait un calcul complet, sans tenir compte de la viscosité, en utilisant la formule (2) combinée avec (4). Cette méthode est exposée en détail dans la thèse de PUTZ [28]. Pour la tourbe le phénomène visqueux étant essentiel, cette méthode ne semble pas très bien adaptée.

On a vu que pour introduire pratiquement une loi de viscosité on était conduit à faire des simplifications plus ou moins justifiées.

Il est cependant certain que le développement des méthodes numériques d'intégration sur ordinateur permettront d'introduire des lois de comportement de plus en plus complexes. Il faut toutefois faire attention à ne pas introduire des paramètres impossibles à mesurer expérimentalement car aucune application pratique de la théorie n'est alors possible.

4.2.5. Critique des lois existantes.

Avant de décrire la méthode de BARDEN B3 , nous présenterons une critique faite par ce même auteur de quelques-unes des lois proposées depuis TERZAGHI.

-TAYLOR et MERCHANT T4 , ISHII I3 , TAN T 1 , GIBSON et LO G3 , FLORIN F7 , ont proposé, pour le squelette, un ressort représentant la phase primaire en série avec un élément de KELVIN pour la phase secondaire. Ce modèle est trop simplifié pour donner des résultats conformes à la réalité. Le dashpot étant linéaire, $\frac{\Delta P}{P}$ n'intervient pas et la consolidation secondaire en fonction de $\log t$ n'est pas représentée par une droite.

- TAN T 1 , SCHIFFMAN et al S 2 , THOMPSON T9 , ont étudié séparément la partie isotrope et déviatoire du tenseur des contraintes en consolidation unidimensionnelle, et proposé des modèles similaires à nombreux paramètres. Ces modèles sont équivalents à un grand nombre d'éléments de KELVIN linéaires en série, l'élément du haut étant dégénéré en un ressort pour représenter une phase primaire. Il semble que le grand nombre d'éléments linéaire essaye en fait de traduire un phénomène qui ne l'est pas.

Le ressort supérieur est fait pour représenter le tassement instantané du squelette sous une contrainte effective. Dans le modèle proposé par BARDEN B3 (cf. plus loin), le fait de considérer une viscosité non linéaire permet de représenter non seulement cette compression "instantanée" mais sa proportion vis-à-vis de la compression totale en fonction de $\frac{\Delta P}{P}$. Ainsi, pour BARDEN, la présence de ce ressort ne s'impose pas.

- TAYLOR T2 fut sans doute le premier à essayer un modèle non linéaire. Ne disposant pas de calculatrice puissante, il fut obligé de simplifier son modèle en un schéma de KELVIN linéaire.

MURAYAMA et SHIBATA M 21,22 , CHRISTENSEN et WU C3 , ont utilisé un modèle non linéaire, mais ont pris une loi exponentielle pour décrire la viscosité. ROSENQVIST R 16 après des considérations sur les propriétés visqueuses de l'eau adsorbée, propose un dashpot non linéaire dont la viscosité croît exponentiellement avec la contrainte. SUNN et NIELSEN S3 ont utilisé une loi analogue à celle de BARDEN B2 que nous allons étudier. VIALOV et KRIBITSKY V3 , RAYMOND R 11 ont proposé des dashpots non linéaires dont la viscosité est fonction du temps. Ceci tient compte de la thixotropie mais pas de la viscosité.

- Beaucoup de modèles ont introduit un seuil d'écoulement pour tenter de représenter la partie presque horizontale de la courbe 47 page 126 . Ce seuil est très controversé alors que la viscosité non linéaire ne l'est plus. BARDEN pense que ce qui a conduit certains auteurs, RAEFELI R 1 , GEUZE et TAN G2 JONG et GEUZE J2 , à considérer un seuil est en fait une viscosité très fortement non linéaire où la partie initiale de la courbe τ , $\frac{d\epsilon}{dt}$ est très proche de l'axe des τ . Toutefois BARDEN ne repousse pas toute idée de seuil, attendant de voir une confirmation expérimentale.

Il est commode d'introduire un paramètre sans dimensions :

$$(15) \quad R = \frac{T}{T_s} = \frac{cb^n}{H^2 \Delta p^{n-1}} \quad \text{où} \quad c = \frac{K(1+e)}{\gamma_w}$$

c est une mesure de perméabilité.

Les équations (10) et (13) ont été intégrées par des méthodes numériques avec les conditions aux limites imposées par la consolidation unidimensionnelle. Les résultats figurent figures 50, 51, 52, page 147.

La déformation de base du squelette est donnée par l'équation (10) en intégrant directement avec $u = 0$

$$(16) \quad \lambda = \left[(n-1)T_s + 1 \right] \frac{1}{1-n}$$

On voit apparaître donc deux facteurs temps : T et T_s .

- T facteur temps de TERZAGHI domine la phase primaire et dirige la dissipation de u . Ses effets sont classiques et connus.

- T_s facteur temps nouveau domine la phase secondaire et dirige l'écoulement visqueux du squelette. Il est commode de remplacer T_s par R (15).

Sur la base d'expériences de BERRY (32), la valeur $n = 5$ pour l'argile a été adoptée. Alors $R = \frac{cb^5}{H^2 p^4}$.

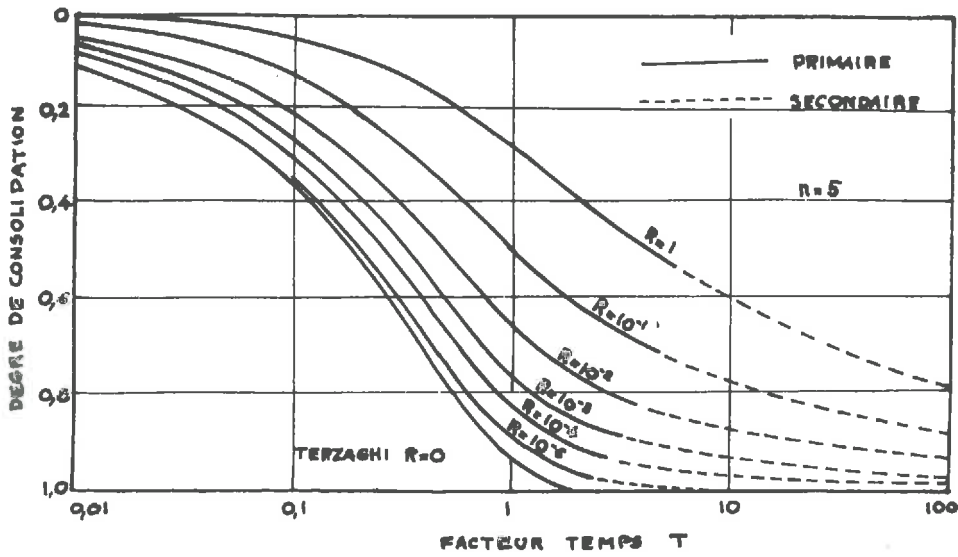
Les figures 50, 51 page 147 expriment bien que plus R est grand, plus la phase secondaire est importante, à la limite $R = 0$ on retrouve la solution de TERZAGHI.

Si c/H^2 est fort (grande perméabilité, échantillon fin) la phase primaire est rapide et les effets secondaires dominent, car la viscosité devient vite prépondérante.

Le paramètre b croît avec σ' et décroît avec e . Il varie en fonction du temps à cause de la thixotropie. Ce facteur qui varie en réalité est fortement responsable du tassement "secondaire". Nous rappellerons que pour un sol donné on considérera b comme constant.

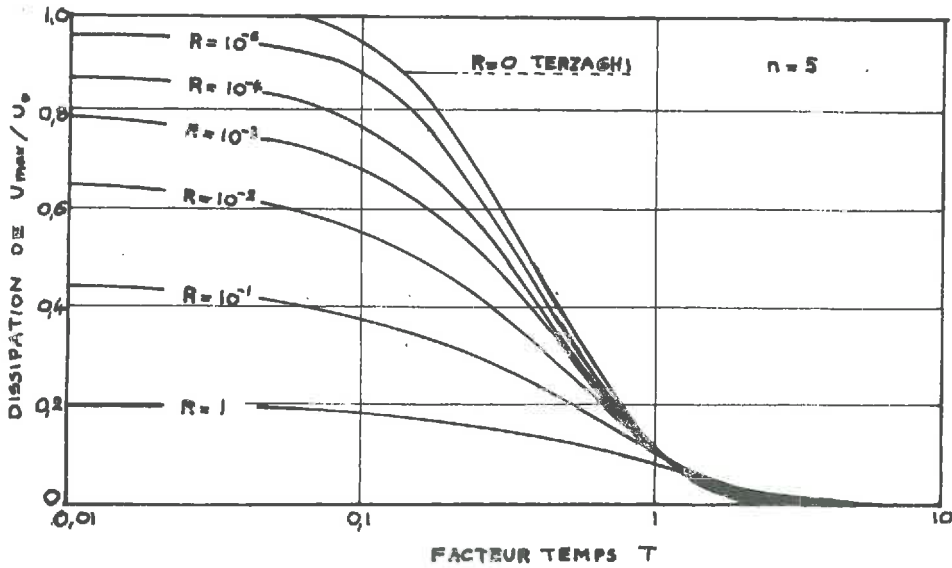
Dans une étude expérimentale, pour déterminer les différents paramètres, GARDEN suggère d'utiliser des échantillons non saturés pour éliminer l'influence de la pression interstitielle. Le facteur T est alors déterminé comme dans la théorie de TERZAGHI, on l'est grâce à la courbe 52 page 147, après plusieurs essais et b d'une manière analogue au terme de la théorie de GIBSON et LO (cf. Chapitre V).

On remarquera enfin que T_g ne contient pas H , ce qui implique que l'effet visqueux est indépendant de H , alors que l'effet "primaire" dépend de H^2 . Ceci montre que l'influence de T_g sur la compression totale est complexe.



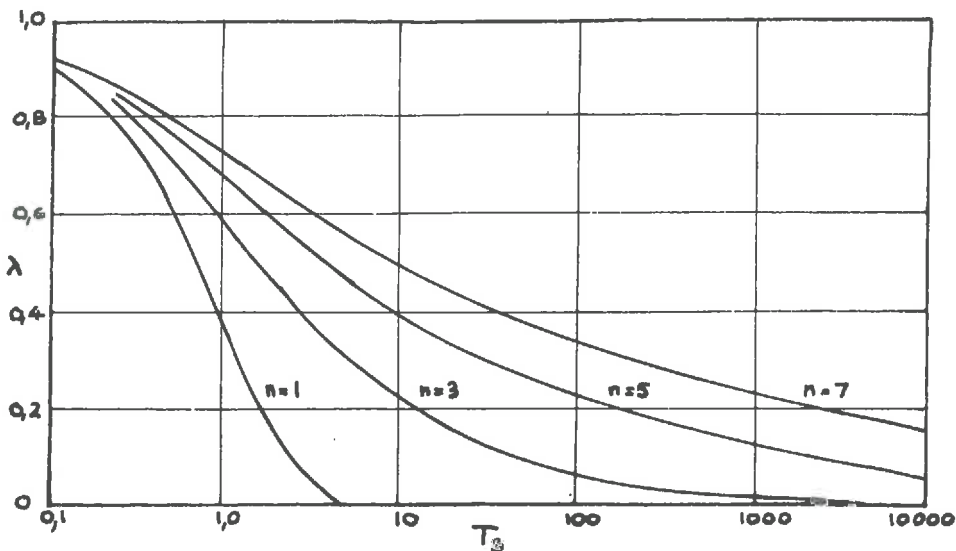
COURBE THEORIQUE DU TASSEMENT

fig 50



COURBE THEORIQUE DE LA DISSIPATION DE LA PRESSION INTERSTITIELLE

fig 51



COURBE THEORIQUE DE LA COMPRESSION DU SQUELETTE SOUS UN ACCROISSEMENT DE LA CONTRAINTE EFFECTIVE

fig 52

A propos du mécanisme des micropores, une remarque théorique s'impose. ADAMS A4 pour une tourbe fibreuse établit que la perméabilité varie avec l'épaisseur de l'échantillon $\frac{k}{k_0} = \left(\frac{H}{H_0}\right)^c$, en utilisant la loi de DARCY combinée avec l'expression précédente, on trouve que H est proportionnel à $t^{\frac{1}{1-c}}$, ce qui donne la même équation pour la déformation de base du squelette (16). Ceci vient du fait que la non linéarité provient non plus de la viscosité, mais de la perméabilité.

Cette dernière remarque pourrait indiquer (ceci reste à prouver) que les deux mécanismes ne sont pas si éloignés vis-à-vis d'un traitement théorique.

C H A P I T R E V
=====

EXEMPLE D'UN PROBLEME PRATIQUE

CONSTRUCTION D'UN REMBLAI AUTOROUTIER EN ZONE MARECAGEUSE

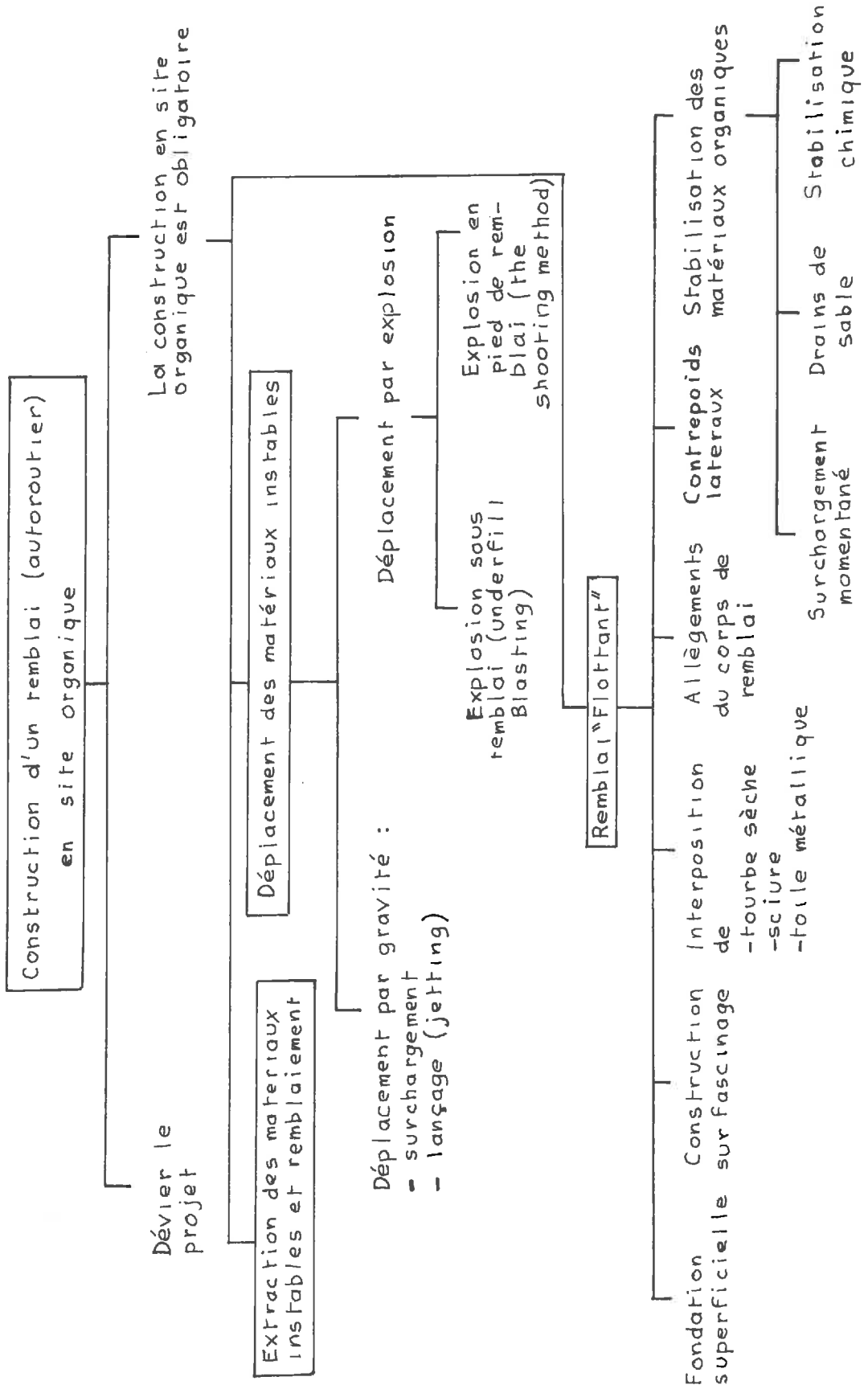
1. GENERALITES.

Le problème de la construction d'un remblai routier sur un sol tourbeux a été maintes fois abordé. Notre but n'est pas de faire une étude des différentes méthodes, nous signalerons dans la bibliographie de nombreuses références.

Nous présentons sous forme de tableaux (page 151) les possibilités que l'on a en face d'un problème de remblai. Nous retiendrons les trois techniques :

- faire "flotter" le remblai,
- remplacer le matériau instable par du remblai de qualité,
- reporter les efforts sur le substratum résistant.

En vue de présenter les calculs qui seront faits par la suite, nous décrirons brièvement la méthode de "l'accélération des tassements par surchargement momentané", consistant à surélever le remblai temporairement lorsqu'il atteint sa hauteur finale. La surcharge ôtée, le tassement est supérieur à celui qu'on aurait obtenu dans le même temps, sans surcharge supplémentaire. Le procédé permet d'une part d'avancer la pose du revêtement et par conséquent la mise en circulation de la chaussée, d'autre part de diminuer les tassements résiduels après la mise en service, d'où une réduction sensible des frais d'entretien.



Le calcul du tassement de tels remblais ne fait l'objet d'aucun accord universel et chaque auteur a une méthode personnelle, depuis les plus empiriques jusqu'à celles reliées à une des théories de la consolidation.

Nous présenterons par la suite des exemples de tels calculs.

2. EXEMPLE PRATIQUE DE CALCUL. LE REMBLAI AUTOROUTIER DE BOURGOIN

2.1. SITUATION.

Pour faire traverser les marais tourbeux de BOURGOIN par l'autoroute A43 LYON-CHAMBERY, les Ponts et Chaussées ont jugé nécessaire l'étude en vraie grandeur du comportement des sols organiques pour définir une méthode optimale de construction. Pour ce faire, deux remblais d'essais ont été construits côte à côte, simultanément. La coupe du terrain au droit des remblais est schématisée sur la figure 53 page 153.

Les Ponts et Chaussées ont défini la hauteur des remblais de façon à déterminer une surcharge momentanée éventuelle à mettre en oeuvre au moment des terrassements.

- Remblai 1 (R 1) :

$$h_1 = h_2 + \text{surcharge } S \text{ évaluée (bibliographie, essais de laboratoire).}$$

COUPE SCHEMATIQUE DES MARAIS
TOURBEUX DE BOURGOIN

Fig 53

PROFONDEUR m	TYPE DE SOL	COULEUR	W%	γ_d g/cm ³	γ g/cm ³	MO%
0						
0,35	Terre Végétale avec souches de maïs	Brun	31	1,37	1,795	-
		Gris	50	1,10	1,65	-
	Limon	Brun noir	95	1,17	2,28	9
0,90	nappé	Gris bleu	84	0,79	1,455	-
	Tourbe amorphe	Noire	590	0,15	1,01	65
2,90	Sable et graviers	Gris bleu				

- Remblai 2 (R 2) .

h_2 = hauteur théorique de remblai + tassements évalués
(bibliographie, essais de laboratoire).

Les valeurs suivantes furent adoptées :

- . hauteur théorique des remblais = 1,50 m
- . tassements évalués = 0,50 m

d'où :

$$\underline{h_2 = 2 \text{ m}}$$

- . surcharge S évaluée = 1,00 m

Toutefois, on estima nécessaire de majorer S de 0,50 m pour être certain d'obtenir les tassements totaux correspondants à h_2 en moins de 6 mois.

d'où :

$$\underline{h_1 = 3,5 \text{ m}}$$

Une vue du remblai avec l'implantation des différents appareils de mesure est montrée page 155, figure 54.

2.2. CONSTRUCTION ET RESULTATS EXPERIMENTAUX.

2.2.1. Construction.

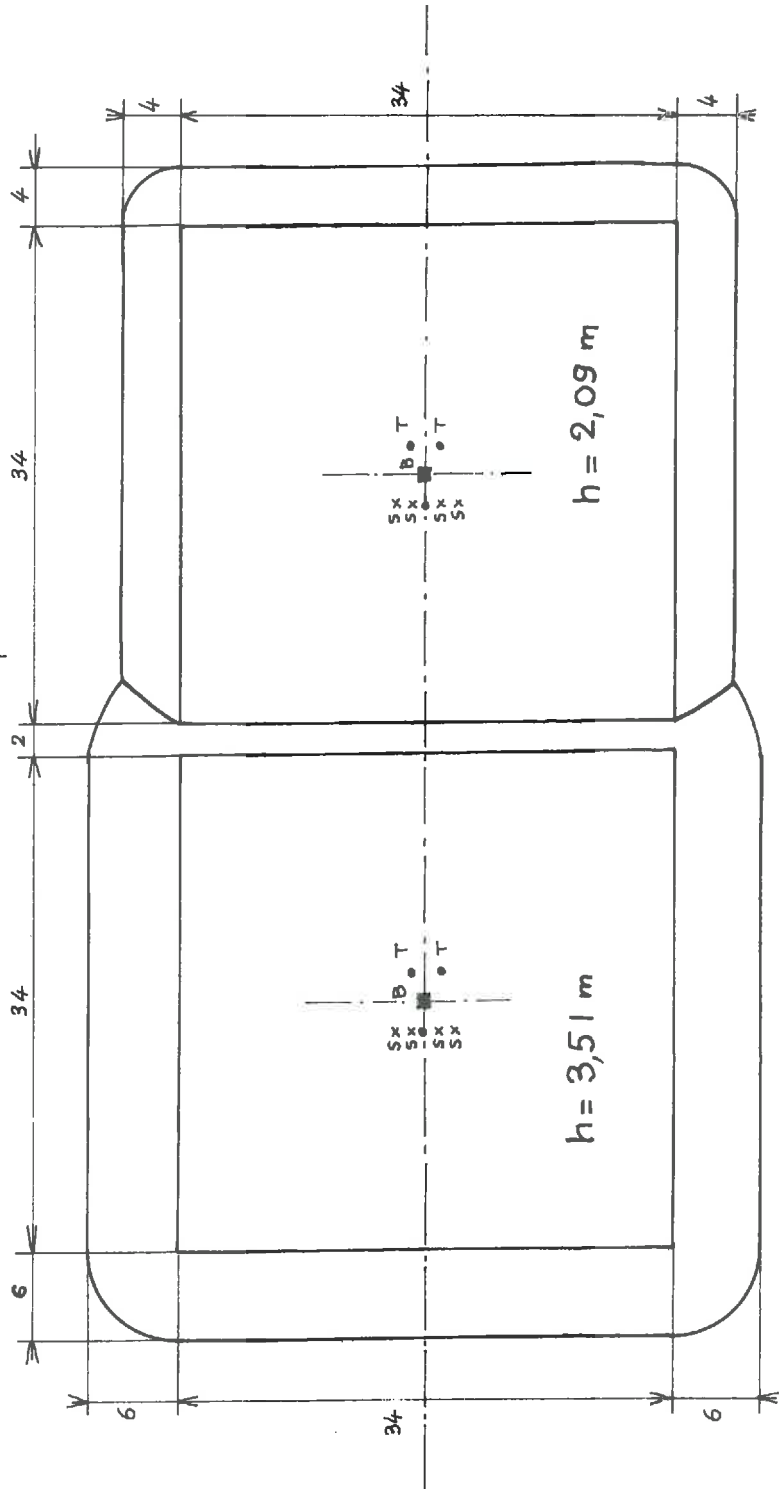
=====

La construction des remblais s'est effectuée selon le planning indiqué page 156. Les mesures en cours de construction ont été réalisées sous hauteurs constantes et uniformes.

Remblai Expérimental

fig 54

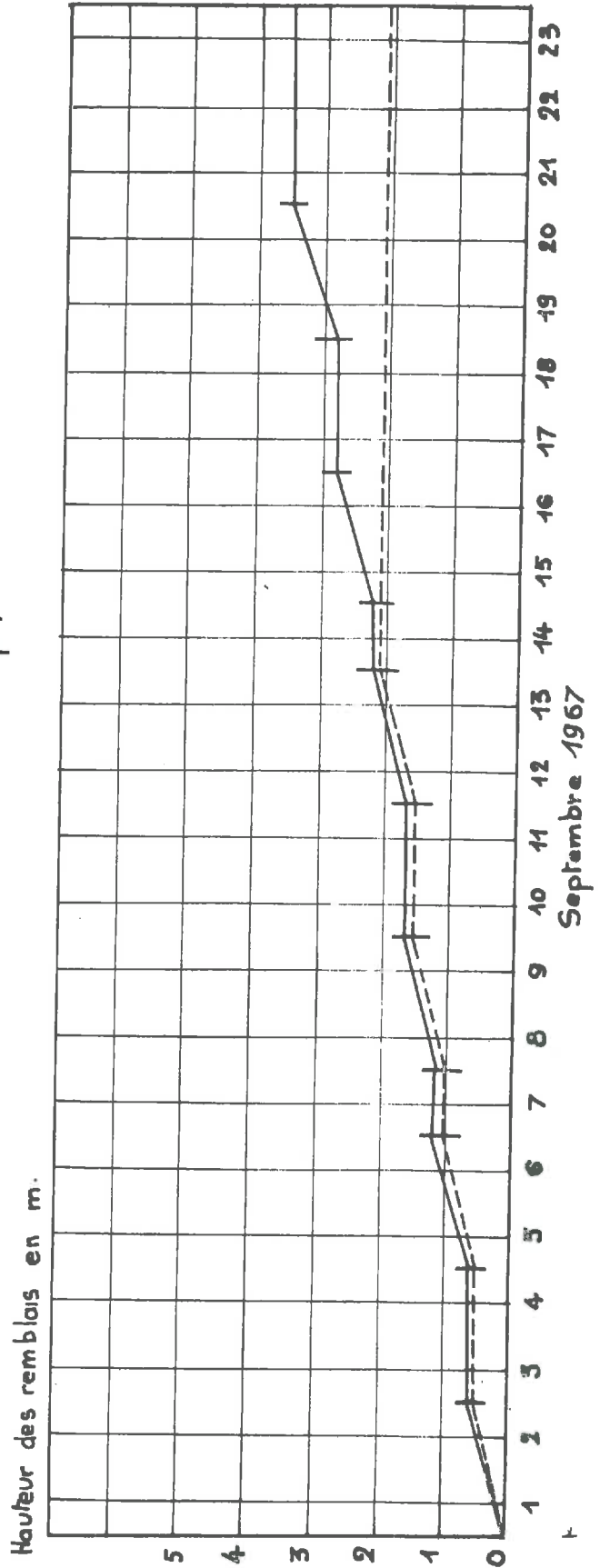
- S sonde de
pression
interstitielle
- T sonde
rassométrique
- B borne de
repère des dépla-
cements



échelle 2/1000

CONSTRUCTION
DES REMBLAIS
EXPERIMENTAUX

Remblai n°1 ———
Remblai n°2 - - - - -



Un compacteur à pneus (15 T) et un rouleau vibrant (12 T) ont assuré pour chaque épaisseur une densité sèche moyenne égale à : $\gamma_d = 2,20 \text{ g/cm}^3$ ($w = 4,16 \%$).

Des soins particuliers ont été apportés pour que le passage des engins ne perturbe pas les contraintes "in situ" sous le remblai et pour que la nature du remblai soit bien homogène.

2.2.2. Résultats "in situ".

=====

2.2.21. Tassements.

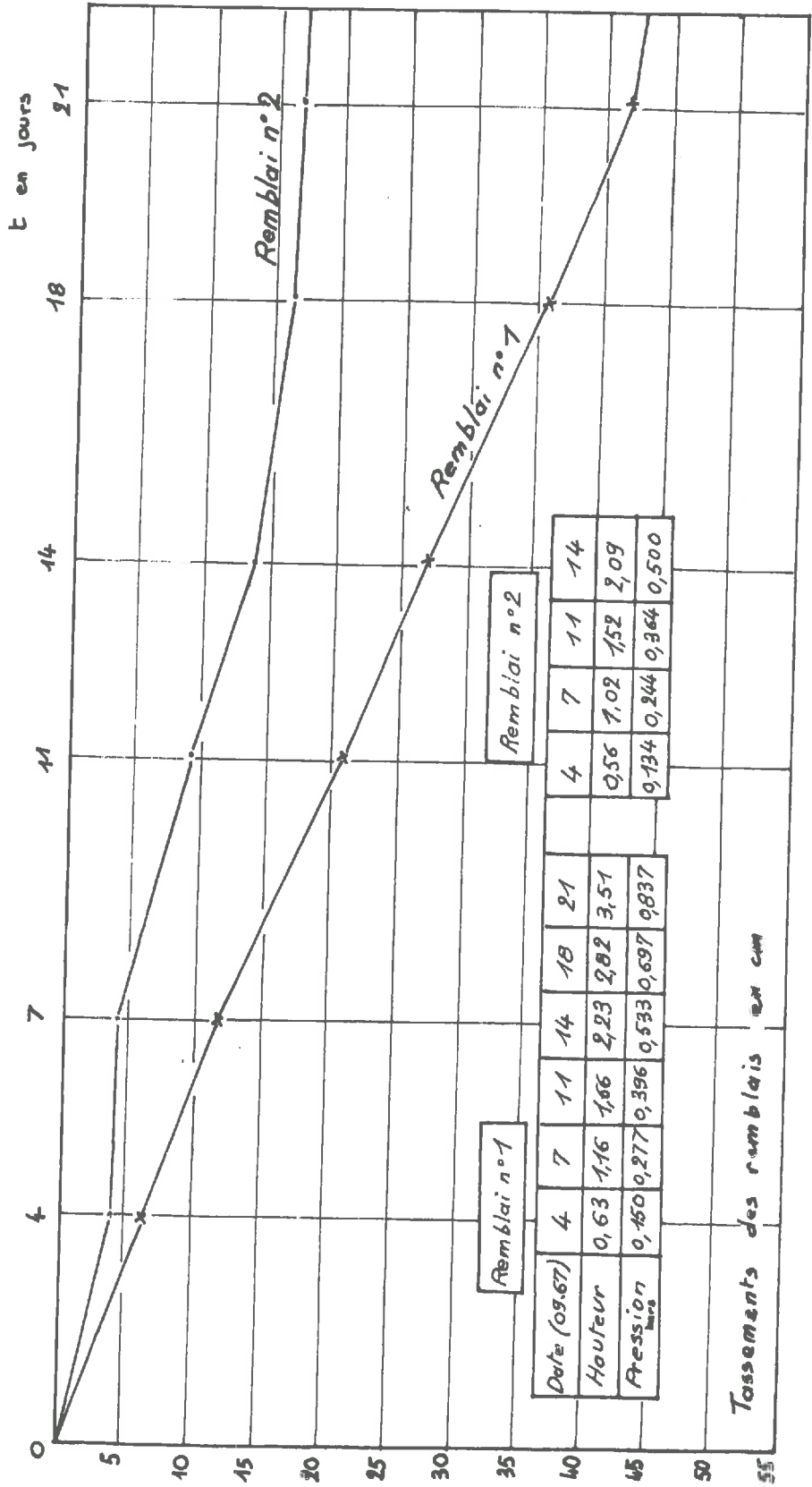
Les tassements obtenus pendant la construction sont indiqués sur la figure 55 page 158.

On remarque une différence de comportement de chaque remblai pour des hauteurs identiques.

Les sondages n'ont pas relevé de différences notables dans le profil sous R 1 et R 2. Or, cet écart ne peut s'expliquer que par une différence de nature de la tourbe sous-jacente. Malheureusement, les essais précis de laboratoire ont été effectués sur de la tourbe provenant de R 1, et on ne sait pas s'ils auraient révélé des différences de comportement prévisibles. Une étude détaillée à ce sujet est en cours au Laboratoire Régional de LYON. Il est probable que sous R 2 la tourbe soit plus contaminée par des matériaux minéraux. De toute façon, ces constatations montrent combien la tourbe est hétérogène et combien une reconnaissance de sols précise est nécessaire avant toute construction.

Fig 55

TASSEMENTS OBTENUS PENDANT LA CONSTRUCTION DES REMBLAIS
(Les mesures ont été effectuées sous hauteurs uniformes et constantes.)



2.2.22. Déformations verticales.

Divers sondages inclinométriques ont montré que la construction des remblais provoquait des déformations latérales négligeables dans la couche organique (4 à 5 cm au maximum). Ceci justifie l'hypothèse de calcul unidimensionnelle.

2.2.23. Pressions interstitielles.

L'excès de pression interstitielle mesuré pendant et après la construction des remblais paraît faible. Toutefois, des mesures ont montré que les surpressions interstitielles se développent au moment même de l'application des charges et se dissipent en quelques heures. On a alors noté que la surpression était de l'ordre de grandeur de la surpression au sol (100 g/cm² pour 140 g/cm²).

2.2.24. Evolution des tassements.

Comme l'indique le graphique des déformations secondaires (figure 56 page 160), les tassements semblent évoluer très lentement. La loi linéaire en logarithmique du temps n'apparaît pas clairement, peut-être ne s'applique-t-elle pas dans ce cas-là. Il faut dire que si l'on n'a pas une période d'au moins mille jours, on ne peut rien dire de précis.

2.3. EXEMPLES DE METHODES DE CALCUL.

2.3.1. Données générales.

=====

- Considérons un élément de tourbe situé au milieu de la couche compressible. Son état de contraintes initiales est dû au poids des terres supérieures. On peut évaluer à =

$$\sigma_1 = 0,16b \quad \sigma_3 = 0,03 b \quad (K_0 = 0,18)$$

- La contrainte sous les remblais est due à leur propre poids. Pour ces remblais, l'expérience donne $\gamma = 2,4 \text{ g/cm}^3$, dont :

pression sous R 1	$p = 0,80 \text{ b}$
pression sous R 2	$p = 0,50 \text{ b}$

- L'accroissement de contraintes dans la couche de tourbe, dû à la surcharge apportée, est uniforme et égal à cette surcharge. Des calculs d'élasticité effectués au Laboratoire de Mécanique des Sols de l'Université de Grenoble G 4,5,6 montrent en effet que dans un tel cas il n'y a pas lieu de tenir compte d'une répartition autre qu'uniforme.

pour R 1	$\Delta\sigma = 0,84 \text{ b}$
pour R 2	$\Delta\sigma = 0,50 \text{ b}$

2.3.2. METHODES DE CALCUL DONNANT LE TASSEMENT EN FONCTION DU TEMPS.

2.3.2.1. Méthode de "BUISSMAN".

C'est une des méthodes empiriques réf. B 11 définissant la loi de tassement secondaire en fonction du temps. Bien d'autres méthodes existent, KOPPEJAN K6, HILLIS et BRAUNER H 13, HANRAHAN H5, mais toutes sont inspirées de celle de BUSSMAN.

Le tassement d'une couche de sol est représenté par une formule du type :

$$\Delta h = a + b \log t$$

Cette loi n'étant valable qu'à partir d'un temps t correspondant à la fin de la consolidation "primaire" selon TERZAGHI ($u = 0$). Pour déterminer cette loi à partir d'un essai oedométrique on part de l'hypothèse fondamentale :

" Le tassement relatif d'une couche de sol dû à la compression secondaire suit une loi indépendante de l'épaisseur de la couche ".

L'essai oedométrique proprement dit se fait de façon classique, mais le temps d'application de la charge est d'au moins 7 jours. La figure 57 page 163 montre la différence entre une courbe $e - \log p$ obtenue après un temps d'application de 1 jour (essai normal) et celle obtenue avec un essai "BUISSMAN".

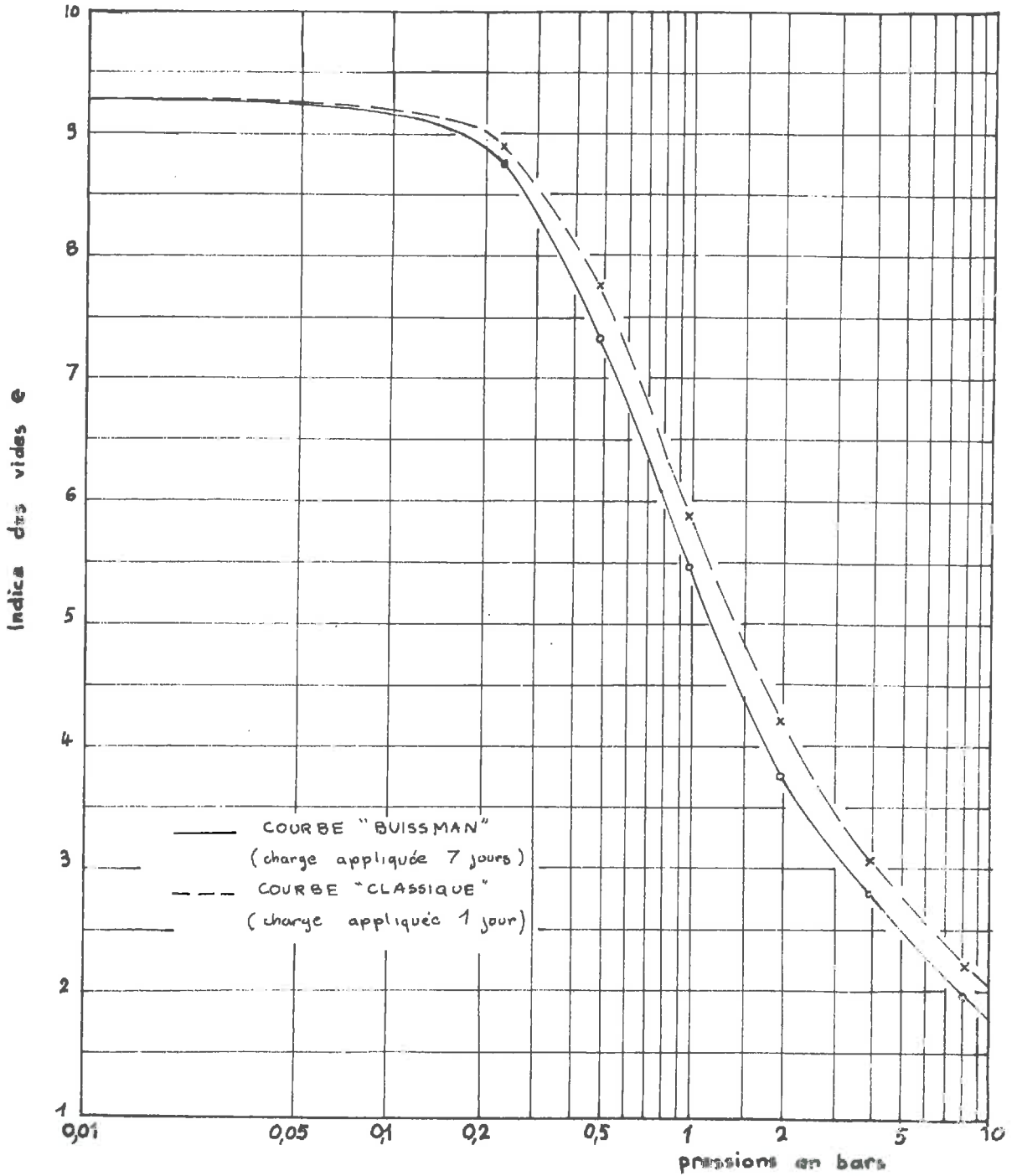
La formule de BUISSMAN s'écrit :

$$\Delta h = h_0 (\alpha_p + \alpha_s \log t) \Delta \sigma$$

- h_0 hauteur initiale de la couche
 Δh tassement de la couche
 t temps en jours
 α_s et α_p coefficients fonction de l'accroissement de charge

COURBE e -log p pour la TOURBE de BOURGOIN
selon la DUREE de l'APPLICATION de la CHARGE
à l'OEDOMETRE

fig 57



La détermination expérimentale de α_p et α_s est simple.

Soit un échantillon placé dans un oedomètre, consolidé sous σ_c . On accroît la charge de $\Delta\sigma$. On note les tassements pour chaque jour, en particulier pour 1 et 10 jours. Soit h_0 la hauteur initiale de l'échantillon. Pour un accroissement donné, on a donc :

$$\alpha_p = \frac{\Delta h_1}{h_0} \frac{1}{\Delta\sigma} \quad \Delta h_1 \text{ étant la variation de hauteur au bout d'un jour.}$$

$$\alpha_s = \frac{\Delta h_{10} - \Delta h_1}{h_0} \frac{1}{\Delta\sigma} \quad h_{10} \text{ étant la variation de hauteur au bout de 10 jours.}$$

On recommence l'opération pour différents accroissements de charge et l'on a des courbes ($\Delta\sigma, \alpha_p$) et ($\Delta\sigma, \alpha_s$). Par interpolation on détermine α_p et α_s correspondant à la surcharge qui sera appliquée "in situ".

Une étude statistique menée à l'INSA I 1 a montré que pour la tourbe de BOURGOIN (carottes prises sous R 1) on pouvait écrire comme valeur moyenne de 24 essais :

pour R 1	$\Delta h = 51,7 + 10,77 \log t$
pour R 2	$\Delta h = 38,8 + 8,75 \log t$

2.3.22. Méthode de GIBSON et LO C 3 .

Nous ne rappellerons pas cette méthode bien connue. Nous dirons seulement qu'elle fait intervenir 3 paramètres a , b , $1/\lambda$:

- a compressibilité du ressort figurant la phase "primaire"
- b compressibilité du ressort dans le solide de KELVIN
- $1/\lambda$ viscosité de l'amortisseur du solide de KELVIN

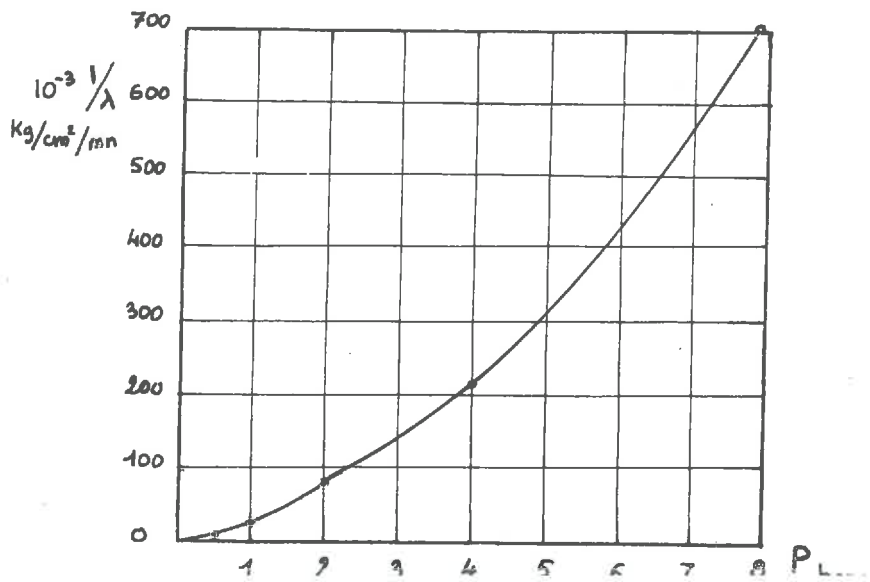
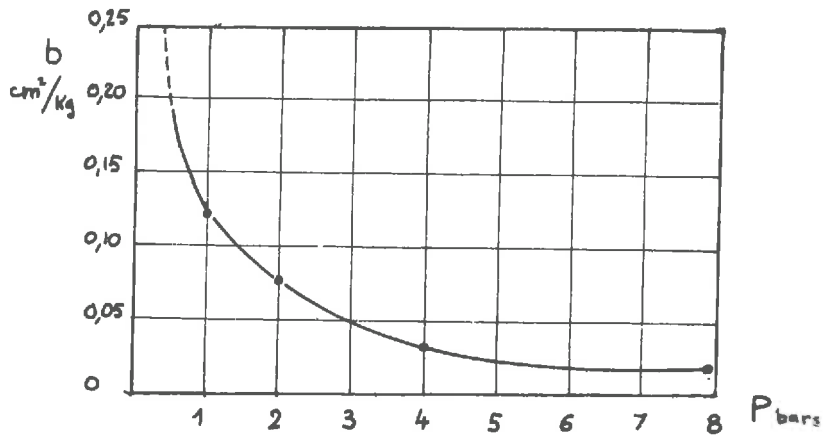
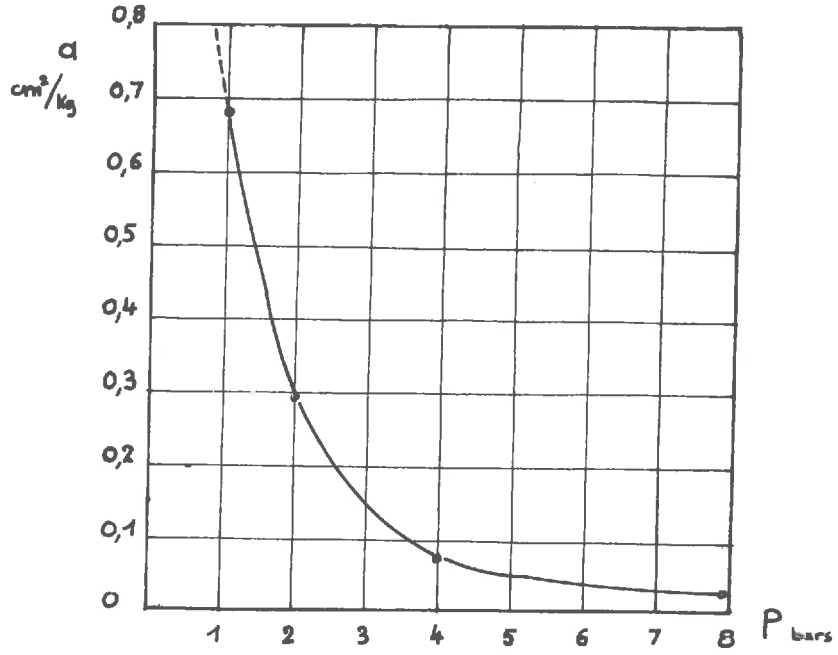
La loi de tassement est explicitable mais très compliquée, nous donnerons une expression simplifiée (pour t grand) :

$$\Delta h(t) = 2 \Delta \sigma h \left[a + b \left(1 - e^{-\frac{\lambda}{b} t} \right) \right]$$

si $t \rightarrow \infty \quad \Rightarrow \quad \Delta h \approx 2 (a + b) h \Delta \sigma$

Pour la tourbe de Bourgoïn de nombreux essais oedométriques ont été faits et interprétés suivant GIBSON et LO. On a déterminé des valeurs moyennes de a , b , $1/\lambda$ sous différentes charges. Malheureusement, pour des charges faibles, la détermination des coefficients a et b est très délicate et fort imprécise. Aussi pour le cas pratique du remblai, les résultats ne sont pas exploitables. Si l'on opère avec cette méthode, il faudrait reconsolider à l'oedomètre les échantillons à la pression où ils étaient "in situ" et faire ensuite des essais très soignés avec de faibles accroissements de charges pour explorer la partie gauche des courbes 58, page 166.

fig 58



Il nous a semblé intéressant de présenter ces courbes $a, b, 1/\lambda$ en fonction de p car elles peuvent donner des ordres de grandeur et une voie de recherche pour des études futures.

2.3.3. Méthodes de calcul donnant le tassement total.

2.3.3.1. Calcul par la théorie de l'élasticité.

Nous avons utilisé des résultats théoriques provenant du Laboratoire de Mécanique des Sols de Grenoble G 4,5,6 W 6 .

- Détermination de E .

On sait que
$$E' = \frac{E (1 - \nu)}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}$$
 dans la théorie de l'élasticité. Toujours dans cette hypothèse on peut calculer ν à partir de K_0 . $\nu = 0,16$. Donc :

$$\underline{E = 0,94 E'}$$

E' est déterminé par des essais oedométriques. En prenant des valeurs moyennes pour les contraintes dues aux remblais de Bourgoin, on a :

R 1	$\Delta\sigma = 0,84 \text{ b}$	\rightarrow	$E'_{\text{moyen}} = 2,35 \text{ b}$
R 2	$\Delta\sigma = 0,35 \text{ b}$	\rightarrow	$E'_{\text{moyen}} = 1,98 \text{ b}$

Soit pour E :

E sous R 1	$=$	$2,21 \text{ b}$
E sous R 2	$=$	$1,86 \text{ b}$

On peut objecter que faire un calcul en élasticité infinitésimale pour la tourbe est faux car ce sol n'est pas élastique et ses déformations sont loin d'être petites. L'essentiel est d'être conscient des approximations que l'on fait et des erreurs qu'elles entraînent. Faute de théories plus précises on doit utiliser celles qui existent.

- Calcul

Soit une couche élastique chargée d'épaisseur finie reposant sur un substratum rigide lisse. Le tassement au centre de la charge est :

$$W = \frac{P}{E} \cdot a \cdot K \left(\gamma, \frac{H}{a} \right)$$

Les définitions de p , a , K sont données page 169 ainsi que les résultats des calculs. Nous signalons que toutes les interpolations faites sont linéaires.

Deux sortes de calcul ont été effectués :

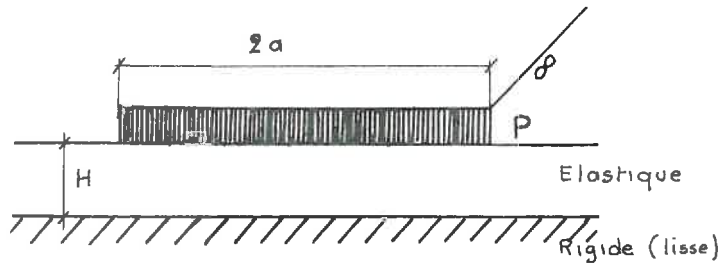
- . charge uniformément répartie sur une bande rectangulaire infinie,
- . charge trapézoïdale de longueur infinie.

- Commentaires

Le calcul avec le trapèze donne un résultat moins fort ce qui est normal, car pour la même charge totale le trapèze répartit les contraintes sur une plus grande largeur.

CALCUL EN ELASTICITE DU TASSEMENT
DU REMBLAI DE BOURGOIN

Hypothèse de la charge rectangulaire



Tassement au centre $w = \frac{P}{E} \cdot a \cdot K(\gamma, H/a)$

H/a	0	0,15	0,17	0,30	γ
0,1	0,1	0,087	0,085	0,074	K
0,105		0,091			
0,2	0,2	0,174		0,148	

Remblai	γ	E_b	P_b	a_m	K	w_{cm}
R_1	0,17	2,21	0,84	20	0,085	64,7
R_2	0,15	1,86	0,50	19	0,091	46,5

$H = 2m$

2.3.32. Méthode de TRACENKO pour évaluer le tassement final T 12 .

- Le chercheur russe TRACENKO expose une méthode générale d'évaluation du tassement final d'une couche de sol compressible (tourbe, argile molle) qui peut s'appliquer à tous les essais. Il est intéressant de l'exposer car l'évaluation du tassement final est un problème peu abordé que ne résolvent pas les lois en log t.

TRACENKO pose comme hypothèse que la tourbe est un milieu visco-élastique (viscosité linéaire) et que sa déformation sous une charge est donnée par :

$$\sigma = E \varepsilon + \mu \frac{d\varepsilon}{dt}$$

σ contrainte appliquée
 E module d'élasticité
 μ coefficient de viscosité
 ε tassement relatif

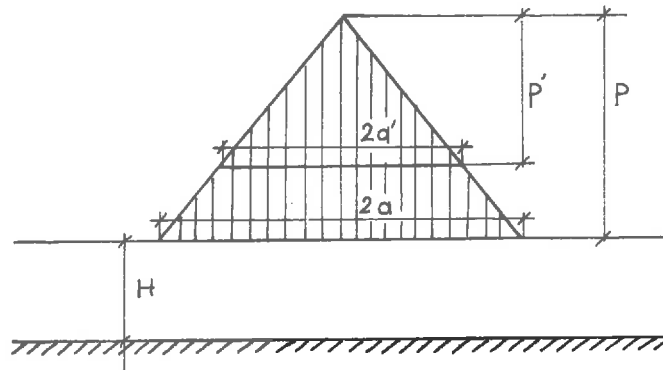
Si l'on intègre entre t_0 et t ($t > t_0$, t_0 correspondant au début du tassement secondaire), on obtient :

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \sigma \left(\frac{1}{E_0} - \frac{1}{E} \right) e^{-\frac{E(t-t_0)}{\mu}}$$

Pour un temps infini on a $\varepsilon_f = \frac{\sigma}{E}$

CALCUL EN ELASTICITE DU TASSEMENT
DU REMBLAI DE BOURGOIN

Hypothèse de la charge trapézoïdale

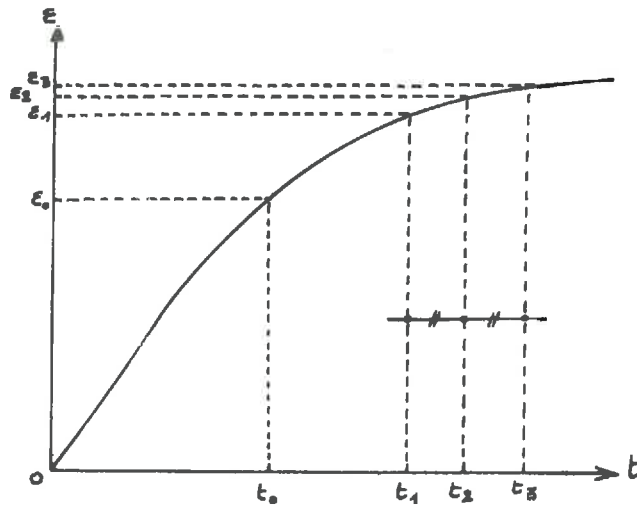


Tassement au centre $w = \frac{1}{E} (p \cdot \alpha \cdot K(y, \frac{H}{a}) - p' \cdot \alpha' \cdot K'(y, \frac{H}{a'}))$

H/a	0	0,15	0,17	0,30	Y
0	0	0	0	0	K
0,087			0,0680		
0,095		0,0754			
0,118		0,0936	0,0923		
0,5	0,447	0,397	0,391	0,348	

Remblai	Y	E _b	P _b	P' _b	a _m	a' _m	K	K'	W _{cm}
R ₁	0,17	2,21	3,22	2,38	23	17	0,0680	0,0923	58,9
R ₂	0,15	1,86	2,52	2,04	21	17	0,0754	0,0936	40

Ainsi, pour déterminer la valeur du tassement relatif final est-il nécessaire de déterminer E .



On opère ainsi : pour un temps supérieur à t_0 , on coupe la courbe (déformation temps) par 3 verticales équidistantes. On a ainsi $t_3 - t_2 = t_2 - t_1$. On détermine les ordonnées de chaque point :

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma}{E} + \sigma \left[\frac{1}{E_0} - \frac{1}{E} \right] e^{-\frac{E(t_1 - t_0)}{\mu}}$$

$$\varepsilon_2 = \text{analogue "}$$

$$\varepsilon_3 = \text{analogue "}$$

En considérant E , E_0 et μ comme inconnus, on les détermine par résolution du système précédent. En particulier :

$$\varepsilon = \sigma \frac{2\varepsilon_2 - \varepsilon_1 - \varepsilon_3}{\varepsilon_2^2 - \varepsilon_1\varepsilon_3}$$

Comme $E = \frac{\sigma}{\varepsilon_f}$, on obtient ε_f .

$$\varepsilon_f = \frac{\varepsilon_2^2 - \varepsilon_1\varepsilon_3}{2\varepsilon_2 - \varepsilon_1 - \varepsilon_3}$$

Ainsi, avec les déformations relatives à 3 instants équidistants, on calcule le tassement relatif final. Il faut bien se rappeler cependant l'hypothèse de la loi rhéologique, car si cette loi n'est pas vraiment suivie (ce qui est le cas général) le tassement relatif calculé dépend des instants choisis. Ainsi, cette méthode a des limites. Cependant, elle donne un ordre de grandeur intéressant.

= Application.

. Evaluation du tassement final "in situ" :

t = 40 j	$\varepsilon_1 = 49,5$	$\varepsilon'_1 = 19,2$
t = 140 j	$\varepsilon_2 = 51,8$	$\varepsilon'_2 = 20,9$
t = 240 j	$\varepsilon_3 = 52$	$\varepsilon'_3 = 21$
	R 1	R 2

Soit :

W final R 1	= 52 cm
W final R 2	= 21 cm

Ce qui revient à dire que l'évolution des tassements est sensiblement achevée.

. On pourrait utiliser la méthode pour évaluer le tassement final à partir des formules de BUISSMAN. Il y aurait contradiction flagrante entre la loi rhéologique de TKACENKO (on arrive à un tassement final) et la loi empirique de BUISSMAN (tassement infini pour un temps infini). De plus, les valeurs de t_1 t_2 t_3 introduites dans la formule de BUISSMAN influenceraient notablement les résultats. Nous pensons donc que ce calcul est inutile car sans signification.

2.3.33. Méthode classique à l'oedomètre.

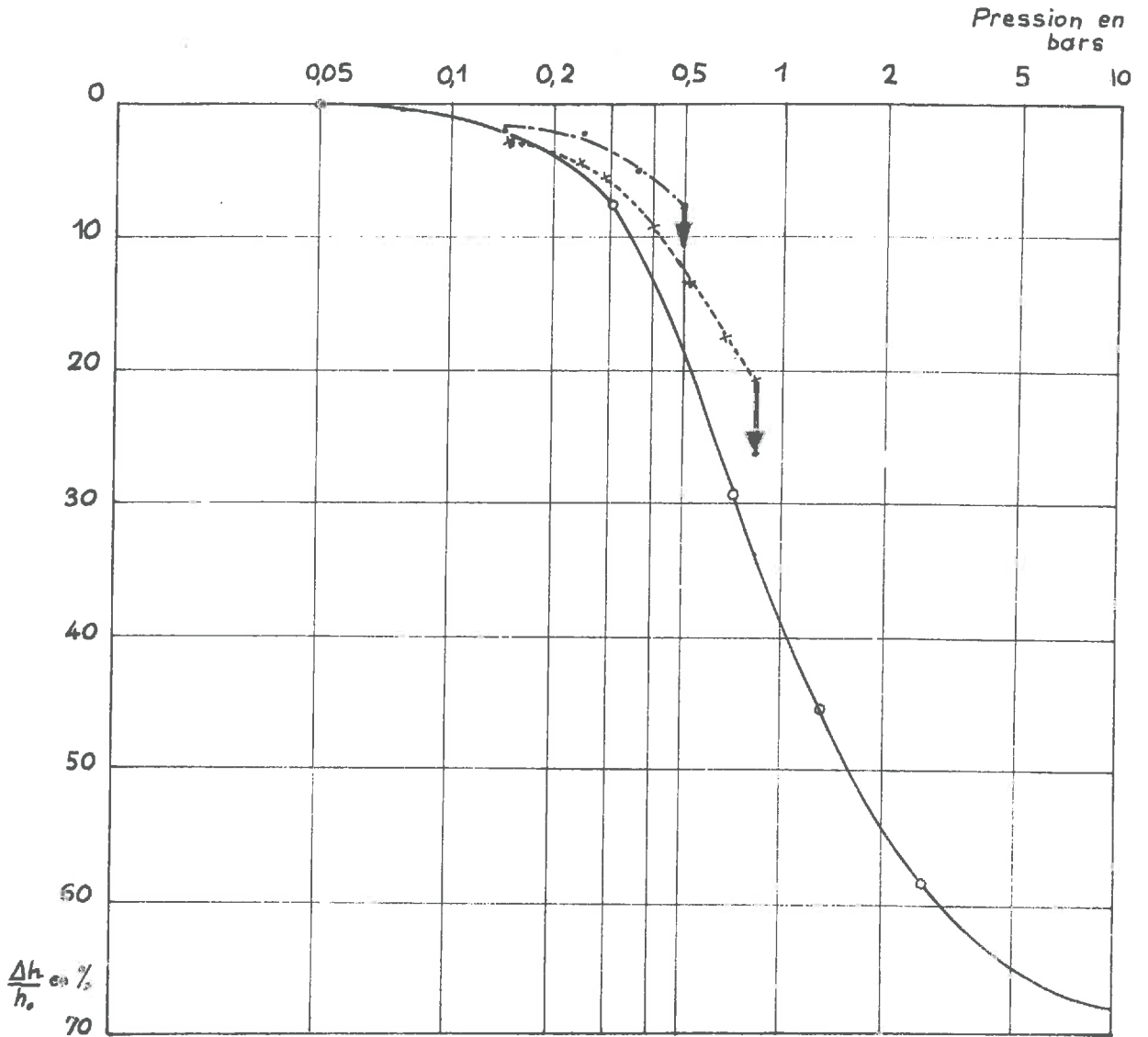
A la suite d'un essai oedométrique "BUISSMAN", on peut construire une courbe $\frac{\Delta h}{h} - \log \sigma$. Avec l'hypothèse que le tassement relatif est indépendant de la hauteur de la couche, on déduit une valeur $\frac{\Delta h}{h}$ pour la pression $\Delta \sigma$ appliquée "in situ" (cf. figure 50 page 175). Connaissant h , on obtient Δ

Pour l'exemple précis étudié, l'essai de laboratoire présenté a été effectué sur un échantillon de tourbe pris au voisinage de R 1. A partir de cet essai, les tassements prévisibles pouvaient être évalués à :

R 1 68 cm

R 2 36 cm

Fig 59



— Essais œdométriques

- - - Résultats obtenus pendant la construction du remblai 2

..... " " " " " " remblai 1

⇒ Tassements différés (méthode de Tkacenko)

3. CONCLUSION.

- L'expérience de BOURGOIN montre qu'une tourbière, à priori homogène, ne l'est en fait pas du tout. Le remblai R 1 a tassé proportionnellement beaucoup plus que le R 2, ce qui prouve que l'homogénéité des propriétés mécaniques est très locale. Ceci entraîne qu'une reconnaissance de sol en terrain organique ne doit rien laisser au hasard et peut, pour être bien menée, se décomposer en plusieurs phases :

- une étude géologique précise de la tourbière donnant son mode de formation, ainsi que les sortes de tourbe que l'on peut y rencontrer (tant en profondeur que radialement).
- une prise d'échantillons intacts aux endroits rigoureusement précis où doit s'édifier la construction. Celle-ci étant généralement très longue (remblai autoroutier), on doit rapprocher les sondages le plus possible afin d'avoir un profil en long avec les variations de propriétés mécaniques du sol (première idée par l'histoire de la tourbière, puis par les essais de laboratoire).
- une étude de laboratoire soigneusement préparée. Plus encore que pour tous les matériaux, les caractéristiques mécaniques de la tourbe varient suivant les sollicitations apportées. Toute interpolation ou extrapolation de courbes expérimentales (oedométriques par exemple) est délicate et conduit à des résultats peu significatifs. Une expérience, particulièrement sur le tassement, n'apportera de renseignements précis que si l'on simule le mieux possible le chemin de contrainte que

l'on effectuera réellement lors de la construction (essai oedométrique où l'on part de la pression de consolidation en place évaluée, pour arriver juste à la contrainte après construction en ayant respecté si possible les mêmes conditions de chargement).

- Quant aux méthodes de calcul, aucune ne semble actuellement satisfaisante. Elles ne donnent que des ordres de grandeur. Pour la consolidation on peut distinguer deux choses :

• le tassement en fonction du temps : il fut beaucoup plus rapide à Bourgoin que ne le laissaient prévoir les essais de laboratoire (en suivant le calcul classique de TERZAGHI, on prévoyait un tassement "hydraulique" ou "primaire" $t_{90} = 1300$ j pour un $c_v = 1,7 \cdot 10^{-4}$ cm²/s, alors qu'en fait on a trouvé seulement quelques jours). D'ailleurs, des expériences analogues rapportées dans la littérature indiquent souvent des phases "hydrauliques" amples mais rapides. Ceci est probablement dû au fait qu'à des faibles pressions de consolidation la tourbe est très perméable et assure elle-même un excellent drainage que n'accélèrent pas des drains de sable (ce n'est plus le cas à de fortes pressions car K est alors très petit). Il est presque certain que pour chaque tourbière et chaque sorte de tourbe l'état de contrainte précis avant et après construction détermine l'amplitude du tassement ainsi que la proportion due à la phase "primaire" ou "hydraulique" et à la phase "secondaire" ou "viscoélastique". Cette remarque explique en partie le grand nombre de lois donnant la variation : temps de tassement hauteur de la couche (depuis $t = kH$ à $t = kP^2$) car selon la part des deux phases les lois varient. De telles lois ne sont valables, à notre avis, que dans un cas bien déterminé et une loi générale doit faire intervenir d'autres paramètres plus complexes.

. le tassement final : les méthodes de calcul sont, là, plus précises que dans le cas précédent. Les déductions que l'on peut tirer sont locales (les écarts à 20 m de distance à Bourgoin le prouvent), et seul un grand nombre d'essais, effectués sur des échantillons bien déterminés et suffisamment rapprochés dans le profil en long, peut montrer la déformation probable de l'ensemble.

D'autre part, il n'est pas évident que l'hypothèse classique que $\frac{\Delta h}{h}$ est indépendant de h soit vérifiée pour les sols organiques (figure 59 page 172). Toutefois, les méthodes de calcul demandent cette hypothèse et la mise en lumière d'une loi plus précise est très difficile.

- Dans le domaine de la recherche, il reste beaucoup à faire. Des lois rhéologiques plus élaborées, tenant compte de nombreux facteurs (accroissement relatif des contraintes, variation de $K...$) permettront des précisions meilleures. Malheureusement, de telles lois entraînent la détermination de plus en plus de paramètres, ce qui pose de graves problèmes expérimentaux.

-:-:-

B I B L I O G R A P H I E

A

- (1) ACKROYD T.N.V., "Laboratory testing in soil engineering", Soil Mech. Ltd (Londres, 1957).
- (2) ADAMS J.I., "Laboratory compression tests on peat", NRC.ACSSM Proc. 7th musk. res. conf., T.M 71 (Ottawa, Février 1961), p. 36-54.
- (3) ADAMS J.I., "A comparison of field and laboratory consolidation measurements on peat", NRC.ACSSM Proc. 9th musk. res. conf., T.M 81 (Ottawa, Avril 1964), p 117-135.
- (4) ADAMS J.I., "The engineering behaviour of a Canadian Muskeg", Proc. 6 ICSMFE, vol I, p 3 (1965).
- (5) ANDERSON K.O., "Muskeg studies in Alberta", H.R.B. 316, p. 23-31 (Mars, 1962).
- (6) ANDERSON K.O. et HAAS R.C.G., "Construction over muskeg on the Red Deer Bypass", NRC.ACSSM Proc. 8th musk. res. conf., T.M 74, p. 31-41 (Ottawa, Octobre 1962).
- (7) ANDERSON K.O. et HEMSTOCK R.A., "Relating the engineering properties of Muskeg to some problems of fill construction", NRC.ACSSM Proc. 5th musk. res. conf., T.M 61 (Ottawa, Juin 1959), p. 16-25.
- (8) ASHDOWN K. et RADFORTH J., "Measurements of peat characteristics. A critique", NRC.ACSSM Proc. 9th musk. res.conf T.M 81 (Ottawa, Avril 1964), p. 204-210.

B

- (1) BARBER E.S., "Notes on secondary consolidation ", Proc. H.R.B. 40, p. 663-673 (1961).
- (2) BARDEN L., "Consolidation of clay with non linear viscosity", Geotech. 15, n° 4, p. 345 (Londres, 1965).

- (3) BARDEN L., "Primary and secondary consolidation of clay and peat", Geotech. 18, n° 1, p. 1-24 (Londres, 1968).
- (4) BISHOP A.W. et HENKEL D.J., "The measurement of soil properties in the triaxial test", Edward Arnold Ltd (Londres, 1962), 2e Ed.
- (5) BOLTON SEED H., "Etude des tassements, examen des théories et des méthodes d'essai", Trad. LCPC n° 65 T 22 (Avril 1966).
- (6) BRAWNER C.O., "The practical application of preconsolidation in Highway construction over Muskeg", NRC.ACSSM Proc. -6th musk. res. conf., T.M 67 p. 13-31 (Ottawa, Février 1961).
- (7) BRAWNER C.O., "An appraisal of research for highway construction in muskeg areas", NRC.ACSSM Proc. 10th musk. res. conf., T.M. 85, p. 16-24 (Ottawa, Avril 1965).
- (8) BRIDCUT W.C., "Methods of interpretation, analysis and presentation of muskeg access", NRC.ACSSM Proc. 6th musk. res. conf., T.M. 67, p. 55-60 (Ottawa, Février 1961).
- (9) BROCHU P.A. et PARE J.J., "Construction de routes sur tourbières dans la province de Québec", NRC.ACSSM Proc. 9th musk. res. conf., T.M 81, p. 74-108 (Ottawa, Avril 1964).
- (10) BRU et JOSSEAUME, "Remblais sur sols compressibles. Inventaire des solutions", Journ. de Meca. Sol., (P et C) Rouen, Mars 1964.
- (11) BUISSMAN A.S.K., "Results of long duration settlement tests", Proc. 1. ICSMFE 1, p. 103-106 (1936).
- (12) Von BULOW K., "Allgemeine moorgeologie einföhrung in das Gesamtgebiet der moorkunde", Handb. d. moorkunde I, Borntrager vol XII (Berlin, 1929).

C

- (1) CADLING L. et ODENSTAD S., "The vane-borer", Roy. Swedish Geoth. Inst., n° 2 p.88 (Stockholm, 1950).
- (2) CASAGRANDE L., "Construction of Embankments across peaty soils", Journ. Boston Soc. of Civ. Eng. 53, n° 3, p. 272-317 (Boston, Juillet 1966)

- (3) CHRISTENSEN R.W. et WU T.H., "Analysis of clay deformation as a rate process", Proc. ASCE 90, S.M 6, p. 125.
- (4) CHRISTIE I.F., "A reappraisal of Merchant's contribution to the theory of consolidation", Trad. LCPC 65 TRD 5.
- (5) COLLEY, "Construction of Highways over peat and muck areas", Am. High. 29, n° 1 p. 1.10 (1950).
- (6) COOK P.M., "Consolidation characteristics of organic soils", NRC.ACSM Porc. 9th musk. res. conf., T.M 41 p 112 (1956).
- (7) COX J.E., "A review of the Vane-test", Inst. of Eng. Australia 1966.
- (8) CUPERUS J.T.A., "Permeability of peat by water", Proc. 2 ICSMFE, I., III/b, p. 258-264 (Rotterdam, 1948).

D

- (1) DUBOIS-WEILL-ALLAIS, "Les tourbières Françaises", Mémoire pour le Ministère de l'Industrie et du Commerce, Direction des Mines, 1947.
- (2) DUNCAN R.D., WILLIAMS F.H.P., DALZEILL J.S.K., "Etablissement d'un remblai sur la tourbe, une expérience de mise en place par explosion", IX Congrès Int. de la route, 27, p. 1-20 (Lisbonne, 1951).
- (3) DUNN I.S. et NIELSEN J.P., "Non linear viscosity in secondary consolidation", Bull S.M. 66-1, Eng. Expt. Stat., Utah, State Univ. (1966).

E

- (1) ERCHOV V.I. (Russe), "Appareil de détermination rapide de la teneur en eau d'une tourbe", Trad. L.C.P.C. n° 60-3, (1957).
- (2) ERLNBACH L., "Strassendämme auf weichem untergrund", Die Bautechnik n° 5, p. 42-44 (Février 1956), Trad. L.C.P.C. n° 63 T 61.
- (3) EVGENIEV I.E. (Russe), "La théorie de la consolidation par drainage est-elle applicable aux sols tourbeux", Trad. L.C.P.C. n° 65 T 15,

- (4) EVGENIEV I.E. (Russe), "Un moyen simple pour construire des remblais sur terrains tourbeux", Trad. L.C.P.C. n° 64 T 35.
- (5) EVGENIEV I.E. (Russe), "Compactage de la tourbe à la base d'un remblai à l'aide d'un compactage à disques", Trad. L.C.P.C. fiche DIRR n° 2404.
- (6) EVGENIEV I.E., (Russe), "De l'efficacité des drains verticaux dans les sols tourbeux", Trad. L.C.P.C. fiche DIRR n° 2552.
- (7) EYDT H.R., STEWART J., RADFORTH N.W., "The structural aspect of peat", NRC.ACSSM Proc. 7th musk. res. conf., T.M 71, p. 12-35 (Février 1961).

F

- (1) FEDOTOV A.I. et CURAEV N.V., "Processus de formation de structure lors du séchage de tourbe viscoplastique", Kolloid Z, Moscou, vol. XXVIII (1966) p. 295-301.
- (2) FEUSTEL I.C. et BYERS H.G., "The physical and chemical characteristics of certain american peat profiles", U.S.D.A. Tech. Bull. 214 (1930).
- (3) FIRTION F., "Variations sylvatiques Flandriennes dans le Jura français", C.R.A.S. tome 223, p. 100-101 (1946).
- (4) FLAATE K., "The classification of peat and peat deposits for engineering purposes", NRC. ACSSM Proc. 11th musk. res. conf., T.M 87 (Ottawa, Mars 1966), p. 13-25.
- (5) FLAATE K., "Factors influencing the results of the vane test", Can. Geot. Journ., vol 3, p. 18 (1966).
- (6) FLAATE K., et RYGG N., "Sciures de bois pour remblais routiers sur terrains bourbeux", Statens. Vegvesen, Veglaboratoriet, n° 16, p. 1-5 (Oslo, 1964).
- (7) FLORIN V.A., "Soil Mechanics and Foundation Engineering", vol 3, Gosstroyizdat (Moscou, 1961).
- (8) FRYBOURG M., "Choix d'une solution pour la traversée des vallées tourbeuses", A.I.T.B.T.P., n° 194, p. 154-175 (Février, 1964).

G

- (1) GEBHART et WOJAHN, "La perméabilité à l'eau des tourbes de tourbières basses", z. Landeskult., Dtsch., vol 6 n° 4, p 293-304 (1965).
- (2) GEUZE E.C.W.A. et TAN T.K., "The mechanical behaviour of clays", Proc. 2e Int. Cong. Rheol., p 247 (1954).
- (3) GIBSON R.E. et LO K.Y., "A theory of consolidation for soil exhibiting secondary compression", Norv. Geot. Inst. pub., n° 41 (1961).
- (4) GIROUD J.P., "Thèse de Doctorat ès-Sciences, à paraître (Grenoble, 1969).
- (5) GIROUD J.P. et WATISSEE H., "Tassements et contraintes dans une couche d'épaisseur finie supportant une bande uniformément chargée", (1969 Grenoble), à paraître.
- (6) GIROUD J.P. et WATISSEE H., "Tassements et contraintes dans une couche d'épaisseur finie supportant une digue", -(Grenoble, 1969), à paraître.
- (7) GOODMAN L.J. et LEE C.N., "Laboratory and Field data on engineering characteristics of some peat soils", NRC.ACSSM Proc. 8th musk. res. conf., T.M.74, p 107-129 (Ottawa, Octobre 1962).
- (8) GORHAM E., "Some chemical aspects of wetland ecology", NRC.ACSSM Proc. 12th musk. res. conf., T.M 90, p. 20-38 (Ottawa, Mars 1967).
- (9) GUSEVA V.I., "Etude de sols organiques, saturés, non consolidés", Trad. L.C.P.C. Fiche DIRR 21.484.

H

- (1) HAEFELI R., "Creep problems in soil, snow and ice", Proc. 3 ICSMFE III, p. 239 (1953).
- (2) HANRAHAN E.T., "Routes sursol de tourbe", IX Congrès Int. de la route, n° 26, p. 1-15 (Lisbonne, 1951).

- (3) HANRAHAN E.T., "The mechanical properties of peat with special references to road construction", Bull. Inst. Civ. Eng. Ireland, 78, vol 5, p. 179-215
- (4) HANRAHAN E.T., "An investigation of some physical properties of peat", Geot. 4, n° 3, p. 108-123 (Septembre, 1954).
- (5) HANRAHAN E.T., "A review of the engineering characteristics of peat", ASCE.SMFD. vol. 85, n° 4, p. 161-162 (1959).
- (6) HANRAHAN E.T., "A road failure on peat", Geotech. 14, n° 3, p. 185-203 (1964).
- (7) HANRAHAN E.T., "Problems of roads on peat and organic subsoils", Journ. Inst. High. Eng., vol.14, n° 4, p. 19-23 (Londres, Avril 1967).
- (8) HANRAHAN E.T. et WALSH J.A., "Investigation of the behaviour of peat under varying stress and strain", Proc. 6 ICSMFE, vol 1, p. 226-230 (1965).
- (9) HANRAHAN E.T. et DUNNE V.G., "Shear strength of peat", Proc. Geot. Conf. I, p 193-198 (Oslo, 1967).
- (10) HARDY R.M., "Research on shearing strength of muskeg and its application", NRC.ACSSM Proc. 10th musk. res. conf., T.M 85 , p 25-32 (Ottawa, Mai 1965).
- (11) HARDY R.M. et THOMSON S., "Measurements of the shearing strength of Muskeg", NRC.DBR. Proc. East. Musk. res. conf., T.M 42, p. 16-24 (Février 1956).
- (12) HELENELUND K.V., "Vane tests and Tension tests on fibrous peat", Proc. Geot. Conf., I, p 199-203, (Oslo, 1967).
- (13) HILLIS S.F. et BRAWNER C.O., "The compressibility of peat with reference to the construction of major Highways in B C", NRC.ACSSM Proc. 7th musk. res. conf., T.M 71, p. 204-227 (Décembre 1961).
- (14) HOFSTETTER R.H., "Some observations of the permeability properties of peat", NRC ACSSM Proc. 9th musk. res. conf., T.M 81, p 195-204 (Avril 1964).
- (15) HOLMSEN G., "The vegetation and peat type in our peat deposits", Norges Geologiske Undersökelse, n° 99, (Oslo, 1923).

I

- (1) I.N.S.A. (Lyon), "Etudes sur la tourbe", Rapports non publiés.
- (2) ISHER A., "Relation entre le pH et la végétation dans les tourbières", Soc. Neuchâteloise de Sc. Nat., n° 63 p. 37 (1938).
- (3) ISHII V., "Symposium on consolidation testing of soils- General discussion", ASTM Spec. Tech. Pub. 126, p. 103 (1951).

J

- (1) JAECKLIN F.P., "Le remblai expérimental d'Oerlingen", Trad. L.C.P.C. 64 T 102.
- (2) De JONG G.D. et GEUZE E.C.W.A., "A capacitive cell apparatus" Proc. 4 ICSMFE, I, p 52 (1957).

K

- (1) KARST H. et BOURGES F., "Remblais sur sols compressibles", Suppl. AITBTP n° 203, p. 1361-1384 (Paris, Novembre 1964).
- (2) KARST H. et BOURGES F., "La construction des remblais sur sols compressibles", Bull. Liaison Lab. Rout. P.C., n° 23 p. 2-1/2-16 (Paris, Janvier-Février 1967).
- (3) KAZARNOVSKIJ V.D., "Estimation de la stabilité de remblais à ériger sur sols mous", (Russe), Trad. L.C.P.C. Fiche DIRR 2261.
- (4) KEENE P., "A review of engineering characteristics of peat", ASCE.SMFD vol. 86, n° 2, p. 71-72 (1960).
- (5) KENNEY T.C. et ZEGARRA E.J., "A review of engineering characteristics of peat", Discussion. ASCE.SMFD 85, n° 3 p. 89-93 (Juin 1959).
- (6) KOPPEJAN A.W., "A formula combining the TERZAGHI load compression relationship and the BUISSMAN secular time effect", Proc. 2 ICSMFE p. 32-37 (Rotterdam, 1948).

- (7) KRYNINE D. et JUDD W., "Principles of engineering geology and geotechnics", Mc Graw Hill (New York, 1957).
- (8) KRZYWICKI H.R. et WILSON N.E., "Viscosity measurements to determine the shear strength of peat", NRC.ACSSM Proc. 10th musk. res. conf., TM 85 p. 119-130 (Ottawa, Mai 1965).
- (9) KUZAHMETOVA E.K., (Russe), "A propos de la prise en considération des déformations élastiques d'un sol de fondation tourbeux dans les projets de remblais sur marécage", Trad. L.C.P.C. Fiche DIRR n° 13 104.

L

- (1) LAKE J.R., "Pore pressure and settlement measurements during small scale an laboratory experiments to determine the effectiveness of vertical sand drains in peat", Proc. Pore Press. and Succ. in Soils Conf., Butterworths, p. 103-107 (Londres, 1960).
- (2) LAKE J.R., "Investigations of the problem of constructing roads on peat on Scotland", NRC. ACSSM Proc. 7th musk. res. conf., TM 71, p. 133-148 (Décembre 1961).
- (3) LEA N.D., "Notes on the mechanical properties of peat", NRC.ACSSM Proc. 4th musk. res. conf., TM 54, p. 53-58 (Mars 1958).
- //(4) LEA N.D. et BRAWNER C.O., "Highway design and construction over peat deposits in B.C.", H.R.R. n° 7, p. 1-33 (1963).
- (5) LEA N.D. et BRAWNER C.O., "Prerequisites for design of engineering works on organic terrain", NRC.ACSSM Proc. 9th musk. res. conf., T.M. 81, p. 20-74 (Avril 1964).
- (6) LEONARD G.A., "Foundations Engineering", Mc Graw Hill (New York, 1962).
- (7) LEONARD G.A. et GIRAULT P., "A study of the one dimensional consolidation test", Proc. 5 ICSMFE vol. I, p. 213 (Paris, 1961).
- (8) LEONARD G.A. et ALTSCHAPPL A.G., "Compressibility of clay", Proc. ASCE 90, SM 5, p. 153 (1964).
- (9) LEUSSINK H. et WENZ K.P., "Comparison of field vane and laboratory shear strengths of soft cohesive clays", Proc. Geot. Conf., I, p. 71-75 (Oslo, 1967).

- (10) LEWIS W.A., "The settlement of the approach embankments to a new road bridge at Lockford W.S", Geotech. 6, n° 3, p. 106(114 (Septembre 1956).
- (11) LISTVAN I.I. (Russe), "Modifications de propriétés élasto-cinétiques de la tourbe lors de la dispersion et sous l'influence de l'addition d'électrolytes", Trad. L.C.P.C. fiche DIRR n° 2289.
- (12) LO M.B. et WILSON N.E., "Migration of pore water during the consolidation of peat", NRC.ACSSM Proc. 10th musk. res. conf., TM 85, p. 131-142 (Mai 1965).

M

- (1) MAC ALEENAN J.J., "The construction of road embankments through peat", J. Inst. High. Eng. 14, n° 4, p. 28-32; (Londres, Avril 1967).
- (2) MAC FARLANE I.C., "Techniques of road construction over organic terrains", NRC. DBR Proc. East musk. res. conf., TM 42 (Février 1956).
- (3) MAC FARLANE I.C., "Guide to a field description of "Muskeg", NRC. ACSSM TM 44, (Juin 1958).
- (4) MAC FARLANE I.C., "A review of the engineering characteristics of peat", ASCE n° 85, p. 21-35 (Février 1959).
- (5) MAC FARLANE I.C., "Evaluation of road performance over Muskeg in N. Ontario", NRC.ACSSM Proc. 6th mus. res. conf., TM 67 p. 38-49 (Février 1961).
- (6) MAC FARLANE I.C., "Aspects of research and development of roads over organic terrain in Japon", NRC. ACSSM Proc. 7th musk. res. conf., TM 71 p. 149-154, (Décembre 1961).
- (7) MAC FARLANE I.C., "The consolidation of peat. A litterature review", NRC. DBR, TM 185 (Ottawa, 1965).
- (8) MAC FARLANE I.C., "The corrosiveness of Muskeg waters. A review", Can. Geot. Journ. II, n° 4, p. 327-336 (Toronto, Novembre 1965).
- (9) MAC FARLANE I.C., "Peat structure as a basis of classification", NRC. ACSSM Proc. 11th musk. res. conf., TM 87 p. 26-31 (Mai 1966).

- (10) MAC FARLANE I.C. et RUSKA A., "An evaluation of pavement performance over muskeg in N. Ontario", HRB n° 316 p. 32-43 (Octobre 1962).
- (11) MAC FARLANE I.C. et ALLEN C.M., "An examination of some index test procedures for peat", NRC.ACSSM Proc. 9th musk. res. conf., TM 81, p. 171-183 (Ottawa, Avril 1964).
- (12) MAC FARLANE I.C. et RADFORTH N.W., "A study of the physical behaviour of peat derivatives under compression. A progress report", NRC.ACSSM Proc. 10th musk. res. conf., TM 85, p. 159-164 (Mai 1965).
- (13) MADHAV M.R. et SRIDHARAN A., "Analysis of primary and secondary consolidation. Discussion", ASCE.SMFD., p. 233-236 (Juillet, 1963).
- (14) MERZON M.D. (Russe), "Mécanisation de l'exécution des drains de sable verticaux dans les sections tourbeuses", Trad. L.C.P.C. fiche DIRR n° 24 206.
- (15) MICKLEBOROUGH B.W., "Embankment construction in muskeg at Prince Albert", NRC. ACSSM Proc. 7th musk. res. conf., TM 71 p. 164-185 (Février 1961).
- (16) MIYAKAWA I., "Some aspects of road construction over peaty or marshy areas in Hokkaido, with particular reference to filling methods", Civ. Eng. Res. Inst., Hokkaido Develop. Bureau (Japon, 1960).
- (17) de MONTGOLFIER P., "La tourbe et ses utilisations", Dunod, (Paris, 1942).
- (18) Von MOSS et GAUTSCHI, "Quelques résultats obtenus en Suisse sur les remblais routiers expérimentaux édifiés sur sols compressibles", Trad. L.C.P.C. 64 T 46.
- (19) Von MOSS et GAUTSCHI, "La construction autoroutière sur la tourbe d'après l'expérience Suisse", Trad. L.C.P.C. 65 TRD 1.
- (20) MULLER et Von MOSS, "Determination of organic matter for the classification of soil samples", 6e ICSMFE I, p. 77-79 (1965).
- (21) MURAYAMA S. et SHIBATA T., "On the secondary consolidation of clay", Proc. 2 Japan Cong. Test. Mat., p. 178 (1959).
- (22) MURAYAMA S. et SHIBATA T., "Flow and stress relaxation of clays", IUTAM Symp. Rheol. Soil Mech., p. 99 (Grenoble, 1964).

O

- (1) OHIRA Y., "Some engineering researches on the experiments of the physical properties of the peat and on the sounding explorations of the peaty area in Hokkaido", Memoirs of the Defence Academy II-2, p. 253-282 (1962).

P

- (1) PELTIER, "Manuel du laboratoire routier", Dunod (Paris, 1950).
- (2) PHALEN T.E., "Discussion", 5e ICSMFE, III, section 7, p. 379-380 (1961).
- (3) PIHLAINEN J.A., "Construction on Muskeg. A summary and compilation of current practise", U.S. Army Mat. Com. Cold reg. res. and Eng. Lab. (Hanover, Mai 1965), Tech. Rep. 134, p. 136.
- (4) PIHLAINEN J.A., "A progress report on a mechanical analysis of organic material", NRC. ACSSM Proc. 9th musk. res.conf. TM 81, p. 161-170 (Avril 1964).
- (5) PONTS ET CHAUSSEES-OTR LYON, Div. Laboratoire, "Remblai expérimental de Bourgoin", non publié.
- (6) Von POST, "The peat resources of S. Sweden", (Suédois), Sueriges Geologiska Undersökning, n° 2, Arsbork 1925.
- (7) POTONIE H., "Classificationn et terminologie des roches biolithes inflammables et récentes et leur situation", Abhandlungen der Königlich Preussischen Geologischen landesanstalt u Bergakademie, vol 49 p. 94 (Berlin, 1906).
- (8) PUTZ A., "Contribution à l'étude de la consolidation", Thèse de 3e Cycle, Fac. Sci. (Grenoble, 1967).

R

- (1) RADFORTH N.W., "Suggested classification of muskeg for engineers", NRC. DBR, T.M. 24 p. 12 (1953).
- (2) RADFORTH N.W., "Theory of measurement in relation to drainage and bearing strength of Muskeg", NRC. ACSSM Proc. 4th musk. res. conf., TM 54 p. 59-79 (Mars 1958).

- (3) RADFORTH N.W., "Muskeg research in USSR", NRC.ACSSM Proc. 4th musk. res. conf., TM 54, p. 8-10 (Mars 1958).
- (4) RADFORTH N.W., "Development of the muskeg classification system", NRC. ACSSM Proc. 10th musk. res. conf., TM 85 p. 11-15 (Mai 1965).
- (5) RADFORTH N.W., "Muskeg", 6e ICSMFE, III, p. 149-154 (1965).
- (6) RADFORTH N.W. et MAC FARLANE I.C., "Correlation of palaeobotanical and engineering studies of muskeg in Canada", 4e ICSMFE, I, 1a/23, p. 93-97 (1957).
- (7) RADFORTH N.W. et AGHDOWN K.H., "The procurement of physical and mechanical data from organic terrain", NRC ACSSM Proc. 6th musk. res. conf., T.M 67, p. 88-104 (Février 1961).
- (8) RADFORTH N.W. et AGHDOWN K.H., "Density and water measurements in peat by radio-active methods", NRC. ACSSM Proc. 8th musk. res. conf., T.M.74, p. 27-30 (Octobre 1962).
- (9) RADOMAN B.A. (Russie), "Exécution de drains de sable verticaux en zones marécageuses", Trad. I.C.P.C. fiche DIRR n°24207.
- (10) RAYMOND G.P., "Rate of settlement and dissipation of pore water pressure during consolidation of clays", Ph. D.Thesis Univ. London (1965).
- (11) RAYMOND G.P., "Consolidation of slightly over consolidated soils", Proc. ASCE 92, SM 5, p. 1 (1966).
- (12) RINGELING J.C.N., "Measuring groundwater pressures in a layer of peat caused by an imposed load", 1st ICSMFE, V, 1, p. 106-111 (1936).
- (13) RIPLEY C.F. et LEONOFF C.E., "Embankment settlement behaviour on deep peat", NRC. ACSSM Proc. 7th musk. res. conf., TM 71, p. 185-204 (Décembre 1961).
- (14) ROOT A.H., "California experience in construction of highways across marsh deposits", HEB, n° 173, p. 46-64 (1958).
- (15) ROSCOE K.H., SCHOFIELDS A.N., WROTH C.P., "On the yielding of soils", Geotech. VIII, 1, (1958).
- (16) ROSENQVIST I.T., "Mechanical properties of soils : soil water systems", Communication privée à BARDEN (1966).

- (1) SCHIFFMAN R.L., "The use of visco-elastic stress-strain laws in soil testing", ASTM Spec. Techn. pub. 254, p. 131 (1959).
- (2) SCHIFFMAN R.L., LADD C.C., CHEN A.T., "The secondary consolidation of clays", IUTAM Symp. Rheol. Soil. Mec., p. 273 (Grenoble, 1964).
- (3) SCHROEDER J. et WILSON N.E., "Analysis of secondary consolidation of peat", NRC. ACSSM Proc. 8th musk. res. conf., T.M 74, p. 130-144 (Octobre 1962).
- (4) SEVALDSON R., "Remblai expérimental d'Horgen", Trad. L.C.P.C. 64 T 103.
- (5) SKEMPTON A.W., "Discussion on the planning and design of the new Hong-Kong airport", Proc. Inst. Civ. Eng. vol.7, p 305-307 (1957).
- (6) SMITH D.C., "Chemical composition of the peat bogs of the maritime province", Can. Jour. of Soil Sci., 38, p. 120-127 (Août 1958).
- (7) SOPER E.K. et OBSON C.C., "The occurrence and uses of peat in U.S.", U.S. Geol. Surv., 728, (Washington, 1922).
- (8) STANEK W., "The properties of certain peats in N. Ontario", Thesis, Univ. Toronto, Dept of Forestry (Avril 1961).
- (9) STEWART J.M., "An understanding of peat organisation on the basis of cuticular studies", NRC. ACSSM Proc. 9th musk. res. conf., T.M 81 p. 184-195 (Avril 1964).

T

- (1) TAN T.K., "Discussion", Proc. 4e ICSMFE, III, p 278 (1957).
- (2) TAYLOR D.W., "Research on the consolidation of clays", Serial 83, H.I.T. Pub. (1942).
- (3) TAYLOR D.W., "Fundamentals of Soil Mechanics", John Wiley and Sons (1948).
- (4) TAYLOR D.W. et MERCHANT W., "A theory of clay consolidation accounting for secondary compression", J. Math. Phys. vol. 19 p. 167.
- (5) TERZAGHI K. et PECK R.C., "Mécanique des Sols appliquée aux T.P. et aux bâtiments", Dunod -(Paris, 1965).

- (6) TESSIER G., "Deux exemples types de construction de routes sur Muskegs au Québec", NRC. ACSSM Proc. 11th musk. res. conf., T.M 87 p. 92-141 (Mai 1966).
- (7) TESSIER G., "Etude complémentaire sur les surcharges dans les savannes de NAPIERVILLE", NRC. ACSSM Proc. 12th musk. res. conf., T.M 90, p. 107-129 (Mars 1967).
- (8) THOMPSON J.B. et PALMER L.A., "Report of consolidation tests with peat", ASTM Symp. of Consol. of Soils, Tech. pub. 126 p. 4-8 (1951).
- (9) THOMPSON W.J., "Some deformation characteristics of a saturated remoulded silty clay", Proc. 6e ICSMFE, I, p. 273 (1965).
- (10) THURBER R.C., "Construction experience in peat bogs and muskeg in D.C.", NRC. ACSSM Proc. 9th musk. res. conf., T.M 67 p. 1-6 (Février 1961).
- (11) THURBER R.C., "Some methods of construction in peat bogs and swamps in D.C.", NRC. ACSSM Proc. 10th musk. res.conf. T.M 85, p. 59-69 (Mai 1965).
- (12) TKACENKO S.S. (Russe), "A propos de l'application à la tourbe de la théorie de consolidation par drainage", Trad. L.C.P.C. n° 64 T 45.
- (13) TRESIDDER J.O., "A review of existing methods of road construction over peat", Dept. of Scien. Indust. Res. Road. Res. Labo. Tech. Paper, n° 40, p. 1-27 (1958).
- (14) TRISIN G.G., "Calcul du tassement des remblais sur la tourbe au cours du temps" (Russe), Travaux du Soluzdorni, fasc. 1, p. 110-118 (Moscou, 1964).

V

- (1) VAN ZONDEREN BAKKER E.M., "South African pollen grains and spores", A.A. Balkema, part I, II, III (1953, 1956, 1959).
- (2) VERMYNCK S., "Contribution à l'étude et aux utilisations industrielles des tourbes françaises", Thèse Ing.-Doc., Univ. Strasbourg (1947).
- (3) VIALOV S.S. et SKIBITSKY A.M., "Problems of the rheology of soils", Proc. 5e ICSMFE, I, p. 387 (1961).

W

- (1) WAHLS H.E., "Analysis of primary and secondary consolidation", Proc. ASCE 88, SM 6, p. 207 (1962).
- (2) WARD W.H., "A slip in a flood defence bank constructed on a peat bog", 2nd ICSMFE, 2, p. 19-23 (Rotterdam, 1948).
- (3) WARD W.H., PENMAN A., GIBSON R.E., "Stability of bank on a thin peat layer", Geotec. 5, n° 2, p. 154-163 (Juin 1955).
- (4) WARNOCK T.A., "Construction of roads on peat foundations using light-weight raft", Journ. of Inst. High. Eng., 14, n° 4, p. 24-27 (Avril, 1967).
- (5) WATANABE S., "Consolidation characteristics of peat", Soil and Found., V, n° 1 (Décembre 1964).
- (6) WATISSEE H., "Tassements et champs de contraintes de massifs bidimensionnels régis par l'élasticité linéaire ou non linéaire", Thèse de 3e Cycle, Univ. Grenoble (1968).
- (7) WILSON N.E., "Consolidation and flow characteristics of peat", NRC. ACSSM Proc. 9th musk. res. conf., T.M 81 p. 150-160 (Avril 1964).
- (8) WILSON N.E., RADFORTH, MC FARLANE, LO, "The rates of consolidation for peat", Proc. 6e ICSMFE, I, (1965).
- (9) WILSON N.E., RADFORTH et LO M.B., "The progress of consolidation in an organic soil", NRC. ACSSM Proc. 11th musk. res. conf., T.M 87, p. 1-12 (Mai 1966).
- (10) WINNACKER K. et KUCHLER L., "Traité de chimie appliquée", Eyrolles, Paris.

Z

- (1) ZEGARRA E.J., "A review of the engineering characteristics of peat- Discussion", ASCE SMFD, 85, SM 3, p. 89-93 (Juin 1959).

A N N E X E N° 1

1. DROITES DE REGRESSION.

Quand on étudie, dans un ensemble, deux caractères X et Y, et que l'on porte les points figuratifs dans un système d'axes XOY, on obtient un diagramme de dispersion.

1.1. DROITE DE REGRESSION DE Y en X.

C'est la droite dont la somme des carrés des distances aux divers points figuratifs est minimale, cette distance étant comptée parallèlement à OY. Cette droite (R) passe par le point moyen du nuage $\bar{X} = \frac{1}{n} \sum X_i$, $\bar{Y} = \frac{1}{n} \sum Y_i$ et a pour pente :

$$p = \frac{\sum (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sum (X_i - \bar{X})^2}$$

1.2. DROITE DE REGRESSION DE X en Y.

On peut définir de la même façon une droite (R') de régression de X en Y.

Si les deux droites sont confondues, la liaison est dite rigide et linéaire. (R') passe également par le point moyen et a pour pente :

$$p' = \frac{\sum (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sum (Y_i - \bar{Y})^2}$$

Les deux droites coïncident si $pp' = 1$.

2. COEFFICIENT DE CORRELATION.

=====

On peut définir un coefficient de corrélation :

$$\underline{r^2 = p.p'} \quad 0 < r^2 < 1$$

Si $r^2 = 1$ les deux droites de régression sont confondues, si $r^2 = 0$ les deux droites de régression sont perpendiculaires et parallèles aux axes :

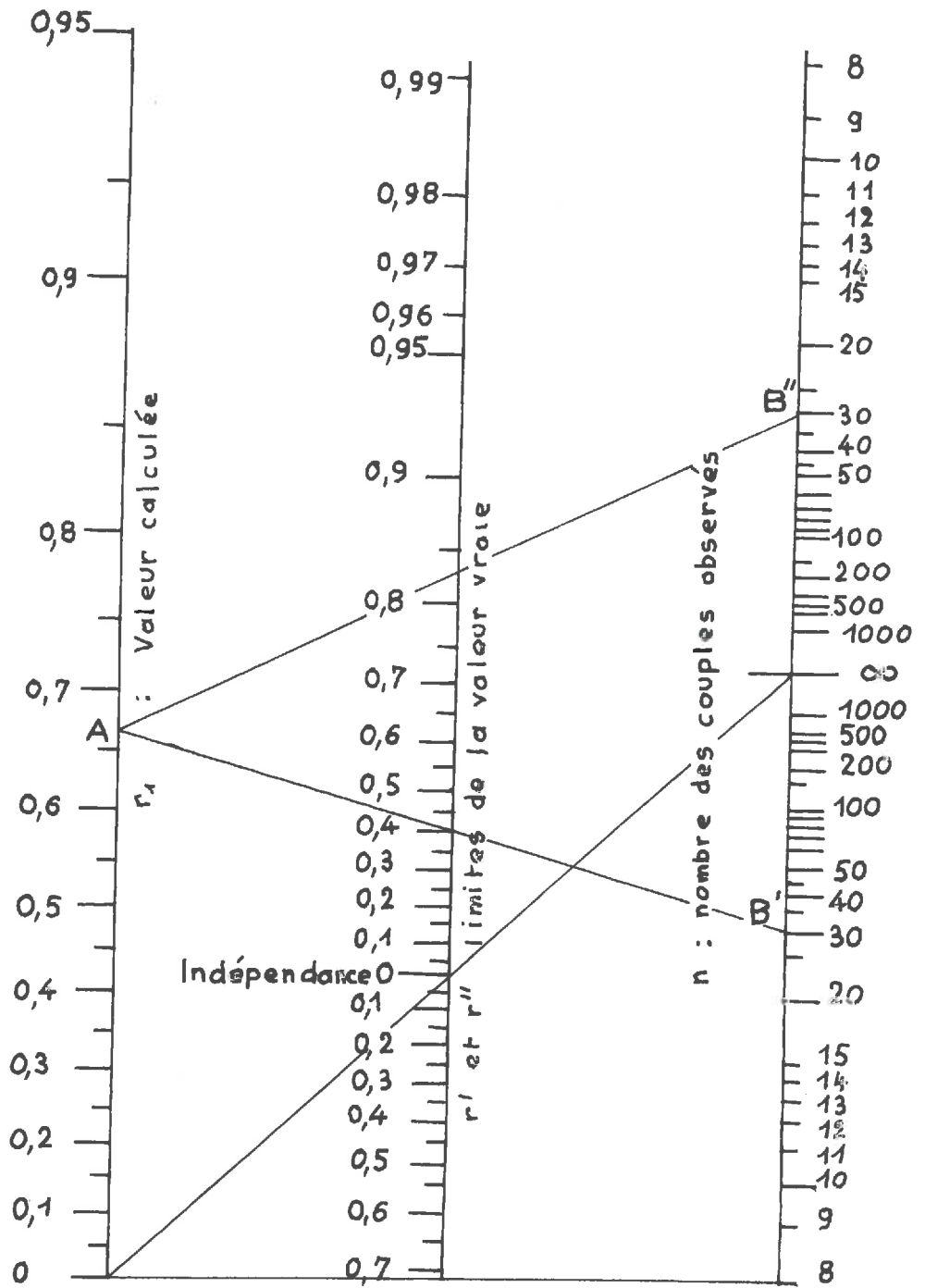
$$r = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sigma_x \sigma_y}$$

σ_x, σ_y écarts-types.

En fait, on opère toujours sur un échantillon et le coefficient de corrélation r n'est qu'une estimation du coefficient ρ de la population globale. Il convient donc de tester le degré de signification de r .

Le graphique de la page suivante permet de déterminer pour un intervalle de confiance $r' r''$ au seuil de signification 5 %.

Sur l'échelle de gauche on porte A , la valeur de r trouvée à partir d'un échantillon de taille n . Sur l'échelle de droite on porte n de part et d'autre du point central (∞), d'où les points B' et B'' . On joint AB' et AB'' , leur intersection avec l'échelle du milieu délimite la zone d'indétermination du coefficient de corrélation de la population totale.



Zone d'indétermination du coefficient de corrélation

3. ERREUR TYPE MAXIMALE.

=====

On peut maintenant définir l'erreur-type maximale, au seuil de signification 5 %.

pour Y par rapport à X $S_y = \sigma_y \sqrt{1-r'^2}$

pour X par rapport à Y $S_x = \sigma_x \sqrt{1-r'^2}$

A N N E X E N° 2

TABLEAU DES VALEURS NUMERIQUES DES POINTS DES FIGURES

A N N E X E N° 3

TABLEAU DES VALEURS NUMERIQUES DES POINTS DES FIGURES

ANNEXE n° 3

e	K	e	K	e	K	e	K	e	K	e	K	e	K		
	cm/mm		cm/mm		cm/mm		cm/mm		cm/mm		cm/mm		mm/mm		
9	$2 \cdot 10^{-3}$	12	$4 \cdot 10^{-4}$	10	$3 \cdot 10^{-4}$	1,8	$2,5 \cdot 10^{-3}$	6,2	$7,2 \cdot 10^{-3}$	10,2	$2 \cdot 10^{-6}$	roug les points			
10	$7,3 \cdot 10^{-4}$	10,8	$1,9 \cdot 10^{-4}$	9,7	$7 \cdot 10^{-4}$	2,2	$1,1 \cdot 10^{-3}$	4,0	10^{-7}	13,0	$5 \cdot 10^{-6}$	précédents plus			
11	$2,6 \cdot 10^{-3}$	8,9	$5,5 \cdot 10^{-5}$	9,3	$4 \cdot 10^{-4}$	3,1	$2 \cdot 10^{-3}$	5,0	$1,2 \cdot 10^{-7}$			12	$4 \cdot 10^{-4}$		
12	$9 \cdot 10^{-3}$	7	$3,2 \cdot 10^{-6}$	7,5	$5 \cdot 10^{-5}$	4,8	$2,3 \cdot 10^{-3}$	5,3	$1,2 \cdot 10^{-7}$			6,75	$2 \cdot 10^{-6}$		
		6,5	$2 \cdot 10^{-7}$	5,7	$3 \cdot 10^{-6}$	2,1	$5,7 \cdot 10^{-3}$	5,1	$1,2 \cdot 10^{-7}$			4,50	$8 \cdot 10^{-9}$		
				4,2	$3 \cdot 10^{-7}$	3,1	$5,0 \cdot 10^{-3}$	7,0	$1,8 \cdot 10^{-7}$						
						4,0	$7,5 \cdot 10^{-3}$	8,0	$1,2 \cdot 10^{-7}$						
						2,3	$1,1 \cdot 10^{-8}$	6,0	$2,1 \cdot 10^{-7}$						
<u>Fig: 24</u>		<u>Fig: 26</u>		<u>Fig: 29</u>		2,7	$1,2 \cdot 10^{-8}$	7,2	$4,4 \cdot 10^{-7}$	<u>Fig 28</u>		<u>Fig 30</u>			
						3,0	10^{-8}	7,6	$4 \cdot 10^{-7}$						
5,8	$3 \cdot 10^{-6}$	3,2	10^{-7}			4,5	10^{-8}	6,5	$4 \cdot 10^{-7}$						
5,5	10^{-6}	3,8	$1,4 \cdot 10^{-7}$			3,0	$2,1 \cdot 10^{-8}$	6,5	$4,3 \cdot 10^{-7}$						
5,1	$7 \cdot 10^{-7}$	4,7	$2 \cdot 10^{-7}$			4,0	$1,3 \cdot 10^{-8}$	4,9	$4,3 \cdot 10^{-7}$						
4,5	$4 \cdot 10^{-7}$	5,2	$4 \cdot 10^{-7}$			4,1	$1,5 \cdot 10^{-8}$	8,5	$5,5 \cdot 10^{-7}$						
3,5	$8 \cdot 10^{-8}$	5,9	$7 \cdot 10^{-7}$			5,0	$1,4 \cdot 10^{-8}$	3,5	$5 \cdot 10^{-7}$						
3,0	$5 \cdot 10^{-8}$					6,1	$1,4 \cdot 10^{-8}$	8,0	$7,5 \cdot 10^{-7}$						
2,3	$4 \cdot 10^{-8}$					3,2	$4,9 \cdot 10^{-8}$	9,5	$8 \cdot 10^{-7}$						
						3,8	$5,2 \cdot 10^{-8}$	11,0	10^{-6}						
<u>Fig 25</u>		<u>Fig 27</u>				4,0	$5,0 \cdot 10^{-8}$	5,2	$1,2 \cdot 10^{-6}$						
						5,5	$5,2 \cdot 10^{-8}$	7,2	$1,2 \cdot 10^{-6}$						
						6,0	$7 \cdot 10^{-8}$	9,6	$1,2 \cdot 10^{-6}$						

A N N E X E N° 4
=====

TABLEAU DES VALEURS NUMERIQUES DES POINTS DES FIGURES

ANNEXE n° 4

e	C _c	e	C _c	e	C _c	e	C _c	e	C _c	e	C _c	e	C _c	e	C _c
0,90	0,2	6,0	3,2	10,1	4,2	8,1	3,75	3,4	3,19	2,2	2,3	7,6	5,5		
1,10	0,5	6,0	2,8			10	6,11	3,6	3,19	2,9	2,0	8,3	6,0		
1,15	0,1	6,0	2,6			13,8	8,30	4,4	5,0	3,4	2,1	9,3	6,7		
1,25	0,35	6,5	2,4			4,6	2,0	1,8	2,13	3,7	2,7	9,8	8,2		
1,45	0,35	6,6	2,6			7,1	4,25	2,5	3,13	3,0	3,5	11,0	6,0		
1,45	0,5	6,7	2,9			7,4	4,05	2,7	3,19	3,2	3,5	12,5	9,4		
1,65	0,4	6,9	3,4			8,2	6,65	3,2	4,1	5,2	1,9	15,2	8,2		
1,80	0,35	7,1	3,75			11,0	9,40			4,5	2,8				
2,70	1,8	7,3	3,85			4,0	2,66			5,0	3,2				
2,70	1,5	7,5	4,5			5,4	3,19			5,5	4,1				
2,80	1,0	8,3	4,3			5,8	4,52			5,5	4,1				
3,00	1,0	8,3	3,55			6,2	4,52			5,3	4,1				
3,10	1,15	8,3	3,15			6,2	5,59			4,7	4,3				
3,35	1,25	8,6	3,95			8,4	8,0			4,7	4,3				
3,50	1,35	8,7	4,4			3,2	2,66			4,7	4,3				
3,70	0,90	8,8	3,85			4,4	3,19			5,0	5,2				
4,25	1,25	9,1	3,95			4,5	3,99			6,5	4,7				
4,90	2,5	9,1	4,4			4,7	4,25			7,0	4,7				
5,20	3,2	9,2	4,85			4,9	3,99			7,8	4,3				
5,30	2,8	9,9	4,3	fig: 33		2,5	2,13	fig: 34		9,2	3,6	fig: 35			
5,5	2,6	10,0	4,2			2,8	2,13			7,2	6,8				

A N N E X E N° 5
=====

TABLEAU DES VALEURS NUMERIQUES DES POINTS DES FIGURES

ANNEXE n° 5

e	E' b	e	E' b	e	E' b	e	E' b	e	E' b	e	E' b	e	E' b	e	E' b
1,8	14,0	5,2	4,21	13	0,71	10,6	1,16	7,7	2,42	4,6	6,20				
2,5	11,7	7,0	1,33	12,8	0,70	9,4	1,0	7,2	2,34	4,3	4,05				
2,7	12,3	8,4	1,24	12,7	0,73	9,4	1,07	7,3	2,51	4,4	8,8				
3,0	10,0	8,4	0,85	12,9	0,74	10,1	1,1	6,9	2,63	3,5	4,37				
2,5	8,75	10	0,60	11,6	0,70	10,3	1,1	7,4	1,79	4,0	8,0				
2,8	9,50	13,8	0,59	11,9	0,73	9,1	1,12	7,2	1,96	2,8	7,6				
3,4	7,34			12,5	0,80	10,3	1,25	6,9	1,93	3,7	7,4				
3,6	7,66			12,1	0,90	8,1	1,19	6,8	2,11	3,0	10				
4,2	5,2			12	0,92	8,5	1,13	6,4	2,11	1,9	9,65				
3,2	4,2			11,4	0,89	8,5	1,18	6,4	2,17						
4,4	4,5			11,3	0,90	8,6	1,25	6,2	3,27						
4,5	3,66			11,6	0,99	8,8	1,17	6,4	3,70						
4,7	3,56			10,5	0,91	9,2	1,20	5,7	3,19						
4,9	3,94			10,8	0,97	10	1,16	6,0	4,65						
6,0	2,69			10,7	1,02	9,4	1,46	5,2	2,82						
4,0	2,50			10,3	0,95	9,6	1,49	5,6	5,05						
5,4	2,66			9,8	0,93	8,3	1,52	5,3	3,5						
5,8	2,0			11,0	1,09	7,9	1,56	5,5	6,5						
6,2	2,12			11,2	1,12	7,7	1,70	4,9	3,94						
6,2	1,71	fig: 38		10,9	1,13	8	1,87	5	6,65	fig: 39					
8,4	1,49			11,1	1,17	7,8	2,04	4,6	4,31						

ANNEXE n° 5

e	E' b	e	E' b	c	E' b	e	E' b	c	E' b
5,5	1,53	3,5	3,75	2,2	20,4	12,5	1,03	4,2	7,42
7,3	2,05	4,0	4,75	2,4	18	10	1,05		
6,5	1,88	4,2	4,95	2,5	20,8	10	1,10		
7,0	2,02	4,7	6,35	2,8	20,5	10,9	1,08		
7,2	2,16	4,4	6,35			3,0	1,06		
6,3	2,82	3,0	5,0			10,5	1,60		
6,7	2,40	3,0	5,34			8,5	1,44		
5,0	1,97	3,3	6,15			8,5	1,44		
7,7	2,95	3,0	8,90			3,5	1,70		
6,0	2,41	3,2	10,5			7,0	1,86		
8,1	3,40	3,4	12,5			7,8	1,87		
4,5	2,16	2,3	7,7			5,8	1,91		
6,0	2,75	2,4	7,75			6,6	2,52		
6,0	2,69	2,0	8,6			6,8	3,0		
6,3	2,98	2,0	9,4			6,0	4,12		
6,5	2,89	2,5	10,0			6,5	4,15		
7,2	3,68	2,5	10,9			6,0	5,0		
5,5	3,42	1,3	17,7			5,5	5,0		
4,3	3,12	1,4	18,5			5,2	4,75		
3,9	3,27	2,0	20	Fig. 40		4,7	7,13	Fig. 41	
4,98	4,60	2,0	29,2			4,5	7,32		