



Etude rhéologique et géotechnique de la craie

Jean Luc Dessenne

► To cite this version:

Jean Luc Dessenne. Etude rhéologique et géotechnique de la craie. Mécanique [physics.med-ph]. Université de Grenoble, 1971. Français. NNT : . tel-00783415

HAL Id: tel-00783415

<https://theses.hal.science/tel-00783415>

Submitted on 1 Feb 2013

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

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

205142
1971
4
Double

UNIVERSITÉ I DE GRENOBLE

205142

1971

Année 1971

N° enregistrement 4
au C.N.R.S.: A0 5175

THÈSE

présentée pour obtenir le grade de

DOCTEUR — INGÉNIEUR

par

J-L DESSENNE

Ingénieur E.N.S.G.

ÉTUDE RHÉOLOGIQUE
ET GÉOTECHNIQUE
DE LA CRAIE

Soutenue publiquement le 27 janvier 1971 devant la Commission d'Examen

MM. R. BARBIER

M. ROUBAULT

J. BIAREZ

M. DAYRE

P. DUFFAUT

Président

Examineurs

Invités

BIBLIOTHEQUE
GRENOBLE-SCIENCES
UNIVERSITAIRE

UNIVERSITÉ I DE GRENOBLE

Année 1971

N° enregistrement
au C.N.R.S.: AO 5175

205142

1971

4

THÈSE

présentée pour obtenir le grade de

DOCTEUR — INGÉNIEUR

par

J-L DESSENNE

Ingénieur E.N.S.G.

T. 71 / 661
ÉTUDE RHÉOLOGIQUE

ET GÉOTECHNIQUE

DE LA CRAIE

Soutenue publiquement le 27 janvier 1971 devant la Commission d'Examen

MM. R. BARBIER

Président

M. ROUBAULT

Examineurs

J. BIAREZ

M. DAYRE

Invités

P. DUFFAUT

BIBLIOTHÈQUE
GRENOBLE-SCIENCES
UNIVERSITAIRE



0520334365

AVANT-PROPOS,

Cette étude n'a été réalisable que grâce au concours et à l'appui d'un grand nombre de personnes qu'il m'est très agréable de remercier ici.

J'exprime ma sincère reconnaissance à Messieurs les Professeurs M. ROUBAULT et R. BARBIER qui m'ont très efficacement parrainé au Centre National de la Recherche Scientifique, et à Monsieur le Professeur BIAREZ qui a guidé par de nombreuses remarques l'élaboration finale de cette étude.

Monsieur BORDET, Chef de la Division géologique et géotechnique d'Electricité de France, avec beaucoup de bonne volonté, a facilité mon travail en m'accueillant dans le Laboratoire de Mécanique des roches du Centre d'Essais d'Albertville.

Ma gratitude va particulièrement à Monsieur DUFFAUT, Ingénieur à E. D. F., qui m'a initié à la Mécanique des roches et qui a su, grâce à un esprit très critique et un sens aigu de l'observation, m'apprendre à remettre en cause ou à modifier des jugements fondés sur des principes parfois erronés.

J'ai bénéficié pour l'équipement du Laboratoire des conseils et de l'efficacité exceptionnelle de Monsieur COMES, Ingénieur à E. D. F., que je remercie ici très chaleureusement.

Les soucis matériels, durant mon séjour à Albertville, m'ont été épargnés grâce à la compréhension de Messieurs JEANPIERRE et GERARD, Ingénieurs à la Région d'Equipement Hydraulique Nord d'E. D. F. à qui je dois également d'avoir pu suivre l'étude du site de Venteuil.

Je remercie Monsieur DAYRE qui m'a très cordialement accueilli dans son Laboratoire de Mécanique des roches de l'Université de Grenoble pour une longue série d'essais triaxiaux et Monsieur WACK qui m'a accordé toutes les facilités pour les mesures de densité par gammamétrie.

Je tiens à citer Messieurs AVRILLER et CUSIN du Laboratoire E. D. F. d'Albertville et Messieurs BARBET, GARNIER, GUIGUET et SEAUME des Laboratoires de Mécanique des sols et des roches de l'Université de Grenoble.

sité de Grenoble qui ont participé très activement aux essais et aux mesur
Qu'ils reçoivent ici l'expression de mes très sincères remerciements.

Je remercie Mesdemoiselles BIANCHIN et FAYOLLAT qui n'on
pas ménagé leur peine pour la dactylographie, et mes amis du Laboratoir
de Géologie, particulièrement Monsieur et Madame VIVIER, sans qui ce
mémoire n'aurait pu être terminé à temps.

DEUXIÈME PARTIE : MÉCANIQUE

Préface	10
Chapitre I - Définitions de la mécanique	11
1.1. Définitions de la mécanique	11
1.2. Définitions de la mécanique	12
1.3. Définitions de la mécanique	13
1.4. Définitions de la mécanique	14
1.5. Définitions de la mécanique	15
1.6. Définitions de la mécanique	16
1.7. Définitions de la mécanique	17
1.8. Définitions de la mécanique	18
1.9. Définitions de la mécanique	19
1.10. Définitions de la mécanique	20
1.11. Définitions de la mécanique	21
1.12. Définitions de la mécanique	22
1.13. Définitions de la mécanique	23
1.14. Définitions de la mécanique	24
1.15. Définitions de la mécanique	25
1.16. Définitions de la mécanique	26
1.17. Définitions de la mécanique	27
1.18. Définitions de la mécanique	28
1.19. Définitions de la mécanique	29
1.20. Définitions de la mécanique	30
1.21. Définitions de la mécanique	31
1.22. Définitions de la mécanique	32
1.23. Définitions de la mécanique	33
1.24. Définitions de la mécanique	34
1.25. Définitions de la mécanique	35
1.26. Définitions de la mécanique	36
1.27. Définitions de la mécanique	37
1.28. Définitions de la mécanique	38
1.29. Définitions de la mécanique	39
1.30. Définitions de la mécanique	40
1.31. Définitions de la mécanique	41
1.32. Définitions de la mécanique	42
1.33. Définitions de la mécanique	43
1.34. Définitions de la mécanique	44
1.35. Définitions de la mécanique	45
1.36. Définitions de la mécanique	46
1.37. Définitions de la mécanique	47
1.38. Définitions de la mécanique	48
1.39. Définitions de la mécanique	49
1.40. Définitions de la mécanique	50
1.41. Définitions de la mécanique	51
1.42. Définitions de la mécanique	52
1.43. Définitions de la mécanique	53
1.44. Définitions de la mécanique	54
1.45. Définitions de la mécanique	55
1.46. Définitions de la mécanique	56
1.47. Définitions de la mécanique	57
1.48. Définitions de la mécanique	58
1.49. Définitions de la mécanique	59
1.50. Définitions de la mécanique	60
1.51. Définitions de la mécanique	61
1.52. Définitions de la mécanique	62
1.53. Définitions de la mécanique	63
1.54. Définitions de la mécanique	64
1.55. Définitions de la mécanique	65
1.56. Définitions de la mécanique	66
1.57. Définitions de la mécanique	67
1.58. Définitions de la mécanique	68
1.59. Définitions de la mécanique	69
1.60. Définitions de la mécanique	70
1.61. Définitions de la mécanique	71
1.62. Définitions de la mécanique	72
1.63. Définitions de la mécanique	73
1.64. Définitions de la mécanique	74
1.65. Définitions de la mécanique	75
1.66. Définitions de la mécanique	76
1.67. Définitions de la mécanique	77
1.68. Définitions de la mécanique	78
1.69. Définitions de la mécanique	79
1.70. Définitions de la mécanique	80
1.71. Définitions de la mécanique	81
1.72. Définitions de la mécanique	82
1.73. Définitions de la mécanique	83
1.74. Définitions de la mécanique	84
1.75. Définitions de la mécanique	85
1.76. Définitions de la mécanique	86
1.77. Définitions de la mécanique	87
1.78. Définitions de la mécanique	88
1.79. Définitions de la mécanique	89
1.80. Définitions de la mécanique	90
1.81. Définitions de la mécanique	91
1.82. Définitions de la mécanique	92
1.83. Définitions de la mécanique	93
1.84. Définitions de la mécanique	94
1.85. Définitions de la mécanique	95
1.86. Définitions de la mécanique	96
1.87. Définitions de la mécanique	97
1.88. Définitions de la mécanique	98
1.89. Définitions de la mécanique	99
1.90. Définitions de la mécanique	100
1.91. Définitions de la mécanique	101
1.92. Définitions de la mécanique	102
1.93. Définitions de la mécanique	103
1.94. Définitions de la mécanique	104
1.95. Définitions de la mécanique	105
1.96. Définitions de la mécanique	106
1.97. Définitions de la mécanique	107
1.98. Définitions de la mécanique	108
1.99. Définitions de la mécanique	109
1.100. Définitions de la mécanique	110

SOMMAIRE

	pages
- Chapitre 1 - Introduction -----	1
<u>PREMIERE PARTIE - GEOLOGIE</u>	
- Chapitre 2 - Pétrographie et stratigraphie générale de la craie	5
2.1. Pétrographie et constitution -----	7
2.1.1. Des restes organiques -----	7
2.1.2. "La matrice" -----	10
2.1.3. Constituants détritiques -----	11
2.1.4. Faciès paléontologique. Diagenèse ---	12
2.2. Stratigraphie et extension géographique -----	14
- Chapitre 3 - Géologie de la craie pour l'ingénieur -----	25
3.1. Introduction -----	26
3.2. Gisement de la craie -----	27
3.3. Géomorphologie et altération de la craie -----	30
3.4. Hydrogéologie de la craie -----	33
3.5. La craie et les problèmes géotechniques -----	35
<u>DEUXIEME PARTIE - RHEOLOGIE</u>	
- Préambule -----	40
- Chapitre 4 - Description de la craie comme assemblage de particules -----	43
4.1. Description géométrique de l'assemblage ----	44
4.1.1. Les particules -----	44
4.1.2. Les vides -----	46
4.1.3. Poids spécifique, surface spécifique	47
4.2. Les relations interphases -----	49
4.2.1. Teneur en eau. Degré de saturation	49
4.2.2. Degré de mobilité de l'eau interstitiel- le. Capillarité -----	50

	pages
4.2.3. Perméabilité -----	51
4.2.4. Propriétés physiques de la craie remaniée	52
4.3. Tableau comparatif des propriétés physiques de plusieurs craies du bassin de Paris-Londres	53
- Chapitre 5 - Appareillage et méthode d'étude du comportement mécanique -----	68
5.1. Echantillonnage et préparation des éprouvettes	69
5.2. La mesure des déformations et l'enregistrement	70
5.2.1. Les déformations longitudinales -----	70
5.2.2. Les déformations transversales -----	72
5.2.3. L'enregistrement et la mesure -----	73
5.3. La mesure des efforts et des pressions -----	74
5.4. Les appareils d'essais mécaniques -----	74
5.4.1. Les presses -----	74
5.4.2. Les presses de fluage -----	75
5.4.3. La cellule triaxiale -----	75
5.4.4. L'appareil de cisaillement double -----	76
5.4.5. La machine de cisaillement -----	76
5.5. Les méthodes d'essais mécaniques -----	76
5.5.1. L'essai de compression uniaxiale -----	76
5.5.2. Les essais de traction -----	78
5.5.3. L'essai de compression triaxiale -----	79
5.5.4. Les essais de cisaillement -----	80
5.5.5. Les essais de compression uniaxiale sous charge constante -----	81
- Chapitre 6 - Comportement rhéologique de la craie -----	95
6.1. Le comportement sous charge monoaxiale -----	97
6.2. Influence de l'eau interstitielle et comporte- ment de la craie saturée -----	99

6.3. Influence de la porosité et du poids spécifique apparent -----	101
6.4. Influence de la structure -----	102
6.4.1. Anisotropie -----	103
6.4.2. Effet d'un défaut idéalisé -----	104
6.5. Influence de la pression de confinement ----	105
6.5.1. Diminution de la fragilité.-----	106
6.5.2. Déformation sous contrainte isotrope	107
6.5.3. Déformation sous déviateur -----	110
6.5.3.1. La limite élastique -----	110
6.5.3.2. L'écrouissage et le durcissement -----	111
6.5.3.3. La limite d'écrouissage ----	112
6.5.3.4. La pseudo-élasticité -----	112
6.5.3.5. La variation de densité -----	113
6.5.3.6. Résistance des échantillons déformés -----	115
6.5.3.7. Effet de l'eau. Plasticité --	115
6.6. Comportement sous effort de cisaillement direct -----	116
6.7. Influence du temps -----	119

TROISIEME PARTIE - GEOTECHNIQUE

- Chapitre 7 - La craie et les travaux souterrains -----	182
7.1. Introduction -----	183
7.2. Théorie de la cavité cylindrique -----	184
7.3. Mesure des contraintes dans le massif de craie -----	188
7.4. Propriétés du massif de Venteuil -----	189
7.5. Modèle réduit de l'usine souterraine ----	194
7.6. Pratique du chantier -----	196

7.7. Retour à la théorie. Théorie du soutènement ---	198
--	-----

- Chapitre 8 - Conclusions générales -----	214
- Annexe A - La mesure de densité par gammamétrie -----	
- Bibliographie -----	

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

La prise de conscience de la Mécanique des roches date de la décade 1950-1960. Elle fut consacrée en 1966 à Lisbonne par un premier Congrès international.

Cette prise de conscience, née d'un besoin naturel de mieux comprendre le comportement du milieu qui nous entoure mais aussi d'accidents parfois catastrophiques, a provoqué un grand développement des essais sur le terrain. Une véritable escalade dans la dimension et le coût de ces essais pose aujourd'hui la question de leur justification.

Aussi en 1966 Electricité de France décidait de créer un laboratoire chargé d'effectuer des essais, parallèlement avec les essais sur le terrain, mais avec l'avantage de pouvoir les multiplier facilement et d'être indépendant du chantier. Ce dernier avantage surtout ouvre la porte sinon à la recherche, du moins aux études plus fines et plus poussées.

La première étude de ce laboratoire a été consacrée à la craie parce qu'Electricité de France avait projeté une centrale hydroélectrique souterraine dans la craie du bassin Parisien à Venteuil près d'Epernay. Depuis longtemps la craie était apparue aux ingénieurs comme un matériau au comportement mécanique très particulier. LEVEQUE (1960) a bien mis en évidence les anomalies géotechniques de cette roche qui, capable de tenir en voûte, peut tout aussi bien se comporter comme une boue. Certains résultats en font une roche élastique, d'autres une roche plastique.

Il existe plusieurs variétés de craie, et ceci pourrait expliquer cela. En réalité toutes les craies se caractérisent par des valeurs faibles de leurs caractéristiques mécaniques et nous verrons précisément dans cette étude ^{comment} une seule variété de craie peut présenter pratiquement toute la gamme des comportements rhéologiques.

En fait la seule distinction à faire est entre craie de surface et craie profonde. Et c'est surtout cette craie de surface, sur laquelle il a été nécessaire de bâtir de nombreux édifices, qui depuis une quinzaine d'années a fait l'objet d'études et de recherches.

Mais la hardiesse croissante des constructeurs, alliée au progrès technique, a permis d'envisager, dans la craie, des projets d'excavations profondes de grandes dimensions. La couverture de 200 mètres prévue pour la centrale de Venteuil exigeait la prudence dans les travaux et il est apparu indispensable d'étudier en détail le comportement mécanique de la craie profonde.

La présente étude, effectuée avec le concours d'Electricité de France tente de cerner ce comportement et de le rattacher, dans un souci purement scientifique, à la rhéologie générale des matériaux.

Le comportement d'une roche est lié à son histoire et, en particulier pour une roche sédimentaire, les conditions de dépôt, les déformations et contraintes subies durant la diagenèse et en dernier lieu les conditions de gisement actuelles aident à la compréhension de ce comportement.

L'histoire de la craie sera donc l'objet de la première partie où l'on étudiera successivement sa pétrographie, sa stratigraphie et ses modes de gisement.

La deuxième partie sera consacrée à l'étude rhéologique de la craie de Venteuil.

Avant d'aborder l'étude mécanique, nous décrirons en détail la géométrie du matériau, à l'aide surtout de la microscopie électronique. La définition de la structure est indispensable à la compréhension du comportement.

L'appareillage et les méthodes d'essai de laboratoire seront groupés dans un même chapitre précédant l'étude rhéologique.

Dans l'étude rhéologique enfin nous distinguerons essentiellement les quatre facteurs les plus importants du comportement des roches : les contraintes, l'eau, la structure et le temps. Nous envisagerons successivement dans l'espace des contraintes un chemin monoaxial, isotrope et déviatoire. Cette étude consiste essentiellement en une analyse des résultats d'essais au laboratoire.

La troisième partie, enfin, sera consacrée à la géotechnique. En fait nous ne traiterons que le problème des tunnels et des excavations souterraines, les problèmes de fondations ayant déjà fait l'objet de nombreuses études dont on trouvera les références en bibliographie.

L'unique chapitre de cette troisième partie doit beaucoup à Monsieur DUFFAUT, Ingénieur à Electricité de France.

PREMIERE PARTIE

GEOLOGIE

CHAPITRE 2.-

PETROGRAPHIE ET STRATIGRAPHIE GENERALE DE LA CRAIE.

2.1. PETROGRAPHIE ET CONSTITUTION

2.2. STRATIGRAPHIE ET EXTENSION GEOGRAPHIQUE.

—

Plaque 2-1. Carte géologique de la région de Paris.
Au 1/50,000. Échelle 1:50,000.
Géologie de la région de Paris.



Planche 2-1 . Coccolithe de la craie du Sénonien
vu au microscope électronique.
Grossissement 100.000

2.1. PETROGRAPHIE ET CONSTITUTION DE LA CRAIE.

Que l'observateur soit averti ou non, il reste frappé par la blancheur éclatante de la craie. S'il est habitué à estimer la densité des matériaux en les soupesant à la main, peu de roches lui paraîtront aussi "légères". Enfin après une telle opération il devra se nettoyer les mains pour éviter de blanchir ses vêtements.

La craie est un calcaire blanc, poreux, à texture fine et friable, ce qui la distingue des calcaires ordinaires. Elle se raye très facilement à l'ongle.

Elle doit sa couleur blanche à sa constitution minérale, presque exclusivement faite de calcite très pure (jusqu'à 95 % de CO_3Ca et même plus). Cependant, certains minéraux accessoires comme la glauconie, les phosphates et les agiles, peuvent devenir localement abondants. On a alors des variétés de craie glauconieuse ou argileuse de couleur grise ou verdâtre. Les craies glauconieuses sont généralement plus grossières. Certaines craies prennent une couleur jaunâtre due à la limonite, à proximité de la surface.

Le tableau 2.1 donne les résultats de quelques analyses chimiques effectuées sur des craies prélevées dans le Bassin Parisien à différents niveaux stratigraphiques. On observera que la teneur en carbonate de calcium augmente du bas au sommet de la série stratigraphique. La véritable craie blanche, très pure, n'est réalisée que dans l'étage sénonien. Cette observation est valable pour tous les gisements de craie, comme nous le verrons par la suite dans l'étude stratigraphique.

On considère généralement que trois types de matériaux composent les craies : des restes organiques, une matrice "amorphe" et des minéraux détritiques ou authigènes.

2.1.1. Les restes organiques.

Les restes organiques sont très variés : fragments de Mollusques, Echinodermes, Foraminifères, Coccolithes parmi les for-

ORIGINE - ETAGE	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	P. F.	CO ₃ Ca	CO ₃ Mg	(PO ₄) ₂ Ca	SO ₄ Ca	Insoluble
Sondage VENDIN (P.d.C.) SENONIEN	0,5 à 0,9	0,2 à 0,3		55	0,6 à 0,4		95		0,2	0,15	
Sondage VENDIN (P.de C.) TURONIEN SUP.	0,8 à 10	1,8 à 6,6		43 à 55	0,4 à 0,5		80 à 94,5		0,85 à 0,15		
MILLY-les-DOULENS (Somme) TURONIEN MOY.		1,8 0,7		50	0,36		89	0,75			7,4
MILLY-les-DOULENS (Somme) TURONIEN INF.		3 1		45	0,5		82	1			11
LUMBRES (P.de C.) CENOMANIEN SUP.	6,95	2,65	0,9	49,55	0,5	39,4	89,5				
LUMBRES (P.de C.) CENOMANIEN INF.	19,65	4,10	1,85	40,40	1,25	32,7	74,3				

TABLEAU 2-1 - Analyses chimiques de la CRAIE
(d'après POLVECHE, 1960)

mes calcaires, spicules d'Eponges et Radiolaires parmi les formes siliceuses. En fait, la variété des constituants organiques se réduit pratiquement à deux groupes importants : les Foraminifères, qui forment parfois jusqu'à 10 % du sédiment et les Coccolithes, qui forment 80 % et même plus des sédiments.

Parmi les Foraminifères, de type benthonique ou pélagique, on ne rencontre que des variétés microscopiques : Globigérinidés, Miliolidés, Rosalines etc. Les premiers observateurs ne disposant que de microscopes optiques ne purent déceler très souvent que la présence de ces Foraminifères, et ceci les amena à comparer la craie aux boues à Globigérines actuelles et à faire de la craie un dépôt profond. Depuis, l'utilisation du microscope électronique (détails dans le chapitre 4), au pouvoir de résolution infiniment supérieur, a permis de faire des observations qui différencient profondément la craie des boues à Globigérines.

Parmi ces observations, la découverte de l'importance des coccolithes dans la formation de la craie est essentielle. M. BLACHON [1953-1965] a montré en effet que la craie était presque exclusivement composée de coccolithes ou de leurs débris.

Quels sont ces organismes et comment se présentent-ils ? Par leur ressemblance avec des organismes vivants on a pu établir qu'il s'agissait de formes calcaires sécrétées par des Algues pélagiques ou flottantes. La planche 2.1 ^(Page 6) montre un Coccolithe tel qu'on les rencontre fréquemment. C'est une association de plaquettes monocristallines de calcite, arrangées en disque. La forme discoïde est générale mais l'arrangement des plaquettes est variable. Elles peuvent se recouvrir partiellement et un coccolithe possède généralement plusieurs séries concentriques de plaquettes. A l'origine, ces organismes étaient réunis en coccosphères. Le diamètre des Coccolithes varie de 0,5 à 4 μ . Il n'est donc pas étonnant qu'on n'ait pu les observer au microscope optique ordinaire à l'aide d'une lame mince dont l'épaisseur est de 150 μ .

Mais ces organismes ne sont pas toujours entiers et il est

plus fréquent d'observer une véritable poudre de débris, de plaquettes isolées et de grains divers.

D'après M. BLACK [1953], la craie est un mélange de deux poudres, différant l'une de l'autre par la texture et la nature. La plus grossière est composée de débris de Mollusques et de Foraminifères, tandis que la plus fine est constituée de coccolithes et de leurs débris. Bien que la distribution granulométrique soit compliquée et variable d'un horizon à l'autre de la craie, cet auteur a pu mettre en évidence que pour les craies typiques la fraction grossière était comprise entre 100 μ et 10 μ , tandis que la fraction la plus fine était comprise entre 4 et 0,5 μ .

Le fait essentiel paraît être la déficience en dimensions voisines de 8 μ et par conséquent l'absence de recouvrement des deux fractions granulométriques. Les proportions de grains supérieurs à 100 μ ou inférieurs à 0,5 μ sont négligeables. Mais, à l'intérieur des limites définies plus haut, les proportions peuvent varier considérablement d'une craie à l'autre.

CAYEUX [1935] avait déjà formulé une loi sur le rapport des deux fractions granulométriques : plus une craie est fine, moins elle contient de Foraminifères, plus elle contient de coccolithes.

2.1.2. "La matrice".

L'examen de la matrice soi-disant amorphe montre que les grains les plus fins ont les mêmes dimensions que les plaquettes composant les coccolithes et que, de plus, cette coïncidence s'étend souvent à la forme des grains, qui varie d'un horizon à l'autre suivant le type de coccolithes.

De là à penser que la craie est entièrement constituée de restes organiques, il n'y a évidemment qu'un pas que de nombreux chercheurs ont franchi aujourd'hui. Ceci détruit l'hypothèse avancée parfois que la craie serait un précipité de carbonate de calcium analogue à certaines boues marines rencontrées en Floride ou aux Bahamas. D'ailleurs ces boues contiennent peu de débris de coquilles ou de coccolithes.

2.1.3. Constituants détritiques.

Mais la craie n'est pas toujours exclusivement constituée de Foraminifères, de coccolithes ou de leurs débris. En particulier, les analyses chimiques montrent fréquemment un résidu insoluble, rarement supérieur à 1% du dépôt total. Ce résidu est très variable en nature. On y trouve des minéraux lourds : ilménite, leucoxène, magnétite, tourmaline, zircon, grenat et biotite. Parmi les minéraux légers, on distingue essentiellement le quartz, la glauconie, quelques rares feldspaths, la collophane et les minéraux argileux.

Parmi ces derniers minéraux, certains peuvent devenir abondants donnant ainsi des variétés minéralogiques de craie, parmi lesquelles les craies argileuses et les craies glauconieuses sont les plus fréquentes.

Les craies argileuses montrent des amas de minéraux argileux de haute biréfringence disséminés dans la masse. Ces craies contiennent également de la pyrite.

Les craies glauconieuses [CAYEUX, 1897, 1935] sont plus grossières que les craies ordinaires et, si la glauconie devient très abondante, la roche devient une arénite glauconieuse. Ces craies sont d'origine détritique et contiennent, associés à la glauconie, des grains de quartz. On distingue cependant à côté de la glauconie d'origine détritique (glauconie allochtone) quelques grains de glauconie formés sur place (glauconie autochtone). Les craies glauconieuses contiennent aussi parfois des composants phosphatés et les positions réciproques de la glauconie et du phosphate montrent que ces deux minéraux sont contemporains.

La matrice de ces craies glauconieuses est surtout constituée de calcite recristallisée. Les craies glauconieuses se sont déposées en milieu réducteur riche en CO_2 , ce que confirme le déplacement de la calcite qui a été ensuite déposée dans les vides de la roche et qui forme ainsi le ciment.

2.1.4. Faciès paléontologique. Diagenèse.

Signalons, du point de vue paléontologique, que certains coccolithes ont permis de définir des horizons.

D. NOEL [1967] a proposé le terme de nanofaciès qui est certainement appelé à avoir un grand développement, non seulement dans l'étude des craies mais également de certains calcaires lithographiques ou microgranulaires du Jurassique et du Crétacé, qui sont apparus, au microscope électronique, constitués eux aussi essentiellement de coccolithes.

Ainsi R. LAFFITTE et D. NOEL [1967] ont montré que le calcaire kimméridgien de Swanadge (G.B.) et le calcaire portlandien de Solenhofen avai^{ent} pratiquement la même constitution que les craies.

Mais l'absence de différence fondamentale d'origine entre ces calcaires pose avec encore plus d'acuité le problème de leur évolution, car la différence d'aspect entre un calcaire lithographique et une craie saute aux yeux.

Il est évident que la diagenèse de la craie a été moins poussée que celle des calcaires lithographiques compacts et durs. Dans la première, les grains élémentaires sont restés simplement jointifs, aucun ciment n'intervenant pour combler les vides. Au contraire, les seconds ont subi une cimentation soit par recristallisation, soit par dépôt de calcite.

La craie apparaît donc comme une roche peu évoluée, marquant la transition entre une boue de dépôts organiques actuelle et un calcaire lithographique. On peut dire qu'il s'agit véritablement d'un sédiment fossile, c'est-à-dire fossilisé dans les tous premiers stades de sa diagenèse.

La question que l'on peut se poser est donc de savoir pourquoi l'eau interstitielle, présente à l'origine dans le sédiment ou au cours de la diagenèse, n'a pu, dans le cas de la craie, mobiliser le carbonate de calcium comme elle semble l'avoir fait pour les autres calcaires. Notons que dans la craie cette eau a déplacé la silice des organismes siliceux en la concentrant en

silex qui, très abondants dans certains horizons, donnent à la craie un faciès très caractéristique.

R. LAFFITTE et L. LECLAIRE [1967] ont tenté de résoudre cette question en faisant appel à la concentration du gaz carbonique CO_2 dans l'eau de mer. On sait en effet que la solubilité de CO_3Ca dépend de cette concentration. Plus l'eau est riche en CO_2 , plus CO_3Ca est soluble et plus il peut être remis en mouvement.

Pour fixer les idées, rappelons que CO_3Ca est un des sels les moins solubles dans l'eau, 13 mg/l à 18° ou 18 mg/l à 100° ; mais si l'eau est saturée en CO_2 , la solubilité passe à 1 500 mg/l. Ces auteurs imaginent donc que la non cimentation de la craie s'explique par le fait que les boues dont elle dérive se seraient déposées dans une eau pauvre en gaz carbonique n'autorisant pas la dissolution et la remise en mouvement du carbonate.

Toujours d'après ces auteurs, cette thèse est confirmée par la présence abondante dans la craie d'organismes limnivores tels que les Echinides (Oursins) qui ont besoin d'une certaine quantité d'oxygène pour vivre et qui n'auraient donc pas supporté un milieu riche en CO_2 . Il nous semble aussi que les pressions, hydrostatique en ce qui concerne la phase liquide et sa concentration en CO_2 , effective au sens de la mécanique des sols en ce qui concerne la phase solide, ont certainement été beaucoup plus faibles pour la craie, dépôt de faible profondeur sur une surface presque horizontale, comme nous le verrons dans la suite, que pour les calcaires lithographiques qui se sont déposés en mer peut-être moins profonde qu'on ne l'imagine, mais certainement subsidente. Nous ne parlerons pas des contraintes tectoniques que ces derniers ont subies en plus durant leur diagenèse et qui ont totalement épargné la craie.

2.2. STRATIGRAPHIE ET EXTENSION GEOGRAPHIQUE.

La craie est un dépôt caractéristique du Crétacé supérieur, système auquel elle a donné son nom car, dans le Bassin Parisien, où ce système a été défini, elle occupe largement les trois dimensions de l'espace. Ainsi la plupart des étages du Crétacé supérieur ont été définis par des niveaux-types de craie [GIGNOUX, 1950]:

Crétacé supérieur	{	{	<u>Sénonien</u> craie blanche de Sens	{	<u>Asturien</u> (Adour)	<u>Maëstrichtien</u> : craie- tuffeau de Maestricht	
						<u>Campanien</u> : craie de Champagne (Cognac)	
					{	<u>Emschérien</u> (Emscher)	<u>Santonien</u> : craie de Saintonge
							<u>Coniacien</u> : craie de Cognac
				{	<u>Turonien</u> : craie-tuffeau de Touraine (en général : craie marneuse).		
					<u>Cénomanién</u> : sables du Maine (en général : craie glauconieuse).		

Le volume occupé par ce dépôt et ses caractères si typiques à l'oeil et au toucher expliquent l'utilisation courante de l'article défini (La Craie), privilège que cette roche ne partage qu'avec le granite, la houille ou certains dépôts monocristallins.

Malgré cela, la craie n'est qu'un faciès, c'est-à-dire qu'elle représente un ensemble de caractères résultant de conditions géographiques climatiques et chimiques locales. Ainsi, d'autres matériaux contemporains de la craie, mais déposés en d'autres lieux et sous d'autres climats, n'auront pas le faciès craie. Réciproquement, des dépôts d'âge différent mais formé dans les mêmes conditions pourront avoir le faciès craie.

Le faciès craie comporte lui-même de nombreux sous-faciès déterminés par la présence, en quantité variable, d'autres composants que la calcite. Ainsi on distingue classiquement dans le Bassin Parisien une craie sableuse et glauconieuse au Cénomanién,

une craie marneuse au Turonien enfin la craie blanche à silex au Sénonien. Ces différents faciès de craie sont liés aux fluctuations de la grande transgression marine^{qui,} à partir du Cénomaniensubmergea progressivement une grande partie de l'Europe du Nord et de la plate-forme russe. Seuls quelques massifs restèrent émergés d'Ouest en Est : le massif armoricain, les massifs rhénan et bohémien, le massif ukrainien et, au Nord, le bouclier scandinave.

A ces variations verticales de faciès, il convient d'ajouter des variations horizontales (c'est-à-dire contemporaines) de ces faciès qui sont liés aux conditions géographiques. Ainsi, telle craie blanche et pure peut passer latéralement et progressivement à une craie sableuse et détritique quand on se rapproche d'un ancien rivage.

C'est au Sénonien que la mer transgressive atteint son extension maximale. Elle s'étend alors de l'Irlande à l'Oural et de la Suède au Sud du Bassin Parisien (fig. 2.1). C'est une mer de type épicontinental, c'est-à-dire qu'elle recouvre un plateau continental, ce qui implique nécessairement une faible profondeur. On a d'ailleurs pu évaluer cette profondeur en se basant sur la profondeur à laquelle vivent aujourd'hui certains genres de Spongiaires siliceux dont on a retrouvé des fossiles dans la craie d'Oberg au Hanovre [A. SCHRAMMEN, 1910]. Cette profondeur est évaluée à 300 m environ et, d'après M. GIGNOUX [1950], il s'agit là d'une craie plus profonde que la moyenne des craies.

Déposée dans une mer calme et étale et probablement chaude, la craie apparaît comme une simple vase calcaire formée d'innombrables débris d'organismes benthoniques ou pélagiques. La définition paléogéographique de la craie rejoint ici sa définition pétrographique.

L'extension des gisements de craie en Europe du Nord correspond évidemment aux limites de la mer sénonienne, que nous avons définies précédemment.

En Irlande, le Crétacé a été érodé presque partout par les

glaciers du Quaternaire. Cependant, quelques lambeaux de Crétacé supérieur sont restés protégés dans le Nord-Est par des laves éocènes. D'une épaisseur d'environ 50 m, ces gisements débutent par un Cénomaniens glauconieux reposant directement sur le Jurassique inférieur et se terminent par 30 m de craie dure avec silex. Cette craie est la roche crétacée la plus importante d'Irlande ; elle est largement exploitée pour la chaux.

Dans le Sud Est de l'Angleterre et dans le Bassin Parisien, la série stratigraphique varie en épaisseur et en faciès suivant les lieux géographiques. En particulier à proximité des anciens rivages, les séries sont plus détritiques et les alternances de faciès plus fréquentes. Mais dans les zones éloignées des rivages la série sédimentaire du Crétacé supérieur présente la même séquence sur de grandes distances et la monotonie horizontale des faciès est remarquable. Cette série repose partout sur les argiles du Gault et les sables verts de l'Albien. Elle débute au Cénomaniens par une craie glauconieuse devenant progressivement marneuse au Turonien. Ce n'est qu'au Sénonien que la craie prend son faciès de craie blanche à silex. Elle est alors recouverte de sables de l'Eocène dont elle est parfois séparée par une mince couche d'argile à silex. L'épaisseur totale de la série varie de 100 à 300 m. Cette série se retrouve presque identique dans toute la moitié ouest de la Belgique. Dans l'Est de la Belgique, au Limbourg et en Hollande, elle se termine par un faciès de craie détritique, le tuffeau de Maestricht.

Plus au Nord, au coeur de la mer de la craie, la série s'épaissit. Un sondage profond, effectué à Grøndal, près de Copenhague entre 1897 et 1907, a fourni une épaisseur de 500 m de craie blanche avec ou sans silex, surmontant plus de 300 m de craie marneuse grise. Toute la série est attribuée au Sénonien moyen et supérieur, bien que le faciès de craie marneuse rappelle curieusement les faciès du Turonien du Bassin de Paris. Le faciès de craie blanche s'étend sur tout le Danemark et il affleure particulièrement dans les falaises de Møns Klint et de Stevns Klint

dans les îles danoises.

La craie blanche est généralement recouverte par un calcaire à Bryozoaires contenant des couches de silex et attribué à un étage particulier, le Danien. Rattaché tantôt au Crétacé, tantôt au Tertiaire, ce calcaire ressemble parfois extérieurement à la craie. Il s'agit en effet d'un calcaire à coccolithes mais contenant des dépôts terrigènes, ce qui le différencie de la craie blanche pure. La craie blanche ou le Danien sont surmontés directement par les dépôts morainiques du Quaternaire (argiles et sables) dont l'épaisseur varie de 0 à 200 mètres.

En avançant vers l'Est, le véritable faciès de craie blanche à silex ne se rencontre que dans les îles baltiques et en Poméranie. En Westphalie et au Hanovre, le faciès est plus marneux tandis qu'à la fin du Sénonien on trouve des craies marno-gréseuses que les géologues allemands ont subdivisées en trois horizons, granulatenkreide, quadratenkreide et mucronatenkreide, suivant le type de Bélemnites caractérisant le sédiment.

Au Crétacé supérieur, la "mer de la craie blanche" rejoint sur la plate-forme russe le "bras de mer russe". Au Sud de l'immense bassin formé par la jonction de ces deux mers, et à proximité du rivage nord du massif ukrainien (fig. 2-1), la craie blanche s'est déposée sur une épaisseur considérable, dépassant 700 m près de Kharkov. Cette craie est largement exploitée. Au Tertiaire, la craie fait place à des sables et des argiles, suivant en cela la séquence bien connue du bassin occidental franco-anglais. Notons que les dépôts de craie russes se trouvent en bordure immédiate du géosynclinal méditerranéen (fig. 2-1) et que leur épaisseur implique une subsidence du bassin plus importante que celle du bassin franco-anglais.

Le gisement du bassin de Kharkov se prolonge à l'Est jusqu'au Nord de la mer Caspienne, dans le bassin Volga-Emba, où l'on trouve une série de marnes, de craies et d'argiles sur une épaisseur de 400 à 500 mètres.

Avec ces gisements russes se termine l'extension géographique des sédiments de la "mer de la craie blanche". Cependant, à peu près pendant la même période géologique, des sédiments à faciès craie se sont déposés dans d'autres bassins marins, au Moyen-Orient et en Amérique du Nord.

Les sédiments crayeux du Moyen-Orient se sont déposés dans la partie orientale d'un bassin qui s'étendait, au Crétacé supérieur, de la Libye à la Syrie actuelles. Ce bassin était limité au Sud par le bouclier africain et à l'Est par le massif arabonubien (fig. 2-1 et fig. 2-2). En bordure de ce massif émergé, les sédiments sont évidemment détritiques mais, à mesure que l'on s'en éloigne, les séquences deviennent plus marneuses et plus crayeuses.

On trouve au Liban de la craie blanche à silex attribuée au Sénonien dans la région de Beyrouth et, plus au Nord, à Ras-ech-Chekka. A l'Est de ce dernier site, des terrains crayeux d'un blanc parfois éclatant forment la base du versant occidental libanais. Ces terrains s'enfouissent vers l'Ouest sous les calcaires du Miocène. Au Sud du Liban, à l'Est de Saïda, le Sénonien forme une large bande orientée Nord-Sud, surmontée à l'Ouest (vers la mer) par les calcaires nummulitiques de l'Eocène. D'après ZUMOFFEN [1926], les caractères lithologiques du Sénonien sont constants du Nord au Sud du Liban. La série débute par un calcaire grenu blanc jaunâtre assez tendre, à cassure conchoïdale ; puis viennent des calcaires marneux blanchâtres en bancs nombreux et minces alternant avec de petits lits d'argiles ou de silex ; enfin la série se termine par une grande masse d'argiles d'un blanc bleuâtre.

Plus au Sud, en Israël, en Jordanie, en Egypte, les sédiments du Crétacé supérieur prennent une extension considérable. La grande monotonie lithologique de ces sédiments est à l'origine des difficultés que les géologues ont rencontrées dans cette région pour établir des divisions stratigraphiques. Si les subdivisions établies dans le Bassin Parisien correspondent effectivement à

des phases particulières de la sédimentation, il n'est pas évident que ces mêmes phases se retrouvent au Moyen-Orient dans un bassin isolé géographiquement de la "mer de la craie". C'est pourquoi il a été nécessaire de distinguer de nouvelles subdivisions à partir d'ensembles lithologiques cohérents. Evidemment il est possible d'établir la correspondance entre ces subdivisions et les étages européens définis dans le Bassin Parisien.

En 1968, FLEXER a synthétisé tous les travaux relatifs au Crétacé supérieur et au Tertiaire inférieur. C'est à cet auteur que nous nous référons dans la suite de cette étude sur les sédiments crayeux du Moyen-Orient. La nécessité d'une synthèse était apparue devant la confusion née de terminologies propres à chaque auteur. La période s'étendant du Cénomanién à l'Eocène est divisée en trois unités ou groupes lithologiques, le groupe de Judée à la base, puis le groupe du Mont Scopus et enfin le groupe d'Avedat [BRAUN, 1967].

En première approximation le groupe du Mont Scopus (Sénonien-Paléocène) est composé de craies plus ou moins tendres à Foraminifères, surmontant les calcaires et dolomies durs du groupe de Judée (Cénomanién-Turonien) et sous-jacents aux calcaires et aux craies plus durs du groupe d'Avedat (Eocène).

Cet ensemble de calcaires, parfois regroupés sous le terme middle calcareous division, est entièrement marin. On trouve au-dessous et au-dessus, des sédiments clastiques tantôt marins, tantôt continentaux. La séquence du groupe du Mont Scopus comprend à sa base des craies dures et des calcaires sableux et détritiques, puis des craies blanches peu litées, parfois bitumineuses, enfin au sommet, la séquence se termine par des craies marneuses blanches et des schistes.

Les silex sont abondants, surtout au niveau correspondant au Campanien où ils forment de véritables brèches de couleur marron.

L'épaisseur de la séquence est de 100 à 200 m en moyenne mais peut localement devenir nulle ou atteindre 1 000 m.

AGE		IRLANDE Nord. Est	ANGLETERRE Sud. Est	FRANCE Somme	DANEMARK Copenhague	ALLEMAGNE Nord	RUSSIE Kharkov	LIBAN	ISRAËL	SINAI Golf de Suez	EGYPTE
EOCENE	supr	Roches volcaniques	Argiles et sables	Argiles sables Argiles à silex	Argiles marnes sableuses glauconieuses	sables et argiles	sables et argiles sables de Karnev	calcaires a nummulites	(calc. craie. et bande de silex) calcaires a silex schistes pyriteux	calcaires calcaires a silex schistes d'Esna	Schistes d'Esna
	moyen										
	Inf.										
SENONIEN		craie dure a silex craie chloriteuse	craie blanche a silex	craie blanche pauvre en silex	calcaire craie blanche a silex	craies marno- gréseuses marnes grises	craie	craie et marnes crayeuses a silex de Chekka	craie marneuse a limonite craie a silex calcaire crayeux	craie	craie schistes de Dakhla
		sables glauconieux	craie marneuse grise	craie grise craie blanche a silex marnes grises ou bleues	craie marneuse grise	calcaires marneux		Blanche	calcaire		calcaires et Dolomies
TURONIEN											
CENOMANIEN		Grés glauconieux Sables glauconieux	craie marneuse craie glauconieuse grés glauconieux	craies marneuses riches en marcassite et glauconie Tourtia	?	calcaires marneux Grés glauconieux	marnes argiles	de Judée	de Judée	et schistes	
ALBIEN		directement sur Jurassique inf.	Argiles du Gault sables verts	Argiles du Gault sables verts		Argiles du Hils	Grés continentaux Argiles plastiques noires				

Corrélation du Crétacé crayeux en Europe et au Moyen-Orient

Tab. 2.2

(L'insuffisance de données concernant la craie américaine n'a pas permis de le faire figurer dans ce tableau)

Flexer a distingué au sein de cette séquence trois lithofaciès (fig. 2-2) en fonction de la distribution et de la quantité de silex, ceux-ci étant d'autant moins abondants que l'on s'éloigne des anciens rivages du massif arabo-nubien.

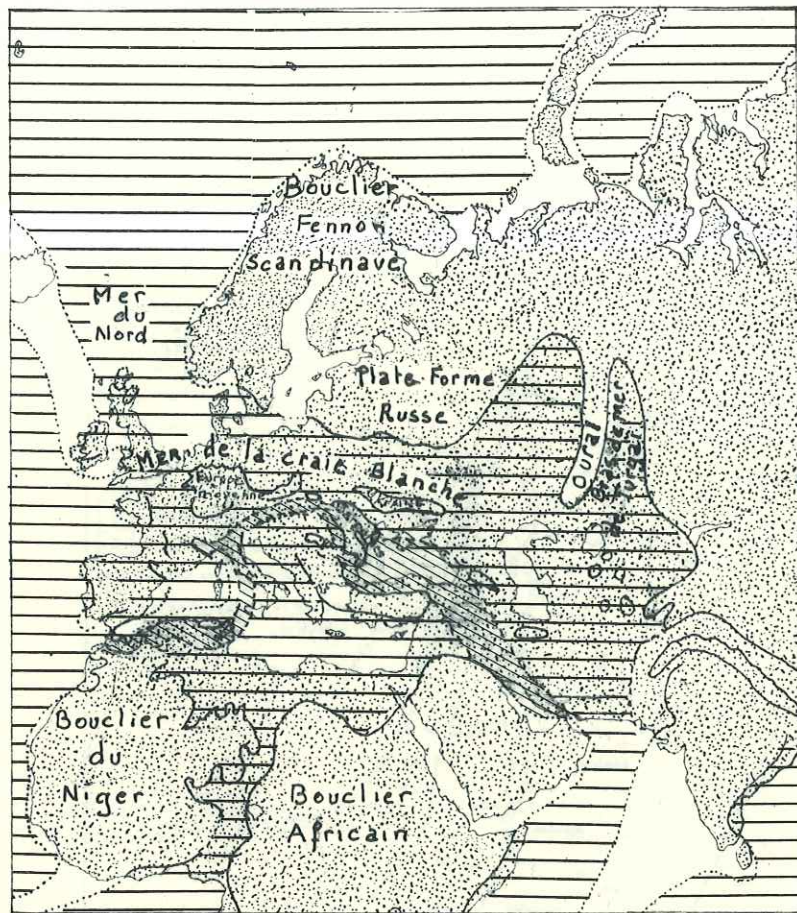
Les séquences crayeuses du Moyen-Orient diffèrent donc assez profondément de celles du Bassin Parisien, en particulier par l'absence d'argiles ou de sables à la base et au sommet. De plus, elles sont plus tardives puisqu'elles ne débutent pratiquement qu'au Sénonien et continuent à l'Eocène.

Le tableau 2-2 résume et compare l'ensemble des séries stratigraphiques du Crétacé supérieur crayeux en Europe et au Moyen-Orient.

Nous terminerons cette revue des faciès crayeux dans le monde en signalant la présence de niveaux crayeux sur le territoire des Etats-Unis (fig. 2-3). Ceux-ci sont loin d'avoir une extension comparable aux dépôts européens du Moyen-Orient. On les trouve dans les Etats du Centre et du Sud.

La craie Niobrara affleure suivant une étroite bande entourant les "Collines Noires" dans le Dakota Sud, le Wyoming et le Nebraska. Elle affleure plus largement dans le Sud Est du Dakota Sud, à l'Est du Nebraska et à l'Ouest du Kansas. Enfin une troisième ceinture s'étend du Centre-Ouest de l'Arkansas à l'Oklahoma. Dans les Etats du Sud Est, la craie Selma s'étend de l'Ouest du Tennessee Sud, à travers le Nord du Mississippi et tourne à l'Est à travers l'Alabama central.

La formation Niobrara, d'âge crétacé supérieur, comprend, sur une épaisseur d'environ 70 m, des calcaires jaunes à blancs, surmontés de marnes crayeuses et de calcaire crayeux grisâtre. Cette formation est limitée à la base et au sommet respectivement par les shales du fort Benton et les shales du fort Pierre. La craie de Selma est un calcaire marneux assez pur, de grande épaisseur, formant un gisement en croissant de lune bordant la vallée du Mississippi et recouvrant les sables et calcaires d'Eutaw.



Mers non subsidentes (ou mal connues).



Mers subsidentes (bassins et géosynclinaux)



continent

Fig. 2-1

Paléogéographie du Santonien - Campanien
(d'après H. et G. Termier)

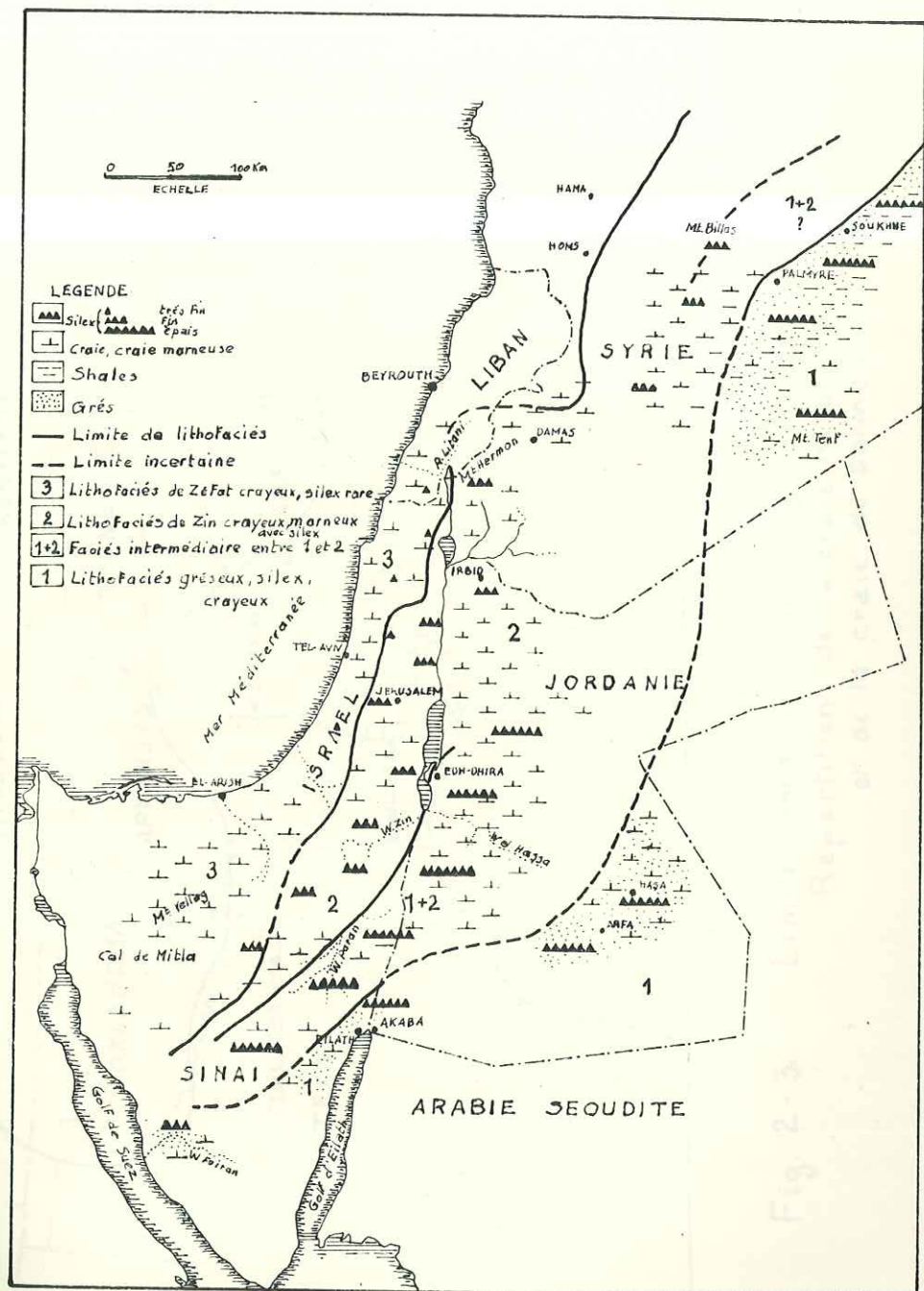


Fig 2-2. Carte des lithofaciés du groupe du Mont Scopus.
(d'après A. Flexer)

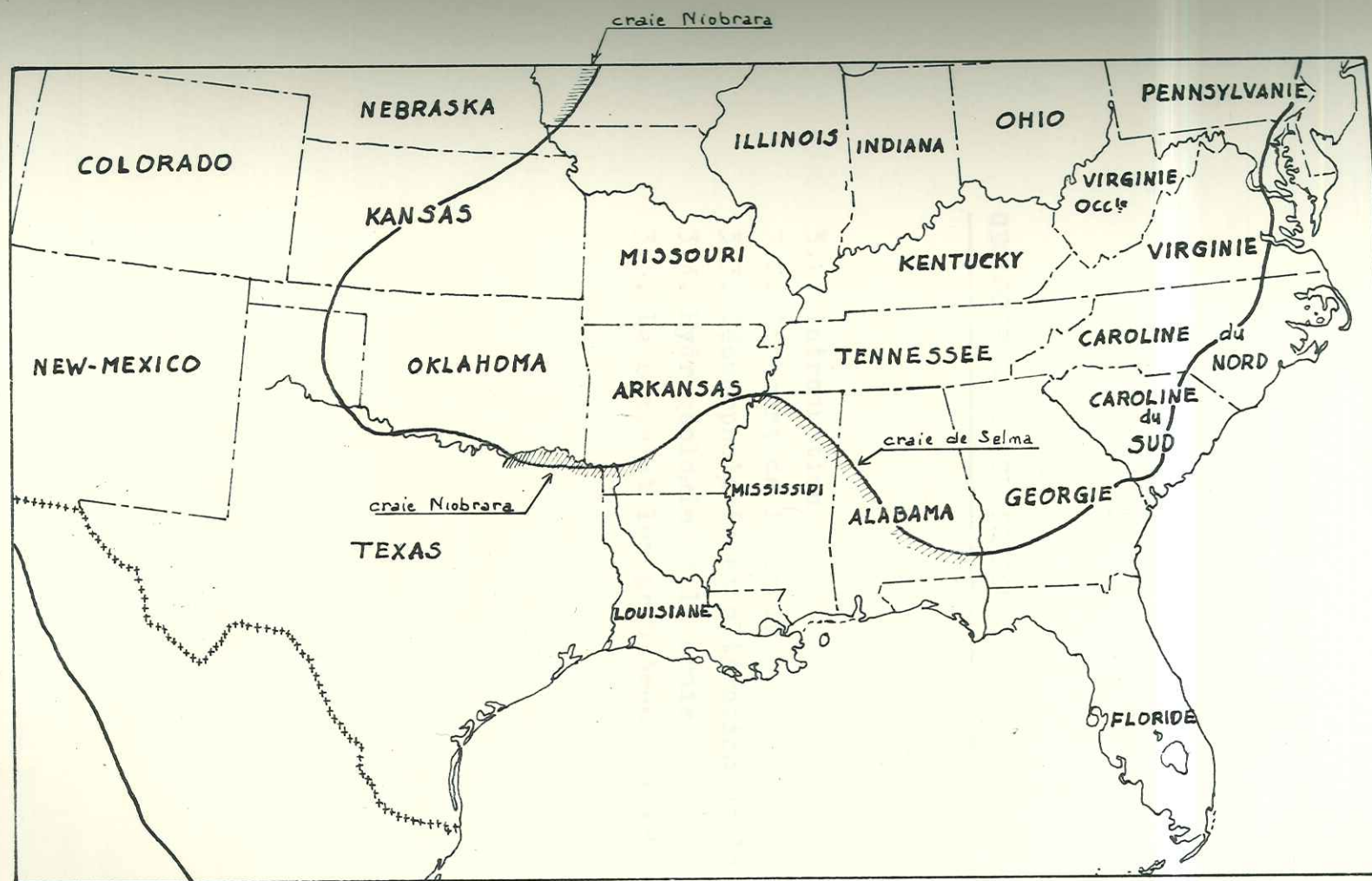


Fig. 2-3. Limite Nord de la mer du Turonien aux Etats-Unis.
Répartition de la craie Niobrara
et de la craie de Selma.

CHAPITRE 3.

GEOLOGIE DE LA CRAIE POUR L'INGENIEUR.

3.1. Introduction

3.2. Gisement de la craie

3.3. Géomorphologie et altération de la craie

3.4. Hydrogéologie de la craie

3.5. La craie et les problèmes géotechniques.

3.1. INTRODUCTION.

Nous venons de voir l'extension des dépôts de craie dans le Monde. L'importance de ces dépôts, surtout dans les régions très peuplées de l'Europe du Nord, a poussé l'homme à en tirer profit mais elle l'a aussi obligé parfois à s'en accommoder. Il s'agit là de deux aspects économiques très différents :

- l'exploitation du matériau ;
- la craie comme matériau sur lequel on doit construire ou dans lequel on doit creuser.

L'exploitation de la craie est très ancienne. On rencontre de nombreuses carrières souterraines dans le Bassin Parisien et dans le Sud Est de l'Angleterre. Beaucoup sont aujourd'hui abandonnées.

Quand sa qualité le permet, la craie peut servir de pierre de taille. Mais elle fut surtout exploitée comme charge pour la peinture, comme engrais chimique calcaire ou pour la fabrication des ciments. La grande pureté de la craie blanche danoise est réputée et, avant la dernière guerre, le Danemark exportait plus de la moitié de sa production de craie blanche.

Les craies américaines sont beaucoup moins pures et ce n'est que grâce à une technique d'épuration très poussée que les Américains ont pu s'affranchir des fournisseurs européens pour l'utilisation de la craie dans les peintures et pâtes diverses.

Comme terrain de fondation, la craie supporte de nombreux ouvrages importants, tels que centrales thermiques, piles de ponts, autoroutes.

Dans le Sud Est de l'Angleterre, la morphologie du terrain a nécessité l'excavation de tunnels ferroviaires. Le tunnel sous la Manche sera dans la craie. Et nous verrons au chapitre 7 que l'Electricité de France avait projeté une centrale souterraine

également dans la craie.

Dans le présent chapitre, nous allons examiner les différents caractères des gisements de craie, c'est-à-dire que de l'histoire nous passons à l'actualité, qui seule intéresse l'ingénieur.

Après l'étude du gisement nous verrons la géomorphologie et l'altération de la craie. Nous avons jugé utile de consacrer quelques lignes à la circulation de l'eau dans la craie et enfin nous concluerons en posant les problèmes géotechniques liés aux caractères du gisement.

3.2. GISEMENT DE LA CRAIE.

La craie s'étant déposée en mer épicontinentale se trouve de ce fait en dehors des zones tectonisées au cours de la phase alpine, postérieure au dépôt. Cette position éloignée des chaînes de montagnes récentes l'a préservée de toute déformation importante. Aussi les couches de craie sont-elles d'une manière générale presque toutes subhorizontales : les pendages sont faibles, de l'ordre de quelques degrés, mais ils peuvent localement dépasser 10° . La structure est composée de synclinaux et d'anticlinaux à grand rayon de courbure. On parle plus volontiers des ondulations que des plissements de la craie.

A côté de cette "tectonique souple", d'autres accidents, tels que cassures, diaclases et failles, affectent la craie. Les accidents de type faille ne sont pas fréquents et les décrochements dépassent rarement 10 m dans le Bassin Parisien; l'accident le plus spectaculaire étant le célèbre anticlinal du Pays de Bray. Les diaclases existent dans la craie, verticales ou subverticales. Comme nous le verrons plus loin, ces diaclases jouent un grand rôle dans l'hydrogéologie de la craie. Naturellement l'orientation des diaclases obéit aux directions structurales majeures définies par les bombements anticlinaux et les dépressions synclinales.

Dans le Nord du Bassin Parisien ces directions sont multiples. Ainsi les ondulations majeures ont une orientation NW-SE, mais de nombreux accidents, rides, flexures et failles ont des orientations plus ou moins perpendiculaires aux précédentes, soit N-S, NNE-SSW, NE-SW et E-W.

Les ondulations majeures NW-SE se calquent parfaitement sur les plissements hercyniens sous-jacents qui s'étendent du Massif Armoricaïn aux Ardennes. La craie, couverture souple, semble donc s'être adaptée aux structures qu'elle a recouvertes. Les accidents NE-SW ont été longtemps expliqués comme des contrecoups des plissements alpins, particulièrement de la phase antépliocène, la plus violente. Mais POMEROL [1961] a indiqué pour le soulèvement de l'Artois, accident majeur, un âge lutétien moyen, c'est-à-dire largement antérieur au paroxysme alpin.

GOGUEL [1965] pense que, tout comme l'accident du Pays de Bray, de nombreuses ondulations de la craie seraient dues aux compensations isostatiques individuelles de massifs granitiques sous-jacents. Ces réajustements individuels se feraient très lentement, bien après la compensation générale, de caractère régional, si bien que la mise en place de granites lors de l'orogénèse hercynienne, pourraient avoir des effets très tardifs qui auraient ainsi affecté les terrains secondaires du Bassin Parisien et la craie en particulier.

Cette tectonique est générale pour la craie et les dépôts sus-jacents du Nord de l'Europe. Toutefois, il convient de signaler quelques mouvements exceptionnels observés localement.

Les falaises de l'île de Moon, au Danemark, montrent des séries de synclinaux et d'anticlinaux très pincés dus selon certains géologues danois aux effets conjoints de deux glaciers qui, venant de la Baltique, auraient comprimé et housculé les masses de craie.

D'autre part, les gisements du bassin Volga-Emba ont subi des déformations liées à la présence de dômes salifères du Trias. La cartographie montre, disséminées dans le Crétacé supérieur, une multitude de petites boutonnières limitées par des failles verticales et laissant apparaître les séries antérieures.

Au Moyen-Orient, les dépôts crayeux n'ont subi, comme dans le Bassin Parisien, que des déformations à grand rayon de courbure, quand ils ne sont pas restés quasiment horizontaux.

Du fait des faibles déformations qu'elle a subies, la craie occupe aujourd'hui à peu près la même surface que celle qui correspond au dépôt du sédiment dans la mer de la craie.

Pour comprendre maintenant le mode de gisement et d'affleurement de la craie, il convient de connaître un peu l'historique des phénomènes qui ont modifié la Paléogéographie depuis la fin du Crétacé supérieur.

La tendance à l'émersion qui suit la grande transgression marine du Crétacé supérieur n'est pas un phénomène brutal et, de plus, elle ne se manifeste pas partout en Europe du Nord. Ainsi de nombreux golfes continueront à maintenir une sédimentation marine dans le Bassin Parisien et l'Est de l'Angleterre au Paléocène et à l'Eocène, tandis que l'Oligocène verra une nouvelle transgression marine qui, venant de la mer du Nord, envahira tout le Nord de l'Europe excepté le bouclier scandinave. La sédimentation marine se maintiendra au Miocène supérieur dans le grand golfe germanique. Et ce n'est qu'au Pliocène qui termine la période tertiaire, que l'Europe est pratiquement complètement émergée. Elle subira alors la grande glaciation du Pléistocène, mais les glaciers épargneront l'extrême Sud de l'Angleterre et le Bassin Parisien à l'Ouest et la région de Kharkov et Volga-Emba à l'Est.

On conçoit, après ce bref aperçu de la paléogéographie post-crétacée de l'Europe moyenne, que le mode d'affleurement actuel de la craie soit très variable.

Le rabotage des glaciers dans les zones atteintes par les glaciations a pu faire disparaître une partie des sédiments qui surmontaient la craie et même la craie elle-même, quand son épaisseur était faible comme en Irlande. Ces mêmes glaciers ont abandonné, au contraire, au cours de leur retrait, des dépôts morainiques parfois très épais qui peuvent être directement en contact avec la craie comme en Angleterre, en Belgique ou au Danemark. Ailleurs, la craie est surmontée de sédiments marins plus récents, des sables et des argiles dans le coeur du Bassin Parisien, des calcaires au Moyen-Orient, ou par des alternances de sédiments marins et continentaux dans la région de Kharkov en Russie. Enfin la craie peut constituer directement la surface du sol par absence de sédimentation postérieure comme en Champagne p^ouilleuse dans le Sud Est du Bassin Parisien.

3.3. GEOMORPHOLOGIE ET ALTERATION DE LA CRAIE.

La géomorphologie des affleurements de craie est très variable car elle dépend non seulement de la présence et de la nature du sédiment sus-jacent mais aussi de la réaction de la craie aux différents types d'érosion ou d'altération.

L'érosion due aux eaux de ruissellement ne se rencontre qu'au Moyen-Orient. En Israël où la craie est surmontée des calcaires plus durs du groupe d'Avedat, elle forme une sorte de glacis extrêmement raviné au pied de falaises abruptes (Fig. 3-1). Le ruissellement en climat subdésertique a aussi provoqué un ravinement du type bad-land qui, généralement, ne se rencontre que dans des argiles ou des marnes. Un ravinement presque identique mais à plus grande échelle se rencontre dans la région de Kharkov en Russie où la craie est surmontée d'argiles et de sables. Le relief est constitué d'une multitude de petits vallons très sinueux et très rapprochés les uns des autres.

En climat tempéré, le relief est totalement différent mais il frappe par sa diversité. L'absence de ravinement est due surtout à la végétation protectrice. Malgré sa faible dureté (quel que soit le type de craie), la craie peut donner de véritables falaises absolument verticales comme sur le littoral du Pays de Caux (Fig. 3-2) ; la falaise est sapée par les vagues déferlantes et recule très vite en s'éboulant par pans entiers. L'eau et le gel se chargent alors de désagréger l'éboulis et de le faire disparaître. Le gel est aussi responsable en partie de la désagré-gation de la paroi. Seuls résistent au travail des vagues quelques îlots de craie plus dure (indurations locales dues probablement à une cimentation). Au Danemark, le calcaire à Bryozoaires du Danien, plus dur que la craie, forme parfois un surplomb au-dessus de la craie usée par la mer. Il en est ainsi à Stevns Klint (Fig. 3-3).

La côte anglaise près de Folkestone montre aussi des falaises de craie abruptes qui reculent rapidement mais à bonne distance du rivage. L'érosion ici n'est pas due à la mer. Nous reviendrons d'ailleurs sur ces problèmes au chapitre 8.

A l'intérieur des terres, l'érosion fluviatile n'a pu provoquer de telles falaises. Les cours d'eau s'enfoncent dans des plateaux crayeux monotones, créant des vallées dont le profil dépend de l'altérabilité de la craie. D'une façon générale les pentes des versants sont douces, parfois convexes comme en Picardie et dans le Bourbonnais, ce qui est une forme rare pour un calcaire. Signalons la grande abondance de vallées sèches en Picardie et dans le Pays de Caux témoignant d'une circulation d'eau abondante à la fin de la période glaciaire.

L'altérabilité et la gélivité de la craie expliquent très souvent le modelé de la topographie. Lorsqu'elle a été mise à nu la craie donne très souvent un produit de décomposition argileux dit "argile à silex". Bien connue dans le Nord et l'Ouest du Bassin Parisien cette couverture argileuse, peu perméable, crée un

pays humide et fertile. Au contraire, l'aspect si typique de la Champagne puilleuse, sans cours d'eaux superficiels, est dû précisément à l'absence d'une telle couverture imperméable. Ainsi la craie paraît ne pas pouvoir retenir l'eau de surface. La raison essentielle est l'extrême fissuration superficielle de cette roche. La craie, généralement très gélive, n'a pas résisté au gel profond de la période glaciaire du Pléistocène. Il en est résulté un éclatement de la couche superficielle et une fragmentation en blocs plus ou moins anguleux emballés dans une pâte crayeuse qui forme la matrice. La diminution des blocs décroît de la couche saine à la surface et la partie comprise entre la roche et le sol forme le régolite.

Une fois cette couche superficielle formée, on doit distinguer deux cas suivant que l'on est en terrain plat ou sur un versant de vallée. En terrain plat, la couche d'altération superficielle protège la roche saine de toute altération ultérieure par le gel, mais sur les pentes cette couche a tendance à glisser, c'est le creeping, et la gélifraction peut se poursuivre. Le creeping est responsable de la forme convexe de la partie supérieure de certains versants crayeux.

Au terme de l'évolution le versant est entièrement recouvert par une nappe de matériaux fins (ultime désagrégation des blocs de craie) qui peut glisser par solifluxion même sur une pente très faible et constante. C'est la "grève crayeuse" de Champagne. Mais l'altération mécanique par le gel n'est pas la seule qui puisse affecter la craie. L'altération chimique, sous la forme d'une dissolution, peut aussi perturber le massif crayeux. Le véritable karst est assez rare mais l'élargissement des diaclases et des fissures est très fréquent et il est à l'origine de la nappe de la craie si importante dans le Nord du Bassin Parisien. SCHLUMBERGER [1965] signale à Belval, près d'Etretat, le captage des eaux superficielles par un réseau karstique instable dans le Sénonien et des résurgences dans la falaise marine. Ces

résurgences présentent, quand les marées ne les ont pas enlevées, croûtes, travertins et conglomérats d'écaillés de gélifraction.

La surface de la craie montre fréquemment des entonnnoirs de dissolution (en anglais swallow hole). Cependant ceux-ci ne sont pas toujours visibles car ils sont souvent comblés par l'argile à silex et les sables tertiaires. Dans ce cas les anglais parlent de pipes (Fig.3-4). Plus généralement la surface de contact entre la craie et le sol pédologique est très irrégulière.

3.4. HYDROGEOLOGIE DE LA CRAIE.

La craie contient de l'eau, au point que l'étude de la nappe d'eau de la craie a pu servir de thème à un symposium tenu en 1959 à Douai et à Lille (Symposium sur la nappe d'eau de la craie, 1959). Cette nappe est effectivement l'une des plus importantes du Nord de la France. Elle alimente également l'Angleterre du Sud Est, la Belgique et la Hollande.

Le réservoir est constitué par l'ensemble des craies du Turonien supérieur et du Sénonien, mais la zone aquifère est essentiellement située dans les craies grises du Turonien supérieur. La puissance du réservoir varie entre 25 et 120 m. Le substratum est formé naturellement par les marnes du Turonien moyen et inférieur.

Le Chapitre 4 nous montrera que la porosité matricielle de la craie varie, en volume, de 20 % à 40 %. Cette porosité très élevée pour une roche est variable verticalement, c'est-à-dire en fonction de l'étage stratigraphique, mais elle peut, localement, varier horizontalement par variation latérale de faciès. Comme pour servir de démonstration à l'indépendance de la porosité et de la perméabilité, la craie est très peu perméable. Nous en verrons la cause au chapitre suivant.

Cette imperméabilité peut être telle que, selon L. PICARD (Symposium Nappe Craie, 1959), elle permet à la craie, en Palestine, de constituer une couverture capable de maintenir l'eau

dans un réservoir sous-jacent constitué par des calcaires fissurés.

Et cependant, en Europe, elle constitue elle-même un réservoir exploitable. La porosité matricielle élevée explique une teneur en eau élevée à saturation, c'est-à-dire un gros volume d'eau disponible, mais elle n'explique pas que l'eau puisse circuler. Or nous avons vu précédemment que le massif crayeux, au moins localement, était fissuré ou parcouru de diaclases. Ce sont donc ces diaclases et ces fissures qui semblent jouer un rôle prépondérant dans la circulation de l'eau dans la craie. Nous avons vu que cette fissuration affectait surtout les roches supérieures, à proximité de la surface. Cela ne suffit pas à expliquer l'existence d'une nappe. Il faut, pour que l'eau puisse circuler, que ces fissures et ces diaclases s'élargissent et s'ouvrent progressivement en profondeur.

Seule la dissolution progressive de la roche permet d'augmenter la troisième dimension des discontinuités. Et cette dissolution ne peut être efficace que si la vitesse et le volume de l'eau de percolation sont suffisants pour provoquer un lessivage. C'est pourquoi la fissuration profonde n'est pas développée régulièrement dans le massif crayeux. Elle affecte surtout les vallées, les vallons secs et leurs abords immédiats, ou les zones de recouvrements tertiaires très perméables. Les plateaux, au contraire, demeurent pratiquement imperméables. Notre expérience nous a montré en Champagne que dans une galerie s'enfonçant sous le plateau qui borde la Marne, le massif de craie ne présentait aucune fissure ouverte. Et, bien que la roche soit saturée, l'exhaure était négligeable au delà de la traversée de la zone superficielle, l'écoulement de l'eau ne s'effectuant pratiquement que par le suintement des parois.

Du point de vue de la ~~saturation~~ fissuration, le massif de craie est donc hétérogène. Sa conductivité hydraulique augmente quand on se rapproche d'une zone synclinale, topographiquement ou stratigraphiquement ; elle diminue de la surface vers la profondeur.

Il n'est pas dans notre but d'étudier en détail la manière dont l'eau circule dans la craie. De nombreux facteurs, eaux pluviales, conditions météorologiques, bassins-versants, sortent du cadre que nous nous sommes fixé. Quelques chiffres permettent de se faire une idée des caractéristiques hydrauliques de la craie. D'après BERKALOFF cité par ROUX [1963] la porosité réelle efficace du massif, c'est-à-dire la somme de la porosité matricielle efficace et de la porosité de fissures, serait voisine de 2 %, atteignant 10 % dans les zones d'oscillation de la surface piézométrique.

ROUX [1963] donne quelques valeurs de la transmissivité : la transmissivité moyenne pour la craie du bassin de la Somme est de 4,8 m²/h, mais elle varie énormément suivant l'implantation du puits, de 0,5 m²/h sur les plateaux à 100 m²/h dans les vallées sèches et même à 360 m²/h près d'Amiens.

En conclusion, la craie se révèle être un réservoir par sa porosité mais sa perméabilité est liée à un réseau de fissures qui ne l'affecte que localement.

3.5. LA CRAIE ET LES PROBLEMES GEOTECHNIQUES.

La Géomorphologie a montré, par les différentes formes de relief rencontrées dans la Craie, la variété du comportement de ce matériau.

Capable de constituer des falaises verticales de plusieurs dizaines de mètres de hauteur, ou d'être le siège de manifestations karstiques, la craie peut présenter des analogies morphologiques étroites avec des affleurements marneux.

LEVEQUE [1960] a particulièrement bien mis en évidence ce paradoxe, qui n'est pas nécessairement lié à la teneur en argiles variable de la Craie.

Certes une teneur croissante rendra la craie plus facilement plastique. Mais il semble qu'il faille surtout distinguer la craie de surface de la craie profonde.

L'étude géomorphologique a bien montré combien la craie était sensible aux agents atmosphériques et particulièrement au gel. La destruction progressive de sa structure finit par en faire un autre matériau, composé d'une matrice pâteuse, plastique, enrobant des débris anguleux de craie compacte. En profondeur, d'abord très fissurée, la craie redevient parfaitement compacte.

C'est surtout cette tranche superficielle des massifs crayeux que connaissent et craignent les ingénieurs. Il paraît délicat d'assurer la stabilité d'un édifice très pesant sur un matériau aussi hétérogène.

La teneur en eau de la craie est généralement voisine de sa limite de plasticité, voire de sa limite de liquidité et une action mécanique, détruisant la structure, provoque très rapidement la formation d'une boue sans aucune résistance. Un phénomène de ce genre peut se produire lors du battage de pieux de fondation, faisant craindre un enfoncement indéfini.

La présence d'entonnoirs de dissolution masqués par les dépôts superficiels peuvent être à l'origine de tassements des constructions. Le remplissage de ces entonnoirs, généralement lâche, comporte parfois des "ponts" fragiles qui peuvent céder brutalement si l'approfondissement de l'entonnoir se poursuit sous l'action de l'eau [HIGGINBOTTOM, 1965].

Cette craie superficielle, qui entre très nettement du point de vue mécanique dans la famille des sols, a fait l'objet de nombreuses études en France et en Grande-Bretagne (Chap. 8). Au contraire la craie profonde, compacte, que l'on rencontre en souterrain, et qui doit être considérée comme un matériau faisant la transition entre les sols et les roches, n'a jamais fait l'objet d'une étude géotechnique fondamentale et appliquée, étude que nous allons tenter dans la suite.

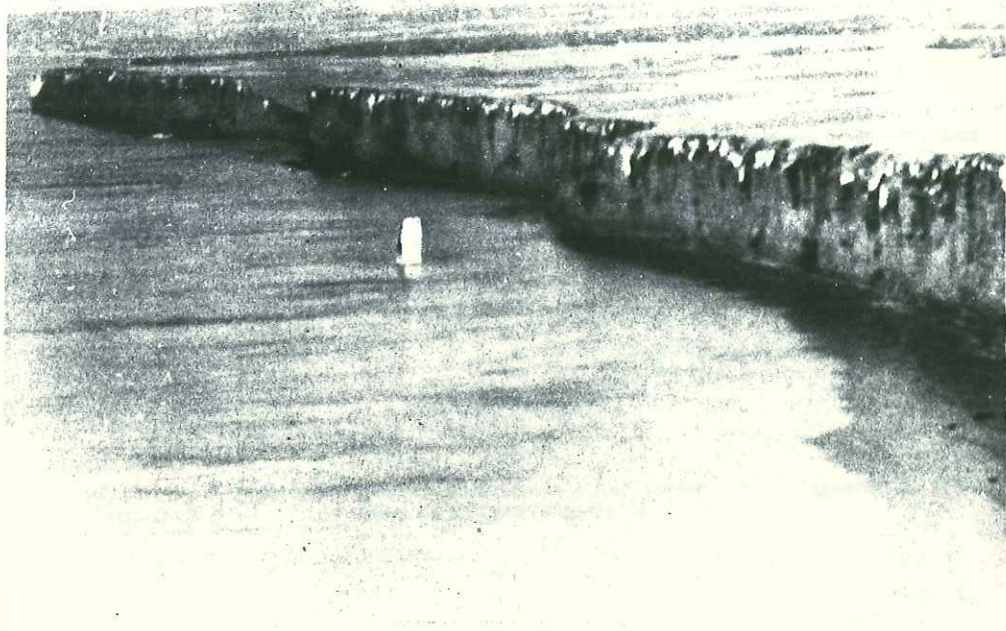


Fig. 3-2 - Falaise de craie du pays de Caux.

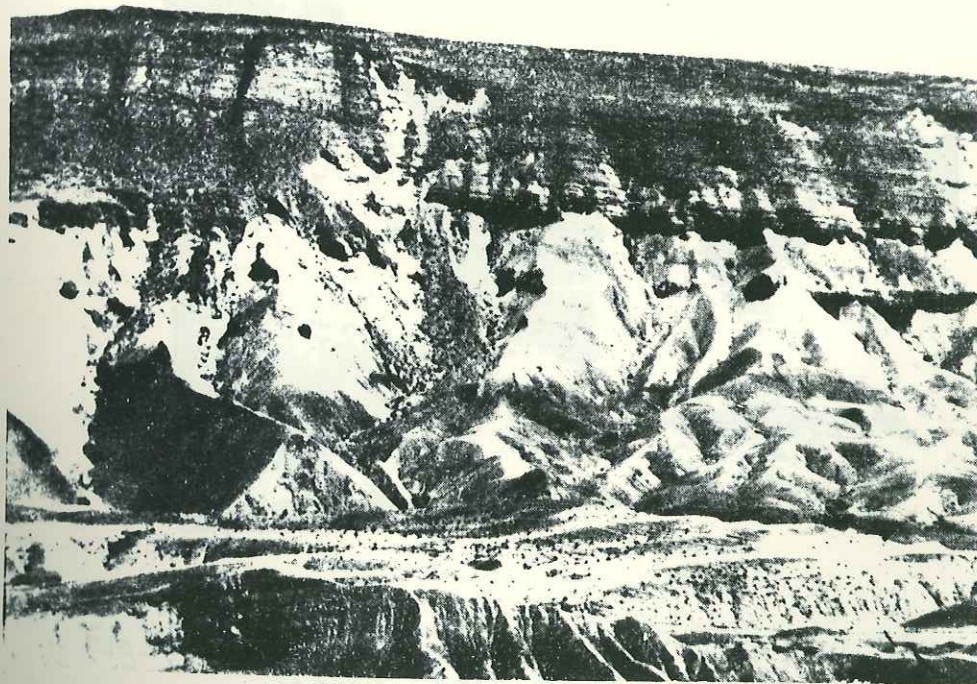


Fig. 3-1. Glacis raviné de la craie du groupe
du Mont Scopus - Israël.
(d'après A. Flexer)

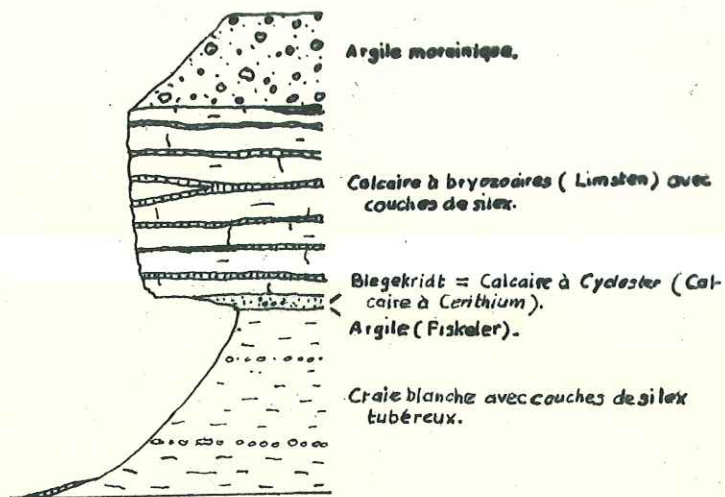


Fig. 3-3. Coupe transversale de Stevns Klint, formée selon l'équerre de la ligne de la côte (d'après N. V. Ussing).

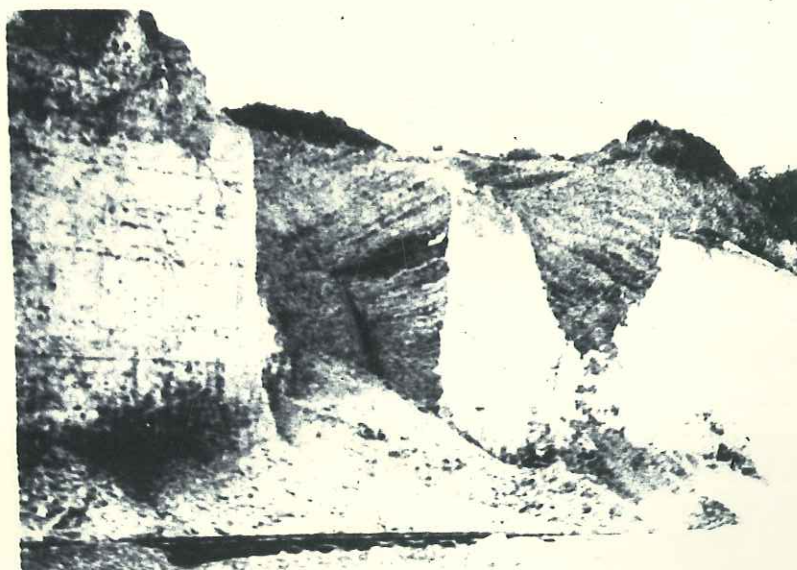


Fig. 3-4. Entonnoirs de dissolution (pipes) dans la craie près de Sittingbourne, Kent.
(d'après I. E. Higginbottom)

DEUXIEME PARTIE

RHEOLOGIE

Après avoir étudié les propriétés mécaniques des roches, nous allons maintenant nous occuper de leur comportement sous l'effet de contraintes de cisaillement. C'est ce que l'on appelle la rheologie.

La rheologie est la science qui étudie le comportement des matériaux sous l'effet de contraintes de cisaillement. Elle se divise en deux branches : la viscosité et la plasticité.

La viscosité est la propriété d'un fluide de résister à l'écoulement. Elle est caractérisée par le coefficient de viscosité η . La plasticité est la propriété d'un solide de résister à la déformation permanente. Elle est caractérisée par la limite élastique σ_e .

La viscosité est une propriété intrinsèque des fluides. Elle dépend de la température et de la nature du fluide. La plasticité est une propriété extrinsèque des solides. Elle dépend de la structure du matériau et de la direction des contraintes.

La viscosité est une propriété intrinsèque des fluides. Elle dépend de la température et de la nature du fluide. La plasticité est une propriété extrinsèque des solides. Elle dépend de la structure du matériau et de la direction des contraintes.

PREAMBULE

Le point de départ de l'étude qui suit fut un projet d'usine souterraine dans la Craie du bassin Parisien. Le problème de l'énergie de pointe avait poussé Electricité de France à envisager différents sites susceptibles d'être favorables à la construction d'usines de transfert d'énergie par pompage. Parmi ces projets, celui de Venteuil (sur les bords de la Marne), près d'Epernay, avait la particularité de comporter un circuit hydraulique entièrement souterrain. Le transfert d'énergie devait s'effectuer entre un bassin inférieur, au niveau de la Marne, et un bassin supérieur situé sur un plateau 200 m plus haut.

De ce fait l'usine, prévue à la verticale du bassin supérieur, et le circuit hydraulique se trouvaient entièrement dans la Craie du Sénonien. Les études préliminaires comportaient le creusement d'une galerie de reconnaissance (section 10 m^2 , pente descendante 0,03, longueur 1 000 m) qui devait atteindre la zone choisie par l'usine sous 200 m de recouvrement environ (fig. A).

Au cours de l'avancement des travaux de reconnaissance, plusieurs prélèvements furent effectués dans des niches ou des antennes perpendiculaires à la galerie. Une antenne servit de laboratoire pour les essais en place, tandis que les blocs de craie prélevés furent utilisés pour les essais au laboratoire E. D. F. d'Albertville.

Quelques sondages extérieurs, au niveau de l'entrée de la galerie et à la verticale de l'usine, permirent également de récupérer quelques échantillons pour essais.

Les résultats et l'étude des essais en place feront l'objet du chapitre 7 consacré aux travaux souterrains dans la craie. Nous examinerons à cette occasion les mesures de déformation effectuées dans un modèle réduit de la cavité définitive. Ce modèle fut exécuté à proximité de la galerie, au cours des travaux de reconnaissance.

Nous consacrerons cette deuxième partie de l'étude géotechnique de la craie à l'examen des résultats des essais sur échantillons pour tenter de définir le comportement rhéologique intrinsèque du matériau.

Il n'est pas d'exemple de phénomène physique affectant un volume de matière quelconque dont l'explication n'ait sa source dans la nature et les

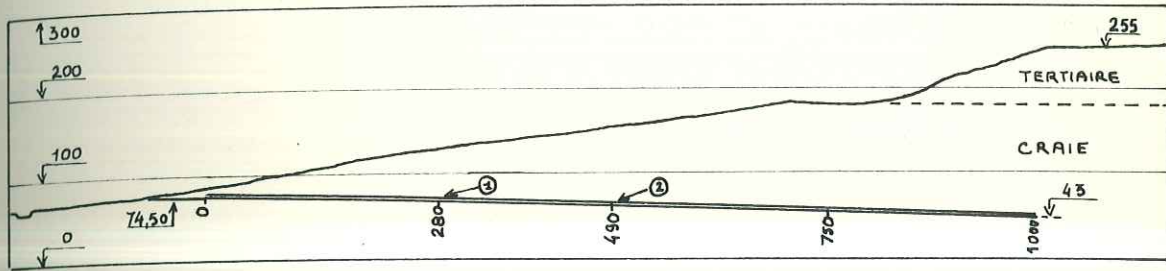
réactions mutuelles des parties élémentaires de ce volume. La compréhension du comportement rhéologique de tout matériau n'échappe pas à cette proposition et nécessite la connaissance de la nature de ses constituants élémentaires et de leur agencement. L'allongement d'un élastomère s'explique par ses longues chaînes de molécules, la fragilité d'une fonte par la forme en paillettes des inclusions de graphite, le tassement d'un sol par son volume de vides.

Nous exposerons donc au chapitre 4 les propriétés physiques et géométriques de la craie, la nature la forme et la dimension de ses constituants élémentaires. Avant d'aborder l'étude de son comportement mécanique nous étudierons dans le chapitre 5 les méthodes d'essais et l'appareillage employés au laboratoire. Ceci, parce que l'absence de normalisation des essais de mécanique des roches ne permet pas de faire des comparaisons valables entre plusieurs résultats si l'on ignore le processus expérimental. Et d'autre part, toute recherche implique des problèmes technologiques qui amènent à modifier des appareils voire à innover.

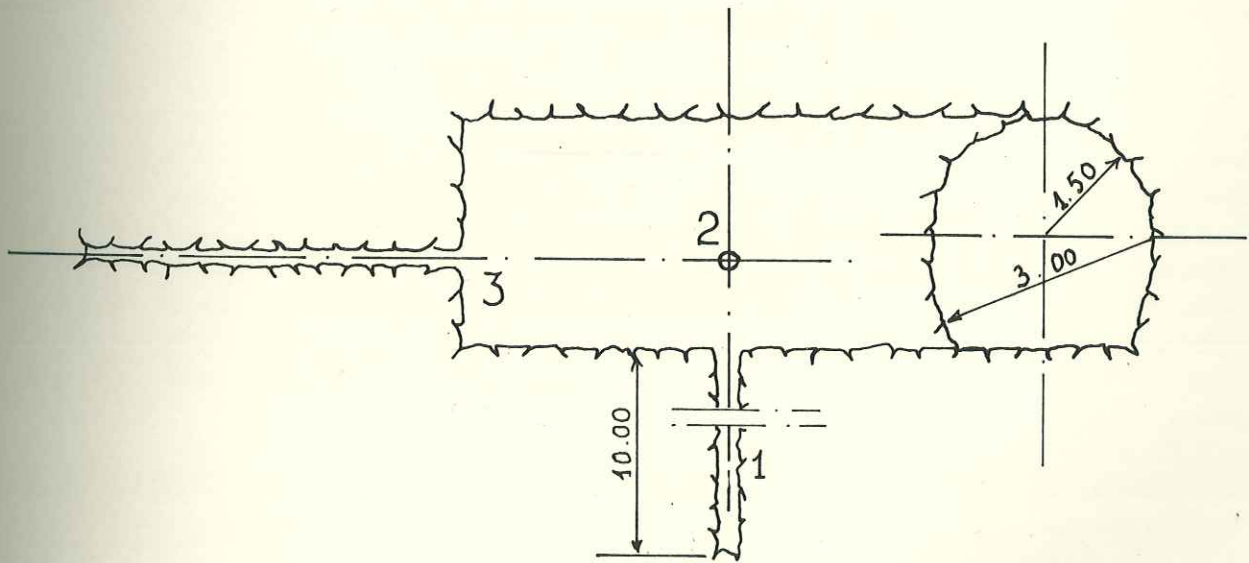
Enfin nous aborderons l'étude de la rhéologie de la craie. Etudier le comportement rhéologique d'un matériau, c'est étudier la manière dont les déformations d'un élément de volume de ce matériau correspondent aux contraintes qui lui sont imposées, ou réciproquement. Cette définition est celle adoptée par le Conseil du Groupe français de Rhéologie en 1967.

L'étude du comportement mécanique des matériaux ne date pas d'aujourd'hui, non plus que la rhéologie. Ce qui est nouveau, c'est, selon RADENKOVIC, d'assigner à la Rhéologie l'étude de tous les matériaux tels qu'ils sont, et non plus seulement l'étude de matériaux théoriques très souvent irréalisables.

Le premier effet de cette petite révolution serait d'unifier le langage de façon à utiliser la même terminologie pour le comportement d'un plastique ou d'une roche, d'une charpente métallique ou d'un massif rocheux, d'une pâte quelconque ou d'une coulée de boue. Il est capital pour se comprendre de parler le même langage.



Coupe schématique du plateau tertiaire et du versant crayeux de la vallée de la Marne - Profil en long de la galerie avec distances à l'origine en mètres - Zones d'essais 1 et 2 - Hauteurs et longueurs à la même échelle - Altitudes en mètres.



Coupe de la galerie et du rameau n° 1 de la zone d'essais 1 - Implantation des sondages 1, 2, 3, pour essais au Mederatec.

Fig. Préambule. A.

4.1. DESCRIPTION

La craie est un minéral élémentaire de la phase solide d'une phase.

Le minéral est constitué de particules constituant la phase liquide tant

4.1.1. Description géométrique

La craie est un minéral qui se présente sous deux états : solide et liquide. Les caractéristiques suivantes :

CHAPITRE 4

Le minéral est par conséquent les caractéristiques ont été les suivantes :

DESCRIPTION DE LA CRAIE COMME ASSEMBLAGE DE PARTICULES

Il s'agit d'un minéral qui se présente sous deux états : solide et liquide. Les caractéristiques suivantes :

4.1. DESCRIPTION GEOMETRIQUE DE L'ASSEMBLAGE

Nous allons maintenant décrire la structure de la craie. Les caractéristiques suivantes :

4.2. LES RELATIONS INTERPHASES

La craie est un minéral qui se présente sous deux états : solide et liquide. Les caractéristiques suivantes :

4.3. TABLEAU COMPARATIF DES PROPRIETES PHYSIQUES

Il s'agit d'un minéral qui se présente sous deux états : solide et liquide. Les caractéristiques suivantes :

DE PLUSIEURS CRAIES DU BASSIN DE PARIS-LONDRES.

Observations sur la craie de Paris-Londres

L'examen au microscope électronique de la craie de Paris-Londres a permis d'observer la structure de la craie. Les caractéristiques suivantes :

Les observations au microscope électronique ont permis d'observer la structure de la craie. Les caractéristiques suivantes :

4.1. DESCRIPTION GEOMETRIQUE DE L'ASSEMBLAGE

La craie, comme toutes les roches, est un assemblage de particules élémentaires laissant entre elles des vides. Les particules constituent la phase solide, tandis que les vides contiennent tantôt une phase liquide tantôt une phase gazeuse, ou les deux en même temps.

4.1.1. Les particules

La teneur en carbonate de calcium a été déterminée par calcimétrie sur deux échantillons du sondage V118. Les valeurs obtenues ont été les suivantes :

CO ₃ Ca	95,68 %
	96,77 %

Il s'agit donc d'une craie très pure, presque uniquement constituée de cristaux de calcite, comme le confirme l'observation au microscope. Nous avons déjà noté dans la première partie que l'observation au microscope optique ordinaire ne fournit aucun renseignement sur la structure de la craie.

Il a donc fallu pour la décrire convenablement utiliser le microscope électronique. Dans un premier temps des observations furent faites au microscope électronique à transmission, puis ensuite au microscope électronique à balayage dont la profondeur de champ est bien supérieure.

Observation au microscope électronique à transmission

L'examen des surfaces est réalisé au moyen d'empreintes de carbone. Un film de carbone amorphe de 200 à 300 Å d'épaisseur est déposé sur la surface à observer par évaporation thermique sous vide. La réplique de carbone est ensuite isolée en dissolvant la craie dans une solution d'acide chlorhydrique à 1 % dans l'alcool éthylique. Avant d'être recueillies sur grilles, les répliques sont nettoyées par immersion dans l'alcool éthylique pur.

La planche 41 montre quatre photographies obtenues au Laboratoire Central P. C. M. du Service de la Production Thermique d'E. D. F. à Saint-Denis. Les photographies 1 et 2 représentent un aspect de la surface d'une cassure par traction provoquée au Laboratoire. On observe un assemblage de cristaux automorphes de 1 à 2 microns et on remarque que la rupture n'a pas provoqué d'arrachement sur les faces des cristaux, indice d'une faible cohésion. Les photographies 3 et 4 correspondent aux lèvres d'une fissure naturelle. Les particules ont plutôt la forme de plaquettes et paraissent être des débris de coccolithes. Un tel coccolithe apparaît sur la

photographie 4. Au centre de la même photographie un morceau de *Coccolithe* se présente comme un empilement de plaquettes du type "toit de lauzes". Les arêtes des particules sont émoussées indiquant que les deux faces de la fissure ont dû jouer sans que ce jeu soit suffisant pour faire disparaître des structures fragiles comme celles du *coccolithe* de la photographie 4. La dimension des particules varie ici de 0,2 à 1,5 microns.

Remarque

Les conclusions de l'observation d'une photographie au microscope électronique ne peuvent être étendues à tout l'échantillon. La réplique observée ne fait que 1 mm^2 et la surface de la photographie 2 ($\times 12\,000$) ne représente que $45 \cdot 10^{-6} \text{ mm}^2$. Il appartient donc à l'observateur de choisir les clichés en fonction de leur représentativité.

Observation au microscope électronique à balayage

L'inconvénient des répliques est de ne permettre que l'observation d'une surface, le relief étant limité aux aspérités de cette surface.

Le microscope à balayage (scanning microscope) offre l'énorme avantage de l'observation directe. C'est pourquoi nous avons entrepris une série d'observations au Laboratoire de Géologie du Muséum d'Histoire Naturelle équipé d'un microscope Cambridge. La surface à observer est préalablement recouverte sous vide d'un film d'argent pour améliorer la réflexion. L'échantillon est ensuite placé sur la platine du microscope. Cette platine permet d'observer l'échantillon sur toute sa surface et sous tous les angles (on peut obtenir un profil).

Les planches 4-2 et 4-3 montrent quelques aspects, parmi les plus typiques, de la structure de la craie de Venteuil. Aux faibles grossissements on distingue une structure homogène constituée par un assemblage assez lâche de petits grains et de *coccolithes*. De nombreux interstices apparaissent entre les grains. Au grossissement 7000 de nombreux grains se révèlent être en fait des amas constitués par l'agglomération de particules élémentaires, essentiellement des petites plaquettes identiques à celles que nous avons déjà observées au microscope à transmission. Ces amas peuvent avoir jusqu'à 10 microns de diamètre. Les particules élémentaires qui paraissent toutes être des débris de *coccolithes*, ont entre 0,2 et 1,5 microns. La plaquette standard, de forme rectangulaire à bords émoussés, a une longueur de 1 micron, une largeur de 0,5 micron et une épaisseur difficile à mesurer mais qui doit se situer autour de 0,25 micron.

Curieusement cette anisotropie géométrique des particules élémentaires ne paraît pas avoir ordonné une texture anisotrope de la craie comme en témoignent des observations faites suivant plusieurs directions.

Du point de vue granulométrique aucune particule élémentaire ne paraît avoir une dimension supérieure à 2 microns. Les tests complets de coccolithes ne dépassent pas 4 microns. Seuls quelques rares tests de foraminifères dépassent 10 microns. On peut estimer à plus de 80 % la fraction granulométrique comprise entre 0,2 et 10 microns, en comptant les amas de particules comme des grains.

D'après la classification du M. I. T.^{*}, cette granulométrie place la craie de Venteuil dans la classe des silts moyens et fins avec une fraction argileuse moyenne et grossière. Sur la figure 4-1 nous pouvons comparer les dimensions des particules constituant la craie aux dimensions d'autres éléments naturels.

4.1.2. Les vides

Les planches 4-2 et 4-3 donnent une idée de la forme et de la dimension des vides. Cette forme est très variable et très compliquée. Il semble qu'on puisse distinguer deux classes de vides. Une première classe serait constituée par les espaces entre les particules élémentaires. De dimension inférieure à 0,5 micron, ils peuvent ne communiquer entre eux que par des espaces inférieures à 0,1 micron. Une deuxième classe serait constituée par les espaces entre les amas ou entre les coccolithes. Des trous peuvent apparaître, favorisés par la forme circulaire des coccolithes (Pl. 4-3, photog. 2) ou dus au hasard de la sédimentation comme dans des alluvions graveleuses (Pl. 4-3, photog. 1). Les dimensions de cette deuxième classe de vides varient de 0,5 micron à plusieurs microns. Ces vides sont interconnectés par des étroits de dimensions voisines de 0,5 micron.

N'était la cohésion qui maintient l'ensemble, cette structure est très semblable à celle d'un sol meuble.

Le volume des vides a été mesuré par porométrie au mercure au Laboratoire de la Société française de Céramique. Cette méthode est bien connue ; nous en rappelons cependant le principe. Après séchage à 105-110°C jusqu'à poids constant et refroidissement dans un dessiccateur, l'échantillon est placé dans une cellule hermétique et est dégazé sous un vide de 40 microns de mercure. On injecte ensuite du mercure dans la cellule par l'intermédiaire d'une pompe volumétrique sous des pressions allant de 0 à 300 bars. A chaque niveau de pression correspond une nouvelle classe de pores envahis. La pression définit le diamètre de ces pores et le volume de mercure débité par la pompe donne leur volume.

Les résultats sont exprimés sous forme d'une courbe cumulative

des porosités partielles en fonction des diamètres de pores.

A partir de cette courbe il est possible de tracer l'histogramme de répartition de la porosité partielle en fonction de la dimension des pores, la porosité partielle étant la différence entre deux porosités correspondant à deux diamètres de pores successifs. La porosité partielle est exprimée en pourcentage de la porosité ouverte totale.

L'inconvénient de la méthode est de méconnaître les pores fermés. De plus des pores de gros diamètres peuvent n'être accessibles que par des pores beaucoup plus fins, et risquent d'être comptés en volume avec cette classe de pores beaucoup plus fins. Il semble qu'un tel risque existe dans le cas de la craie.

Douze mesures ont été effectuées sur des échantillons cylindriques $\varnothing$ 18 mm, H 18 mm du PM 300. Les courbes obtenues sont toutes fort semblables.

La figure 4-2 montre l'allure de ces courbes, très redressée dans une gamme de diamètres de pore équivalents comprise entre 0,25 et 0,75 micron. Les histogrammes de répartition de la porosité partielle (fig. 4-3) indiquent que plus de 8 % des pores ont un diamètre compris entre 0,25 et 0,75 micron. Ceci ne correspond que partiellement à la réalité et l'absence de vides de dimension supérieure à 0,75 micron est démentie par l'observation au microscope électronique.

L'explication est que les vides de plus grande dimension ne sont pas connectés par des vides supérieurs à 0,75 micron. Ceci confirme bien les conclusions de l'observation microscopique.

Les histogrammes perdent alors de leur intérêt. Mais il reste la valeur totale de la porosité, comprise pour les 12 essais entre 39,5 % et 40,5 % et l'intérêt de savoir que ce ne sont pas les vides les plus gros qui commanderont l'écoulement d'un fluide interstitiel mais les étroits qui les relient.

4.1.3. Poids spécifique, surface spécifique

Le poids spécifique de la phase solide a été mesuré au picnomètre Le Chatelier. Deux prises ont donné les résultats suivants :

	Poids	Volume	Poids spécifique de la phase solide
1re prise	59,879 g	22,4 cm ³	{ 2,673 g/cm ³ $\pm$ 0,005 2,702 g/cm ³ $\pm$ 0,005
2e prise	60,000 g	22,2 cm ³	

La deuxième prise semble fournir une valeur plus proche de la réalité puisque nous avons vu que la craie de Venteuil contenait plus de 95 % de calcite de poids/spécifique 2,72 g/cm³.

Le poids spécifique apparent (ou densité) de la roche sèche peut être calculé à partir de la porosité et du poids spécifique de la phase solide. Avec $n = 40 \%$ et $\gamma_s = 2,70$ nous obtenons $\gamma_d = 1,62$ g/cm³. Nous avons vérifié le poids spécifique apparent par pesée à la balance hydrostatique d'échantillons paraffinés :

	Echantillons	Profondeur	Poids spécifique apparent g/cm ³
Sondage S 118	1	17,60 m	1,58
	4	20,80 m	1,61
	8	21,40 m	1,71
	10	34,70 m	1,59
Sondage S 119	98	22,50 m	1,66
Galerie PM 300	T 3	Couverture	1,58
	T 4	environ	1,62
	T 6	70 m	1,59

A part quelques valeurs un peu plus fortes dues probablement à la présence d'argiles et une porosité plus faible, l'ensemble des mesures est cohérent et confirme la valeur calculée.

Enfin nous avons tenté d'apprécier la surface spécifique interne de la roche en mesurant celle d'une poudre obtenue par destruction de la roche et passée au tamis de 100 microns.

Cette mesure effectuée au perméabilimètre de Blaine par la méthode à porosité constante (50 %) a fourni la valeur de 14.912 cm²/g. Nous avons comparé ce chiffre à quelques valeurs remarquables :

	Surface spécifique (m ² /g)
Sable 0,1 mm	0,03
Craie (poudre tamis 100 μ)	1,50
Kaolinite	10
Illite	100

4.2. LES RELATIONS INTERPHASES

4.2.1. Teneur en eau. Degré de saturation

Les premières de ces relations sont la teneur en eau W et le degré de saturation S. La teneur en eau à saturation ($S = 100\%$) calculée sur la base d'une porosité de 40 % et d'un poids spécifique solide de 2,7 est de 24,7 %. De nombreuses mesures effectuées par saturation d'échantillons provenant des différents prélèvements ont confirmé cette dernière valeur et par là même la porosité obtenue par porométrie :

Lieu de prélèvement	Echantillon Ø 100 H 200	Teneur en eau à saturation %
PM 180	A 1	23,4
	A 5	24,6
	A 6	25,4
	A 7	24,5
	A 8	25,2
	A 9	24,7
PM 300	A 10	25,3
	B 1	24,6
	B 2	25,0
PM 480	B 3	24,3
	C 1	24,3
	C 10	23,6
	C 13	23,7
	C 14	24,1
	C 24	24,2
	C 27	24,3
	C 37	24,5

La moyenne de ce lot de valeurs est de : 24,4 %. Des mesures de teneur en eau faites sur les carottes des sondages V 118, V 119 et galerie 1, 2, 3, et 4 ont montré que la craie en place était saturée.

4.2.2. Degré de mobilité de l'eau interstitielle. Capillarité

Le degré de mobilité de l'eau contenue dans une roche est très variable. En effet l'eau peut être liée chimiquement ou combinée, adsorbée physiquement, capillaire ou tout simplement gravifique. Dans le cas de la craie il était important de tenter de discerner la nature des liaisons eau-particules, liaisons que l'on pouvait supposer fortes à cause de la faible dimension des particules et des vides.

La combinaison chimique est exclue, car la forme stable du carbonate de calcium, la calcite, n'admet pas de molécules d'eau ou d'ions oxhydriles dans son réseau. D'autre part l'eau contenue dans un échantillon ne s'écoule pas sous son propre poids, elle n'est pas gravifique.

Cependant la craie peut perdre la plus grande partie de son eau interstitielle par simple séchage dans l'atmosphère du laboratoire (température 16°C-21°C, hygrométrie 60 à 80 %). La courbe I de la figure 4-4 montre le résultat d'un tel séchage en fonction du temps. La relation est pratiquement linéaire jusqu'à 85 % de la perte totale. Un séchage forcé par ventilation dans une étuve à 35°C fournit une courbe du même genre (courbe II, fig. 4-4) avec une première phase linéaire et une deuxième phase asymptotique. A la fin de cette phase asymptotique la craie n'a cependant pas rigoureusement perdu toute son eau interstitielle. Et un séchage plus poussé à 150°C montre qu'il restait environ 0,2-0,3 % d'eau.

Deux essais de séchage effectués à la thermobalance (fig. 4-5) ont confirmé le départ régulier de l'eau jusqu'à la phase asymptotique. La première phase n'est pas linéaire car la température croît de 1°C à l'heure pour la courbe I et de 2°C à l'heure pour la courbe II. La phase asymptotique est très longue et correspond à un départ d'environ 0,2 à 0,3 % d'eau, soit 1 % de la teneur en eau à saturation.

Cette fraction de l'eau interstitielle, visiblement plus fortement liée, pourrait correspondre à une eau adsorbée ou au moins pelliculaire. Pour fixer les idées nous avons calculé grossièrement l'épaisseur d'eau à laquelle correspond un tel volume pour une surface spécifique de 1,5 m²/g soit 150 Å. Cette épaisseur représente environ 50 molécules d'eau, ce qui est peut-être beaucoup pour une eau adsorbée. Aussi pensons-nous qu'il s'agit surtout d'une eau intermédiaire entre la fraction capillaire et la pellicule adsorbée.

L'opération inverse, qui consiste à saturer la craie, a été tentée dans une ambiance à 100 % d'humidité et 20°C, la craie n'étant pas directement en contact avec l'eau. La courbe de saturation (fig. 4-6, courbe I) a une forme tout à fait analogue à la courbe de séchage avec une première phase linéaire et une deuxième phase asymptotique mais le délai de saturation, pour un volume égal de craie, est environ 10 fois plus grand que le délai de séchage à 35°C sous ventilation (fig. 4-6, courbe II).

La craie absorbe beaucoup plus difficilement l'eau atmosphérique qu'elle ne se sépare de son eau interstitielle.

L'ascension capillaire dans la craie confirme la nature capillaire de la presque totalité de l'eau interstitielle. Cette ascension suit une loi de la forme :

$$h = K \sqrt{t}$$

où h = hauteur d'ascension capillaire, t = temps et K constante.

La figure 4-7 montre le résultat d'un essai sur une éprouvette ϕ 100 mm, H 200 mm dont la base est juste en contact avec l'eau. Le manque de précision des premières mesures explique la non-linéarité de la relation au début de l'essai.

En assimilant notre matériau à un solide parcouru de canaux verticaux de rayon R, sans liaison entre eux, nous avons la relation :

$$K = \sqrt{\frac{AR}{2\eta}}$$

avec R = rayon du capillaire

A = tension superficielle de l'eau

η = viscosité de l'eau.

Dans les conditions de l'expérience nous obtenons un rayon du capillaire inférieur à 0,1 micron, ce qui ne correspond pas tout à fait à la porométrie vue précédemment. Ceci s'explique parce que en réalité les pores communiquent entre eux latéralement, ce qui diminue la vitesse d'ascension capillaire.

4.2.3. Perméabilité

La perméabilité a été mesurée au moyen d'un perméamètre à charge

variable sur une éprouvette $\varnothing$ 38 mm, H = 76 mm. Les valeurs trouvées varient peu autour de $7 \cdot 10^{-7}$ cm/s.

4.2.4. Propriétés physiques de la craie remaniée

Il s'agit d'une craie rendue pulvérulente par un broyage mécanique. Les limites d'Atterberg sont respectivement :

limite de plasticité : 17 %

limite de liquidité : 26 %

On notera que la limite de liquidité est à peine supérieure à la teneur en eau à saturation de la craie solide. Ceci explique que la rupture des liaisons inter-particules par un procédé mécanique quelconque conduise rapidement à un état semi-fluide de l'assemblage eau-particules.

Nous avons effectué un essai à l'aiguille des cimentiers sur une poudre de craie passée au tamis de 100 microns. Cet essai consiste à mesurer l'enfoncement d'une aiguille cylindrique tarée dans le mélange eau-particules en fonction de la teneur en eau. Le mélange effectué porte sur 500 grammes de poudre sèche.

La figure 4-8 montre le résultat de cet essai. Au-dessous de 29 % de teneur en eau la pâte n'est pas suffisamment homogène (flocons) et ne permet pas de faire de mesure. A partir de 30 % de teneur en eau l'aiguille s'enfonce très rapidement en suivant une loi linéaire jusqu'à la teneur de 34 %, au-delà de laquelle l'échantillon de pâte est traversé de part en part.

Nous noterons que les teneurs en eau remarquables de cet essai sont supérieures respectivement aux deux limites d'Atterberg ce qui s'explique peut-être par la difficulté de malaxer et d'homogénéiser 500 grammes de pâte.

Quoi qu'il en soit on remarquera la rapidité du changement d'état du mélange.

AUTEUR et ORIGINE	Poids spécifique phase solide	Poids spécifique apparent sec	POROSITÉ	TENEUR en EAU	LIMITE LIQUIDITÉ	LIMITE PLASTICITÉ
G. Wilson (1948) NORWICH (G.B) craie moyenne craie altérée	2,78			24-33% 29-33%	27,4-27,7%	20,8-24,4
MEIGH, EARLY (1957) Sud. Londres (GB)			(calculée)			
Craie blanche - SENONIEN		1,55		3,2-27,7% moy = 11,3%		
Middle Chalk - TURONIEN		1,53		6,6-34,1% moy = 15,6%		
Craie marneuse - CENOMANIEN		1,84	~ 25%	11,3%		
craie intacte → Triaxial	2,71-2,72	1,55-1,62	~ 40%	23-26%		
P. LEVEQUE (1960) Rangiport (S.O)						
craies pures SENONIEN (99% CO ₂ Ca)	2,70-2,72	1,5-1,6	40-50%		18-24%	13-16,5%
POLVECQUE (1960) Sondages		(calculée)				
VENDIN (P de C) SENONIEN		1,55-1,60	40%			
ARTOIS TURONIEN sup			37%			
ARTOIS TURONIEN moy			32-40%			
ARTOIS TURONIEN inf			20-30%			
NORD CENOMANIEN sup			34-39%			
CENOMANIEN inf			22-27%			
FLORENTIN et al (1961) blocs constitutifs craie senonienne			(calculée)			
Sous recouvrement perméable (11-18m)						
Porcheville (S et O)		1,58		26%		
Monterceau (S et M)		1,56	↙ 30-40%	27%		
Champagne (S et O)		1,62	↘	25%		
Sous recouvrement imperméable (10-13m)					24-28%	19-21%
La Bassée (Nord)		1,60	↗	25%		
Beautor (Aisne)		1,72	↘ 30-40%	21%		
Anserevilles (Nord)		1,67	↙	23%		
DEBAILLE, GHISTE - Mons (Belgique)			(calculée)		Méthode	Scherrer
Echantillons par battage		1,55-1,68	30-37%	19-34%	26-29,5%	19,5-21%
J.C. ROUX (1963) Somme						
Craie à silex			15-21%			
craie blanche senonienne			20-24%			
craie sableuse - TURONIEN Sup.			23-24%			

4-3. Tableau comparatif des propriétés physiques
de plusieurs craies du bassin

Paris - Londres

AUTEUR et ORIGINE	Poids spécifique Phase solide	Poids spécifique apparent sec	POROSITE	TENEUR EN EAU	LIMITE LIQUÉDITE	LIMITE PLASTICITE
UNDERWOOD (1964) MISSOURI Niobrara chalk		1,28-1,84		16-32 %		
Action concertée (1969) GUERVILLE Craie du Campanien	2,715	1,474	43-47 %			
BRUCKSHAW et al (1961) SonDages MANCHE Craie du Cenomanien $\begin{cases} Ca^{++} > 80\% \\ Ca^{++} > 60\% \end{cases}$		$\begin{matrix} 1,85 \text{ à } 2,20 \\ 2,00 \text{ à } 2,28 \end{matrix}$		$\begin{matrix} 5 \text{ à } 20\% \\ 5 \text{ à } 15\% \end{matrix}$		
Ward et al (1968) MUNDIFORD Marne crayeuse - Middle Chalk (70% CO_3Ca)				21 %	58,1 %	20,4 %
HUTCHINSON (1969) Folkestone warren Craie du Turonien					29 %	23 %
HIGGINBOTTON (1965) SUD - ANGLETERRE Craie blanche $\begin{cases} \text{SENONIEN} \\ \text{TURONIEN} \end{cases}$ Craie grise - CENOMANIEN	$\begin{matrix} \text{supposé par} \\ \text{le calcul} \\ \text{de } \delta d_{etn} \end{matrix}$ 2,71 2,71	$\begin{matrix} 1,28-1,79 \\ 1,60-2,24 \end{matrix}$	$\begin{matrix} 34-53\% \\ 17-41\% \end{matrix}$	$\begin{matrix} 19-41\% \\ 8-25\% \end{matrix}$		
DESSENNE (1969) VENTEUIL (MARNE) Craie blanche - SENONIEN	2,702	1,60	40 %	25 %	26 %	17 %

4.3. Tableau comparatif des propriétés physiques
de plusieurs craies du bassin
Paris - Londres

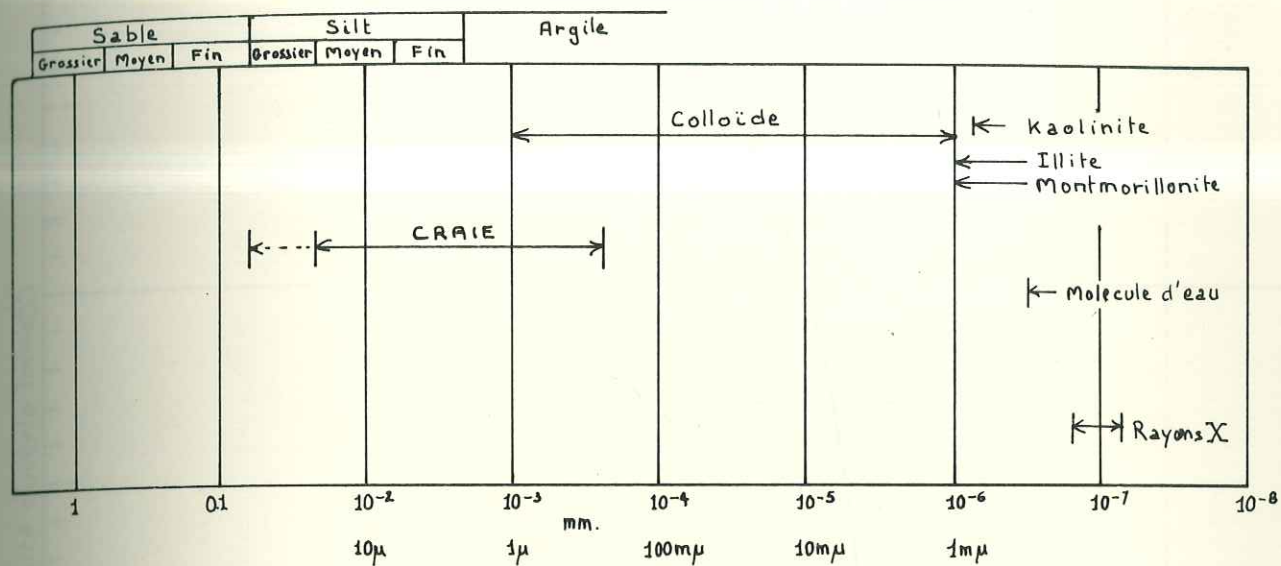


Fig. 4-1 - Comparaison de la granulométrie de la craie aux dimensions d'autres éléments.

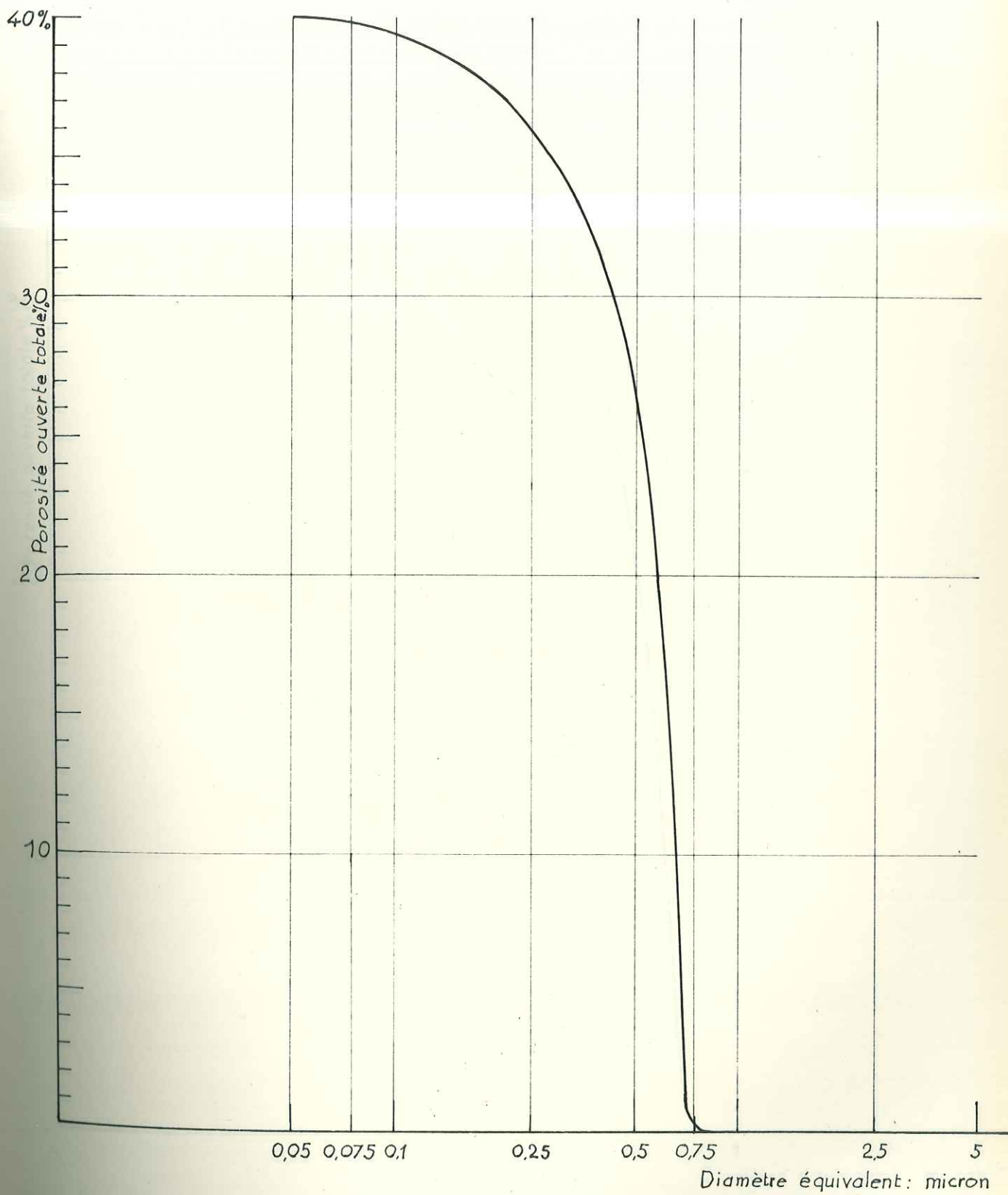


Fig. 4-2 a - Courbe cumulative des porosités partielles
obtenue par porométrie au mercure.
Echantillon n° 35731

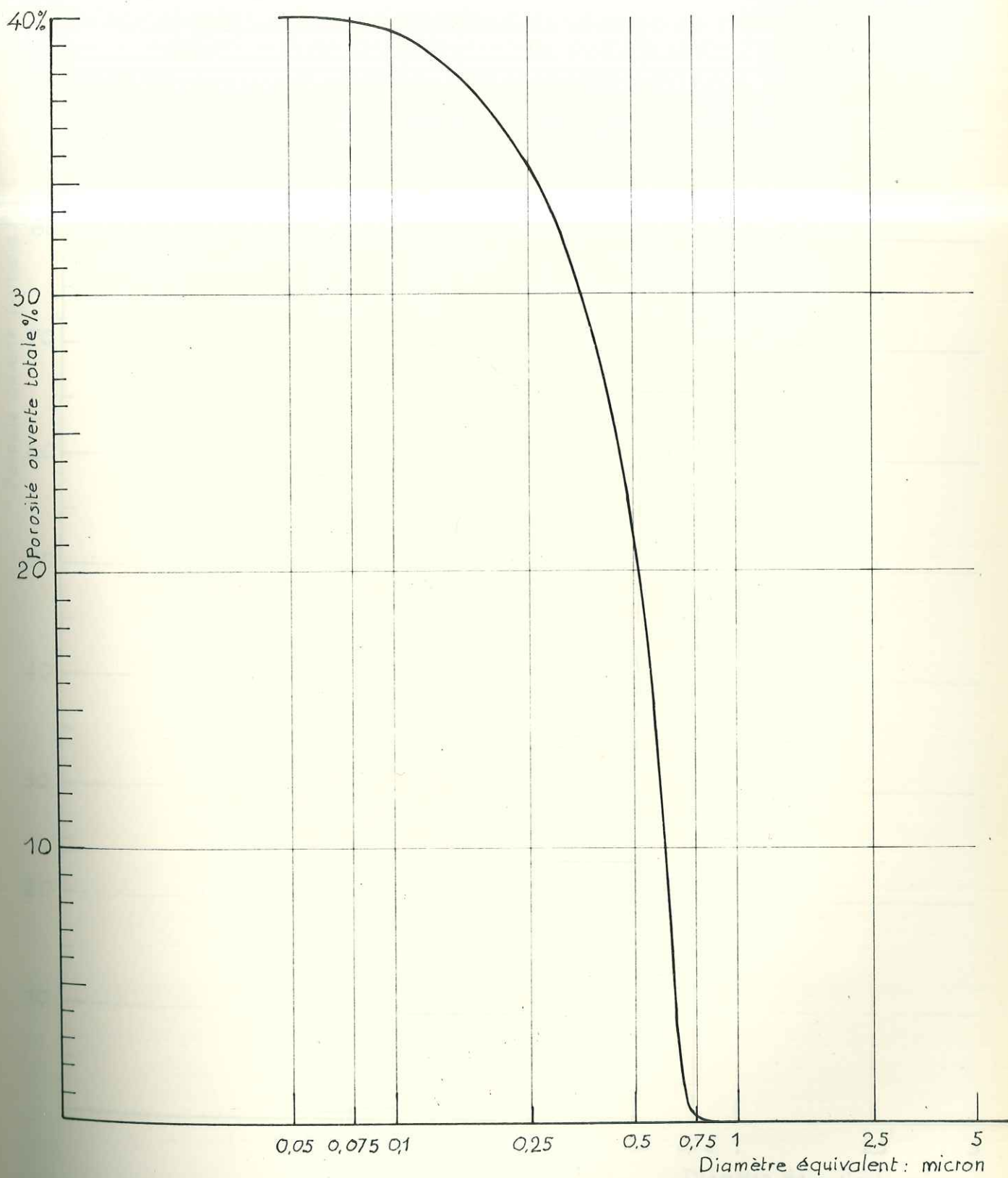


Fig. 4-2 b. Courbe cumulative des porosités partielles
obtenue par porométrie au mercure.
Echantillon n° 35732.

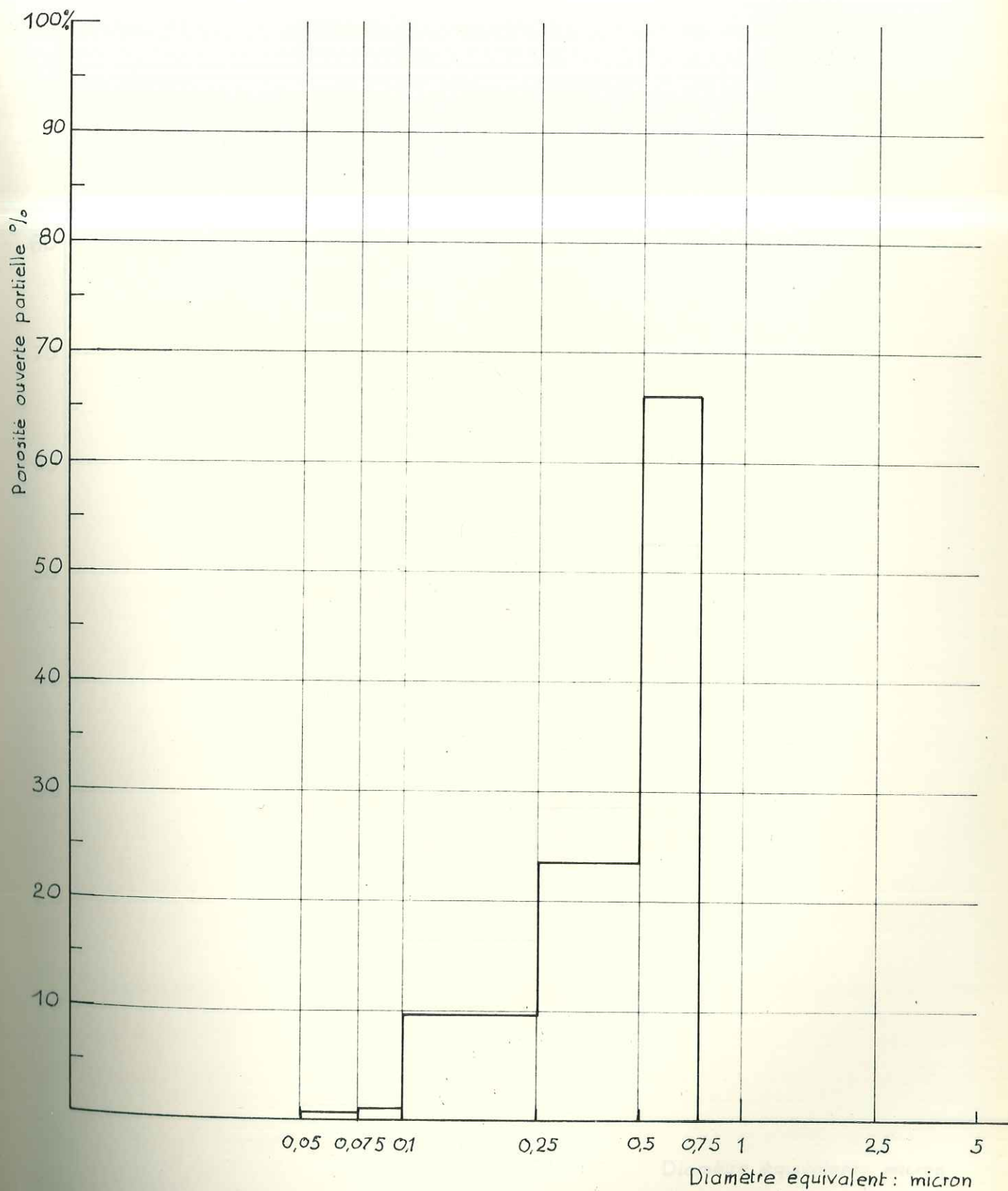


Fig. 4-3 a. - Histogramme de répartition de la porosité correspondant à la courbe de la figure 4.2 a.

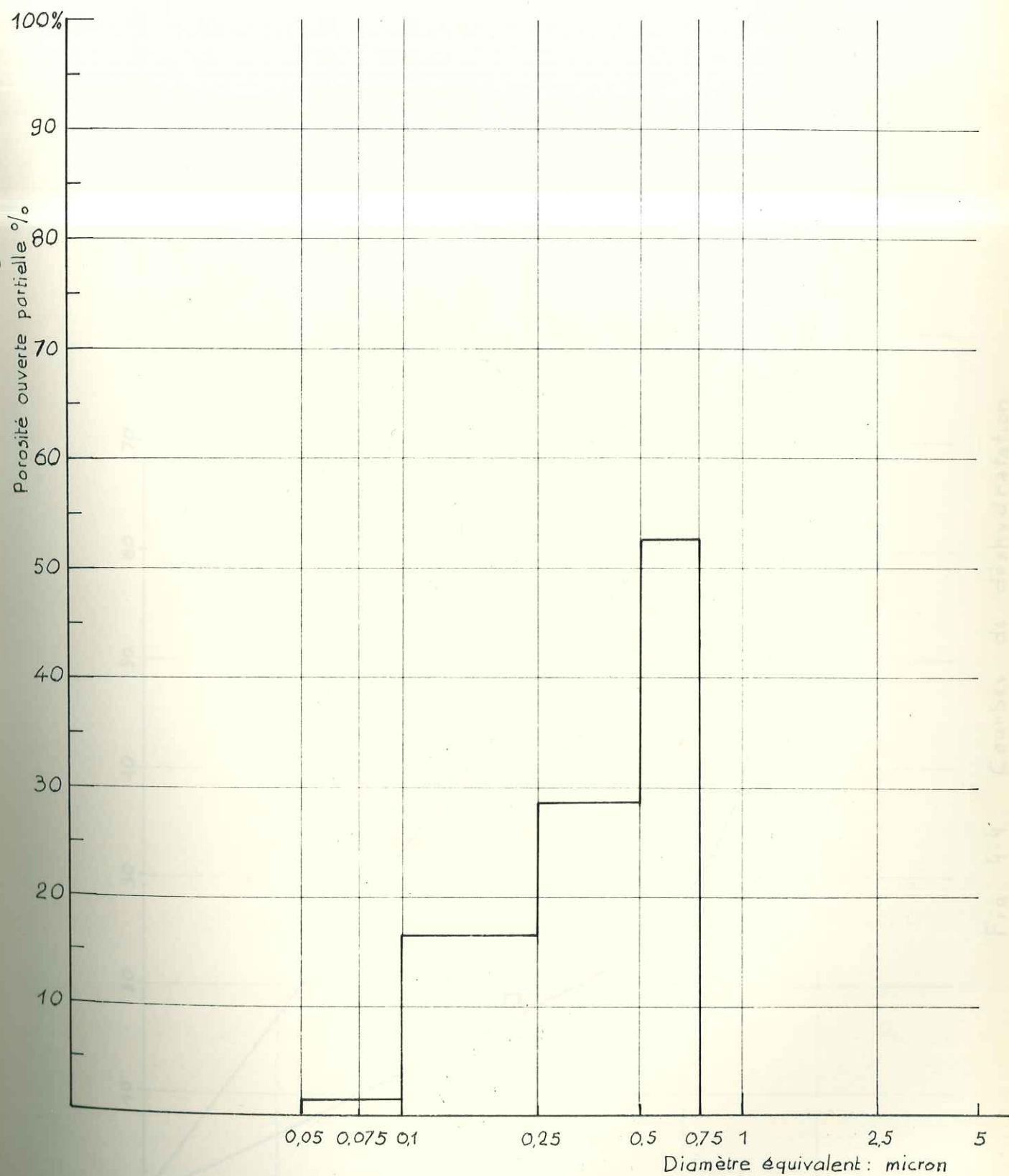


Fig. 4-3 b. Histogramme de répartition de la porosité correspondant à la courbe de la figure 4-2b.

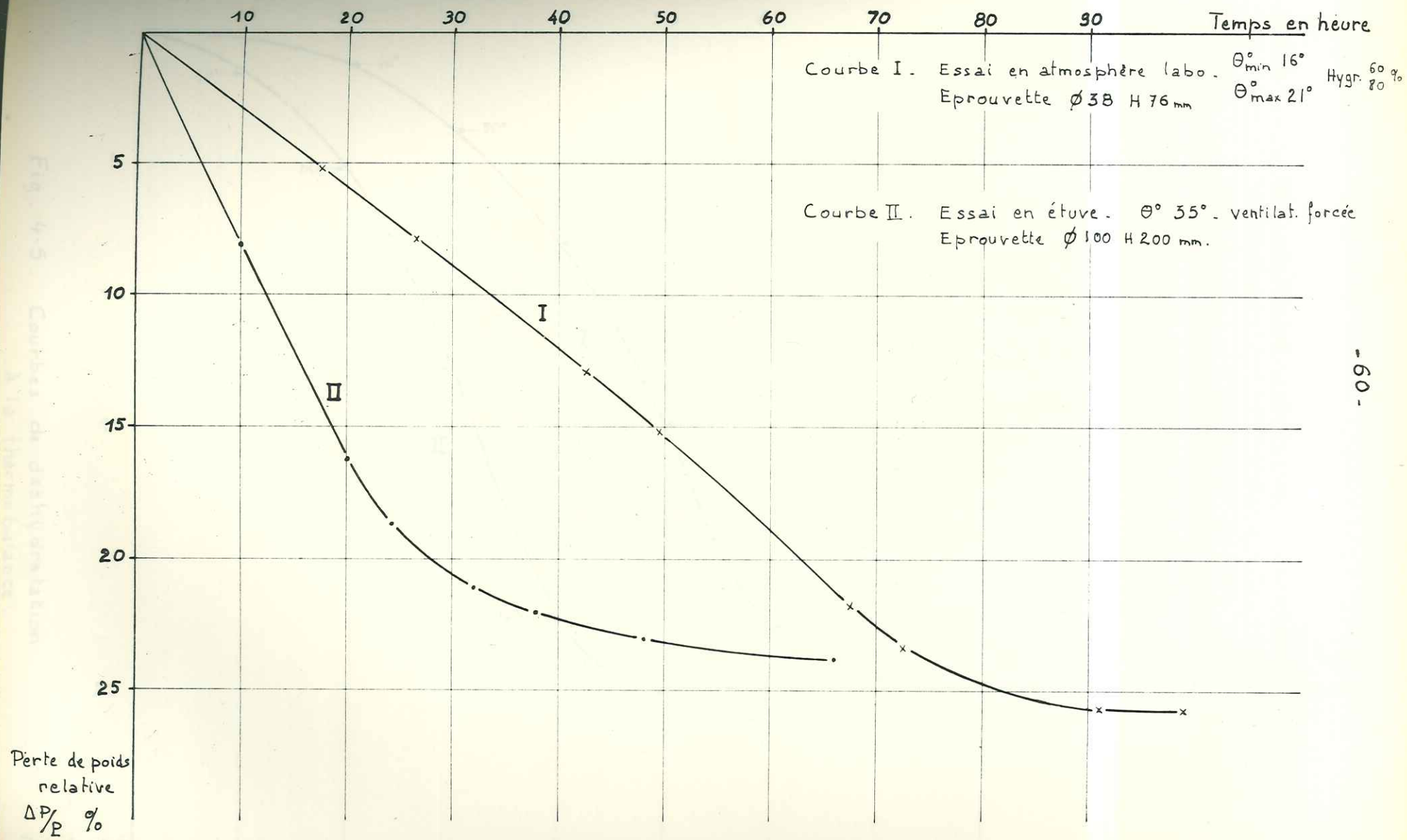
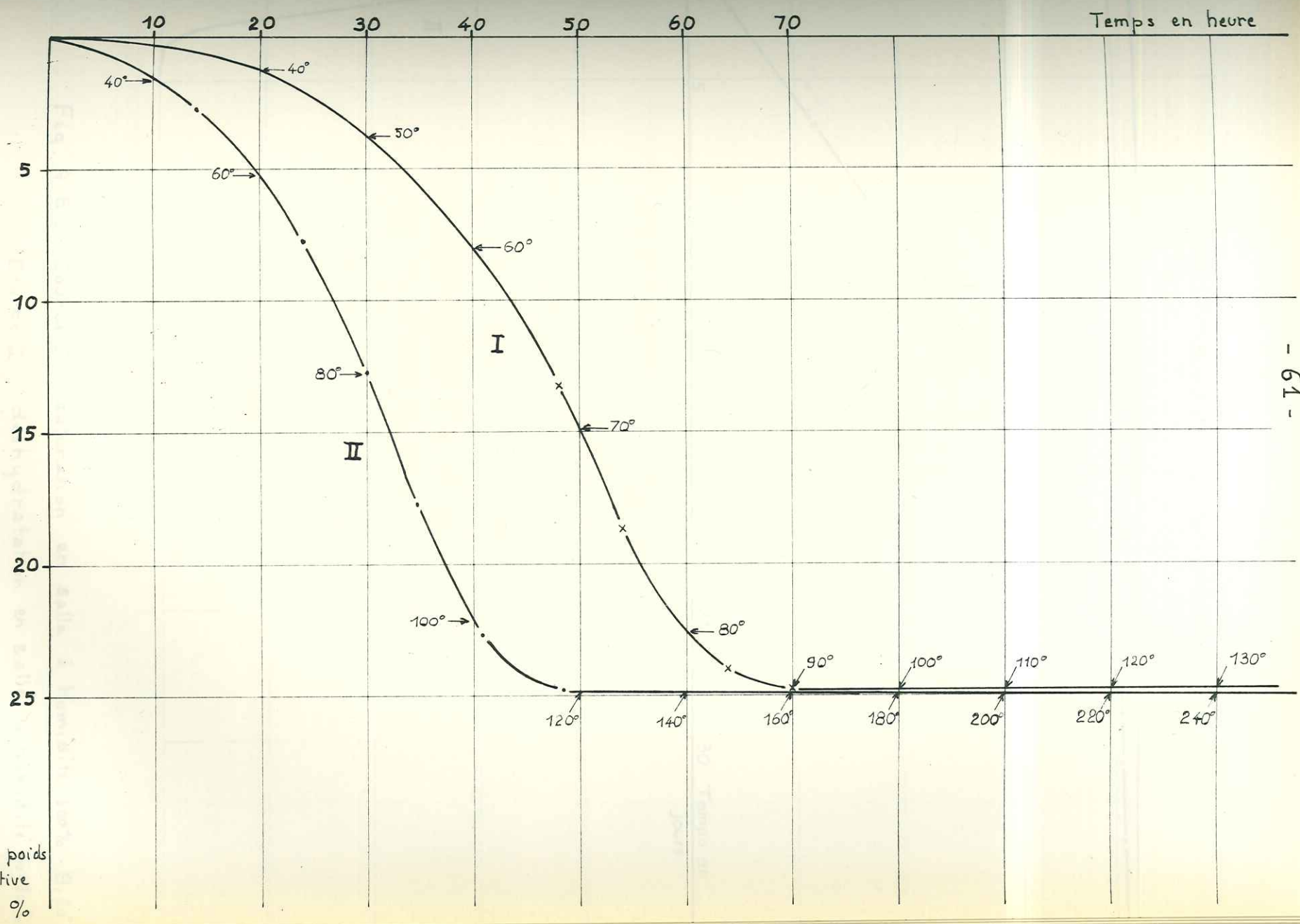


Fig. 4-4. Courbes de déshydratation.

Fig. 4-5. Courbes de deshydratation
à la thermobalance.



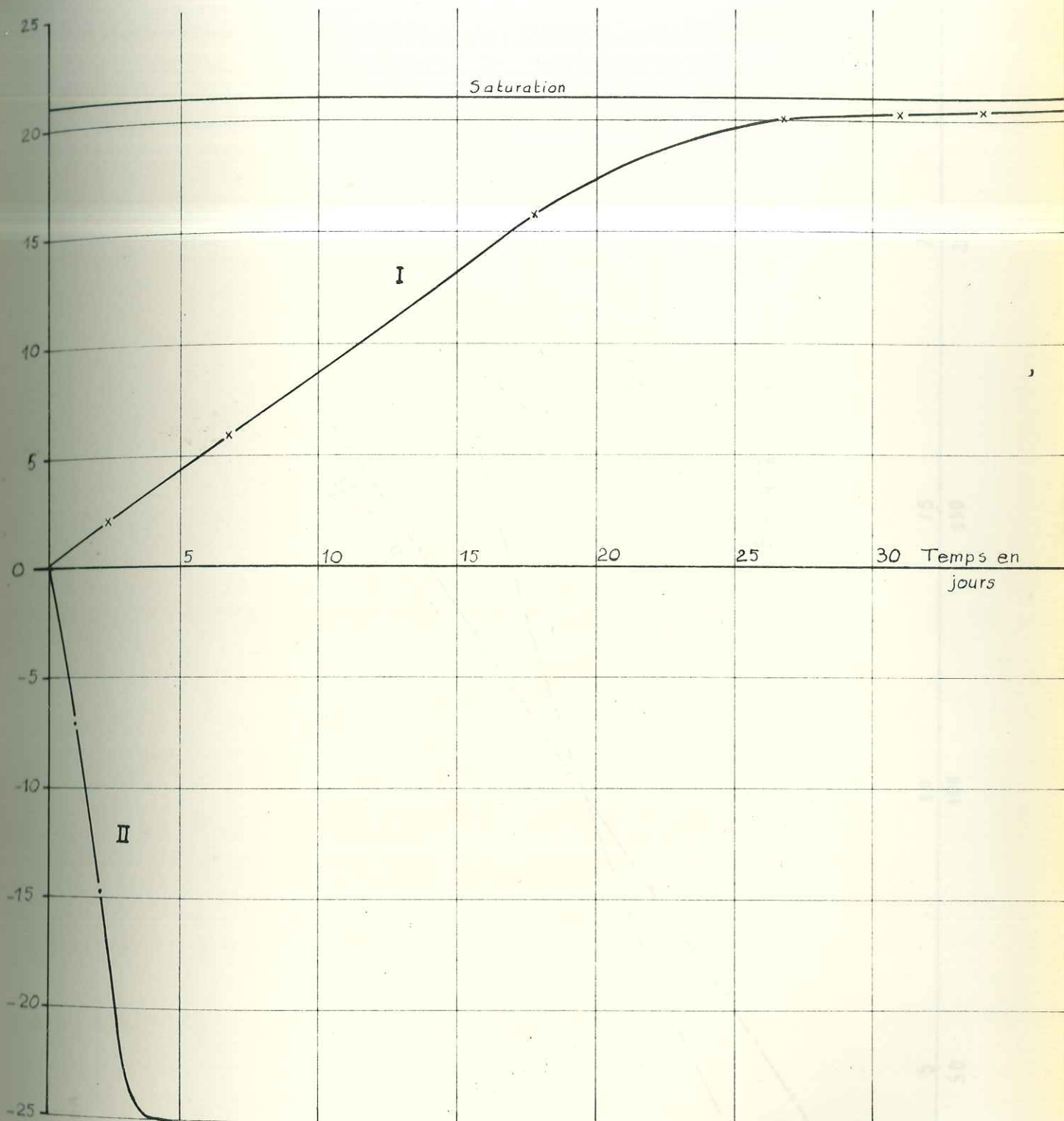
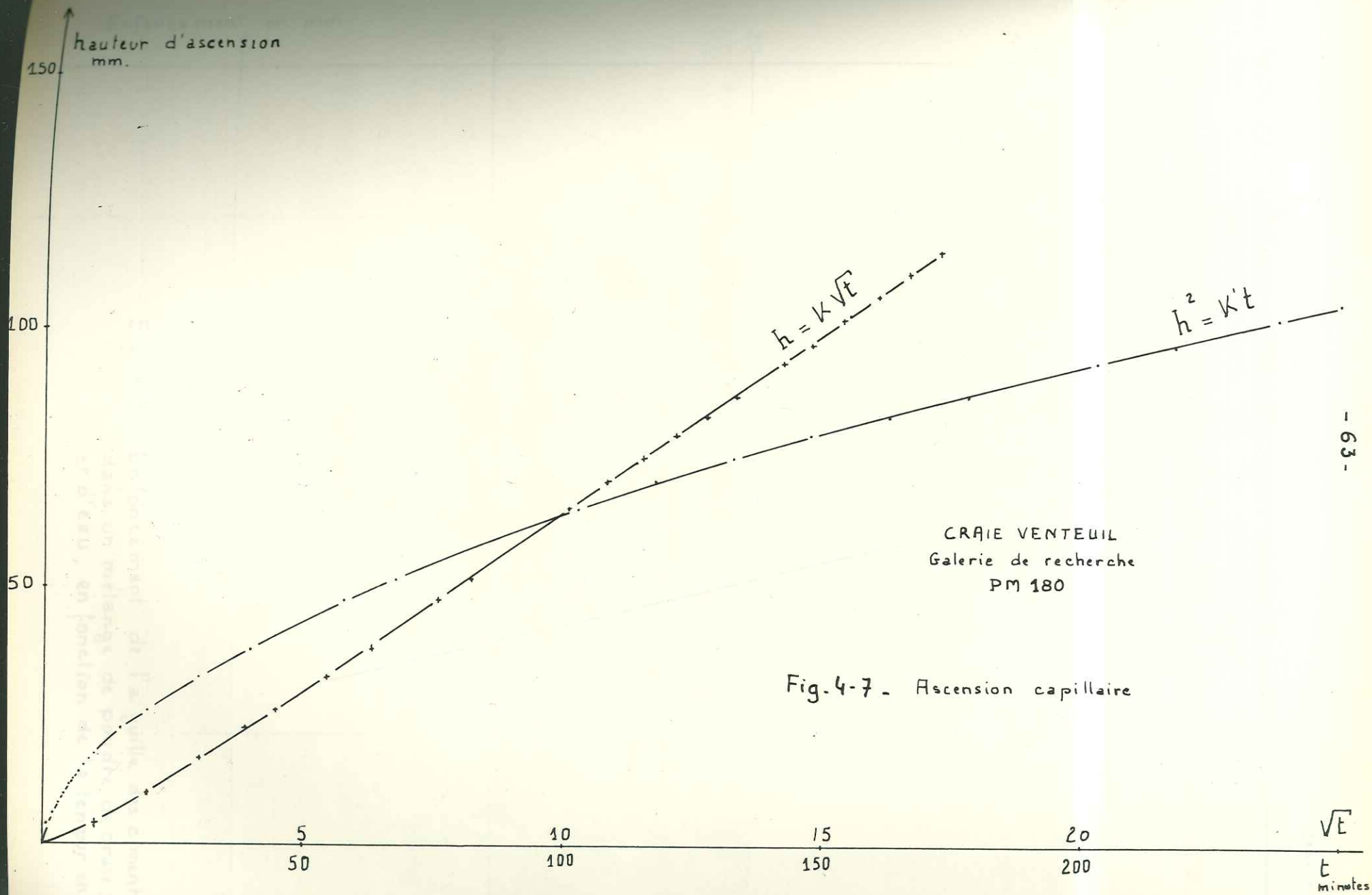
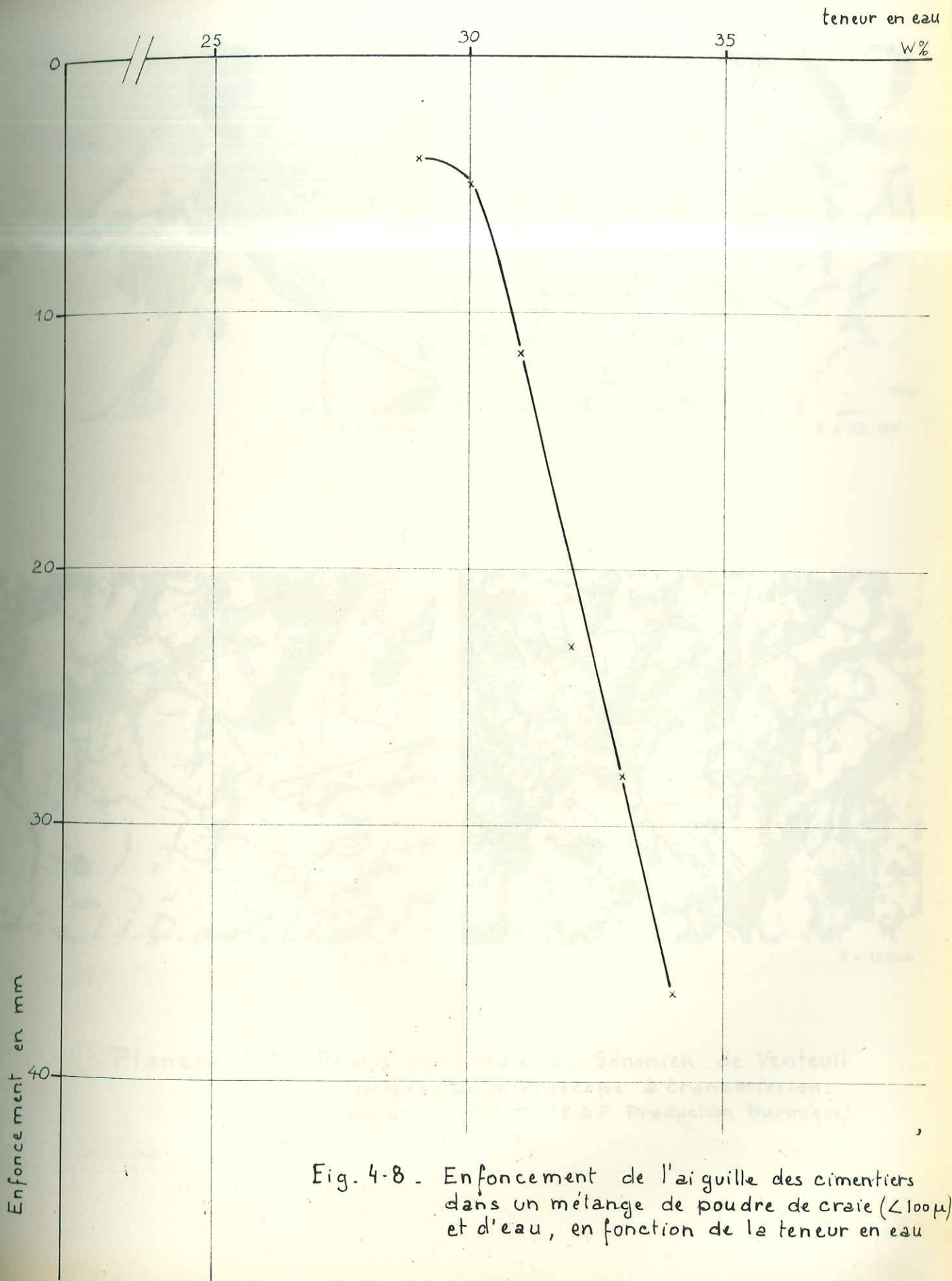


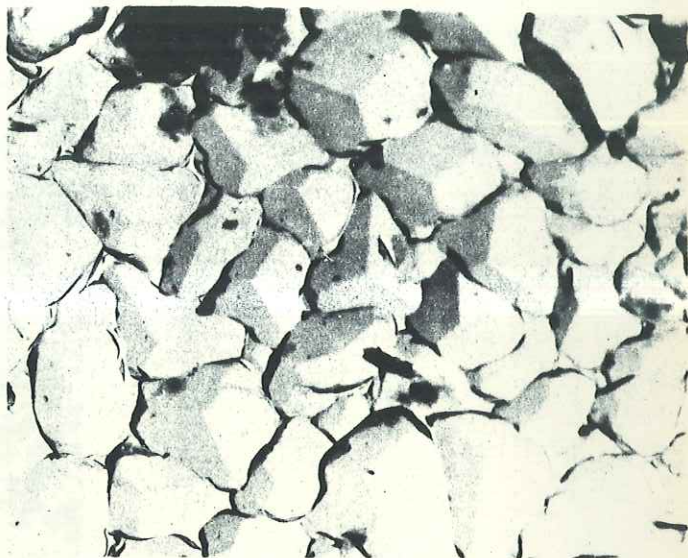
Fig. 4-6 - Courbe I : saturation en salle à humidité 100% - $\theta = 20^\circ$
 Courbe II : deshydratation en salle à humidité 60-80%







1 x 22.500



2 x 12.000

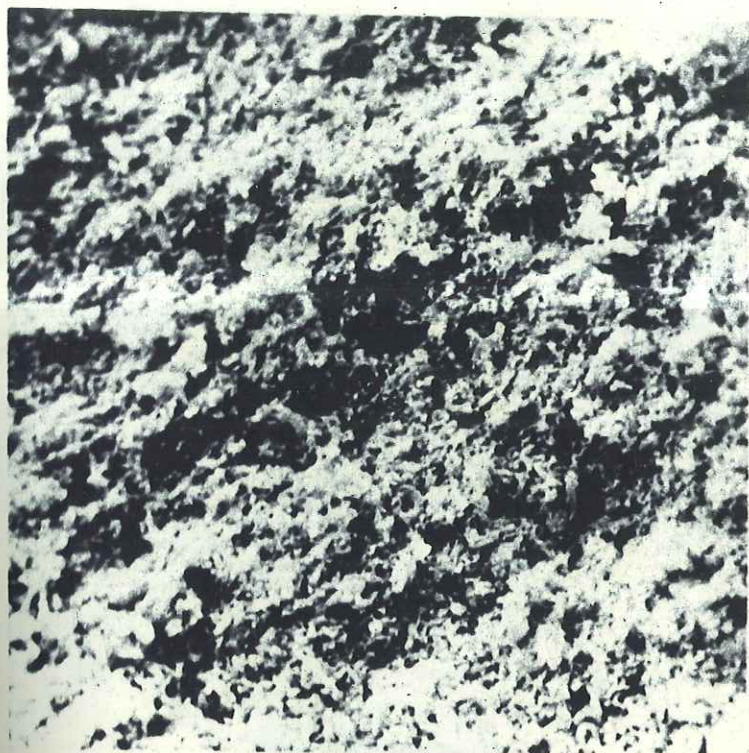


3 x 15.000



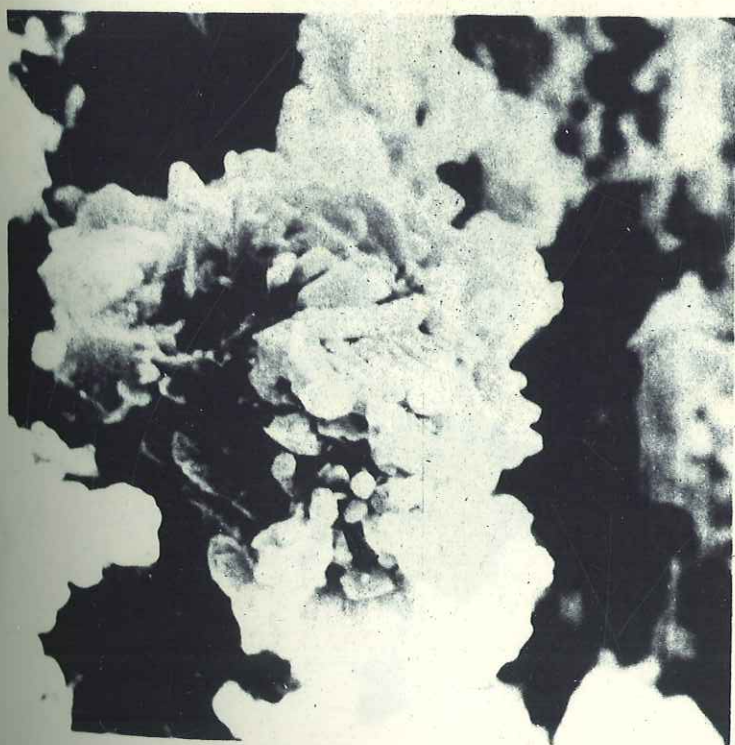
4 x 15.000

Planche 4-1. Photos de la craie du Sénonien de Venteuil
prises au microscope à transmission.
(Laboratoire P.C.M. EDF Production thermique)



Vue générale.

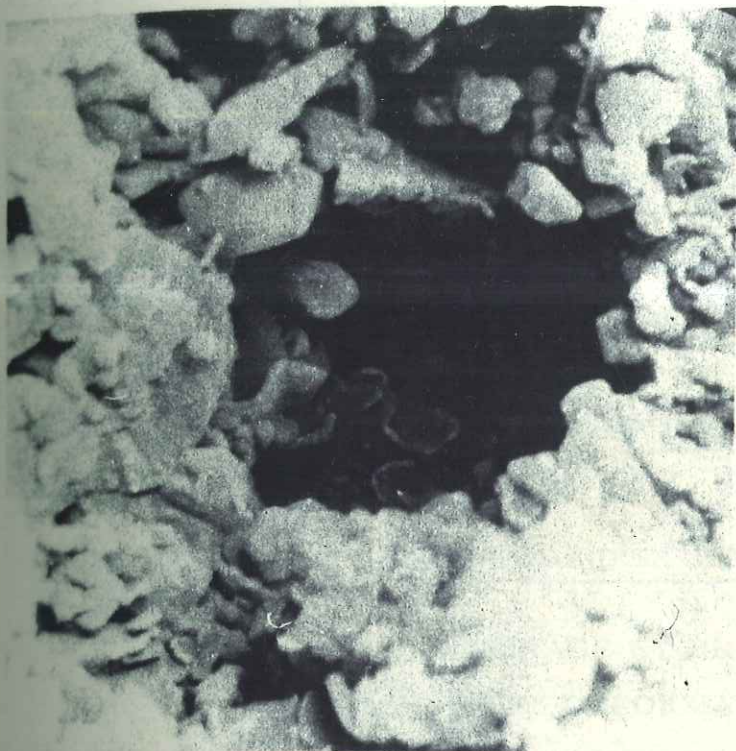
10 μ



Pl. 4-2 - La craie
au microscope électronique
à balayage.

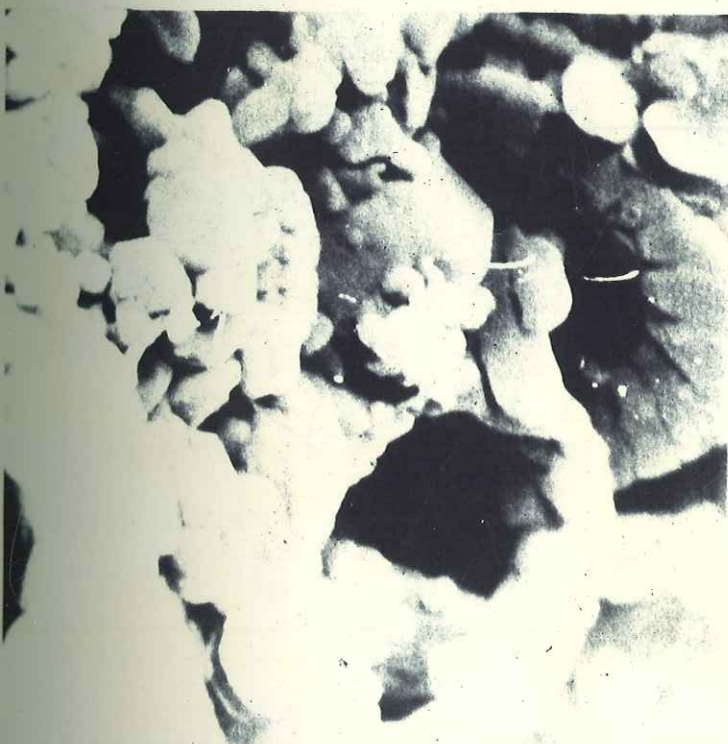
Vue d'un amas groupant
des fragments élémentaires
de coccolithes.

1 μ



1 μ

Vue d'un pore de grande dimension.



1 μ

Pl. 4-3. La craie
au microscope électronique
à balayage.

La forme des coccolithes entiers
favorise la porosité.

CHAPITRE 5

APPAREILLAGE ET METHODE D'ETUDE DU COMPORTEMENT MECANIQUE

- 5.1. ECHANTILLONNAGE ET PREPARATION DES EPROUVETTES
- 5.2. LA MESURE DES DEFORMATIONS ET L'ENREGISTREMENT
- 5.3. LA MESURE DES EFFORTS ET DES PRESSIONS
- 5.4. LES APPAREILS D'ESSAIS MECANIQUES
- 5.5. LES METHODES D'ESSAIS MECANIQUES

5.1. ECHANTILLONNAGE ET PREPARATION DES EPROUVETTES

L'échantillonnage a fait l'objet de trois prélèvements principaux dans la galerie de reconnaissance. Ceux-ci furent effectués dans des niches latérales aux PM 180, PM 300 et PM 480 (fig. : voir préambule). L'explosif fut proscrit afin de ne pas perturber et fissurer les blocs de craie ou les parois du massif qui devaient servir aux essais en place. L'abattage se fit au marteau-piqueur, ce qu'autorisait la très faible dureté de la craie. Malheureusement les blocs extraits ne furent pas orientés. Ils furent ensuite acheminés au laboratoire enveloppés de matière plastique et conservés dans une salle à température constante (20°C) et à saturation d'humidité.

En plus de ces blocs nous avons disposé de carottes extraites de différents sondages. Trois de ces sondages furent extérieurs, V 118 et V 119 sur l'axe du futur canal de fuite et V 22 bis au droit de l'usine et qui a donc atteint une profondeur de 200 m (voir préambule). Enfin 6 sondages portant les numéros 1, 2, 3, 4, 4 bis et 5 furent effectués suivant 3 directions rectangulaires dans les niches latérales aux PM 272 et PM 485 (fig. : voir préambule). Ces derniers sondages ainsi que les sondages V 118 et V 119 devaient servir à des essais au dilatomètre Mederatec (chap. 7). Toutes les carottes extraites de ces sondages furent conservées dans des boîtes cylindriques en plastique fermées à la paraffine.

La préparation des éprouvettes de roches est une opération délicate qui nécessite des soins particuliers car de sa qualité dépendra la valeur des résultats obtenus au cours des essais. A cet effet le Centre d'Essais d'Albertville dispose d'un outillage complet. Un pont roulant de 5 tonnes permet de déplacer les gros blocs et de les disposer sur le plateau mobile d'une scie Perrot et Aubertin équipée de disques Diamant-Boart de 1 500 ou 1 200 mm de diamètre, diamantés pour les roches dures ou au tungstène pour les roches tendres (fig. 5-1).

Une scie Diamant-Boart, de plus petite dimension, équipée de disques diamantés de 450 mm de diamètre, permet de découper les petits blocs ou de tailler les éprouvettes à la dimension requise (fig. 5-2). Les blocs, ainsi réduits à l'état de parallélépipèdes, sont débités en cylindres au moyen d'une foreuse universelle Matheys Optiver II/B. 400 montée sur bâti lourd et équipée d'une gamme de carottiers Diamant-Boart à couronne diamantée de tout diamètre désiré (jusqu'à 200 mm) (fig. 5-3).

Les diamètres que nous avons utilisés sont les suivants : 18 mm, 38 mm et 100 mm. Comme nous le verrons plus loin, nous avons donné à nos éprouvettes cylindriques un élanement 2, suivant en cela l'usage maintenant universellement adopté et en cours de normalisation.

Un premier surfaçage des têtes d'éprouvettes est exécuté à l'aide d'un lapidaire Perrot-Aubertin muni d'un chariot mobile transversalement. Ce surfaçage était souvent suffisant pour la craie qui n'accepte pas un bon poli.

Toutefois il était possible, pour obtenir une surface parfaite, d'utiliser une rectifieuse Cha. et Sady qui permet de rectifier une surface au 1/100 de mm. Le chariotage et l'avance se règlent automatiquement par passe de 1, 2 ou 3/100 de mm.

Sauf cas exceptionnel et signalé dans le texte, les éprouvettes seront toutes cylindriques et auront un élanement 2.

5.2. LA MESURE DES DEFORMATIONS ET L'ENREGISTREMENT

La mesure des déformations est une technique qui fait partie de l'extensométrie. Toutes les mesures que nous avons faites pour cette étude sont des mesures de déformation absolue, c'est-à-dire que nous avons mesuré le déplacement d'un point par rapport à un autre ce qui donne l'intégrale de la déformation sur la base de mesure. Mais les résultats seront toujours donnés sous forme de déformations relatives exprimées par un nombre sans dimension (moyenne de l'intégrale).

Signalons tout de suite que la multiplicité des appareils utilisés tient d'une part au fait que l'extensométrie est actuellement en pleine évolution ce qui nous a permis d'utiliser des appareils de plus en plus perfectionnés et d'autre part au fait qu'aucun appareil ne couvre toute la gamme des déformations rencontrées qui vont de 10^{-5} à $5 \cdot 10^{-1}$.

Nous distinguerons les mesures de déformation longitudinale effectuées parallèlement à l'axe de l'éprouvette et les mesures de déformation transversale effectuées perpendiculairement à cet axe.

5.2.1. Les déformations longitudinales

Une mesure de déformation longitudinale peut être globale ou locale. Dans le premier cas la méthode consiste à mesurer simplement la variation de distance entre les deux têtes de l'éprouvette. Pour les mesures globales nous avons utilisé :

- des comparateurs mécaniques Roch au 1/100 de mm
- des capteurs de déplacements C I M A T R A N C. A. D. I.

fonctionnant suivant le principe du transformateur différentiel. On mesure les variations d'induction provoquées par le déplacement dans deux bobinages (primaire et secondaire) d'un noyau magnétique solidaire d'une tige qui vient palper le point de mesure. Suivant les modèles les courses varient de 1 mm à 25 mm de part et d'autre du zéro. La résolution de ces appareils est infinie et leur sensibilité est seulement limitée par le système de mesure et le système d'enregistrement associé. Par exemple on peut mesurer des déplacements inférieurs au micron.

Les mesures locales consistent à mesurer le déplacement relatif de deux points matérialisés à la paroi de l'éprouvette, ce qui revient à fixer le dispositif de mesure sur l'éprouvette. La dimension des appareils utilisés exigeait une base de mesure importante, que nous avons fixée à 100 mm pour des éprouvettes de 200 mm de longueur et de 100 mm de diamètre. Les figures 5-4a et b montrent un tel dispositif en place sur une éprouvette. Nous avons utilisé pour ces mesures deux types de capteurs de déplacements :

- Capteurs à résistance S. F. I. M. de 200 microns et 500 microns d'étendue de mesure. Le palpeur du capteur est solidaire d'une tige qui se déplace sur une résistance comportant 200 spires. Une variation de déplacement provoque donc une variation de résistance. Les capteurs 200 microns ont une sensibilité de 1 micron et les capteurs 500 microns une sensibilité de 2,5 microns. L'inconvénient de ces capteurs est de fournir une mesure discontinue (il n'y a pas de mesure entre 2 spires).

- Capteurs à variation de mutuelle induction A. C. B. M 502 de ± 100 microns d'étendue de mesure et basés sur le même principe que les capteurs C. A. D. I. C I M A T R A N. Comme pour ces derniers la sensibilité ne dépend que du système de mesure.

Le tableau 5-1 résume les caractéristiques des capteurs de déplacement que nous avons utilisés.

**TABLEAU 5.1. CARACTERISTIQUES DES CAPTEURS DE DEPLACEMENT
UTILISES**

	Etendue de mesure en mm	Sensibilité	Mode de mesure
Montre-comparateur Roch	10	$2 \cdot 10^{-2}$ mm	mécanique
Capteurs Cimatran C.A.D.I. 10 C.A.D.I. 30 C.A.D.I. 250	± 1 ± 3 ± 25	dépend du système de mesure	électrique — variation d'induction
Capteurs S.F.I.M. M 4000 M 4010	0,2 0,5	par 10^{-2} mm 20 Ω 40 Ω	électrique variation de résistance
Capteurs A.C.B. M 501 M 502	$\pm 0,025$ $\pm 0,1$	dépend du système de mesure	électrique variation d'induction

5.2.2. Les déformations transversales

Généralement beaucoup plus faibles que les déformations longitudinales (3 à 5 fois dans un essai de compression simple) les déformations transversales sont plus délicates à mesurer et nécessitent un appareillage très sensible.

Nous avons d'abord utilisé des colliers en acier ressort, fendus et ajustés au diamètre de l'éprouvette. Ces colliers, ainsi solidaires de l'éprouvette, étaient munis près de leur ouverture de deux aiguilles de 300 mm (longueur) chargées d'amplifier l'écartement du ressort au cours de la déformation de l'éprouvette. (fig. 5-5). L'amplification étant de 7 et le déplacement des extrémités des aiguilles étant visé avec des lunettes micrométriques au 1/20 de mm, la sensibilité de la mesure était de 2 micron.

sur la déformation diamétrale. Ce procédé, dû à LE CHATELIER pour la mesure du gonflement des ciments et adapté aux roches par MORLIER (1964), avait l'avantage d'intégrer la déformation sur le périmètre de l'échantillon et de donner ainsi une déformation globale.

Toutefois ce dispositif s'est avéré très peu commode à l'emploi. Aussi nous avons conçu, peut être un peu tardivement pour en faire un usage général, un extensomètre original dans sa forme et dans son fonctionnement, si ce n'est dans son principe (fig. 5-6). Il s'agit d'un anneau en invar comportant une ouverture et, diamétralement opposé, un évidement cylindrique donnant du ressort à l'ensemble. De part et d'autre de l'ouverture sont soudées deux pièces permettant de fixer, l'une un capteur A. C. B., l'autre une vis de réglage moletée, que vient palper le capteur.

Suivant un diamètre perpendiculaire deux vis moletées présentant un pointeau permettent de fixer le dispositif sur l'éprouvette. Il est nécessaire de coller préalablement sur l'éprouvette à l'endroit où viendront les pointeaux deux pastilles en acier dur pour permettre le blocage et le réglage de la tension du ressort.

Un petit bloc de caoutchouc mousse intercalé entre l'anneau et l'éprouvette empêche l'extensomètre de pivoter autour de l'axe de fixation.

La déformation mesurée est celle du diamètre de l'éprouvette matérialisé par les vis de fixation. Les deux bras de l'anneau pivotant autour du point de rotation, l'amplification au niveau du capteur, de la déformation du diamètre est de 2,5. Avec un capteur à variation de mutuelle induction A. C. B. M 501 de 25 microns et un réglage adéquat de l'appareil enregistreur, la sensibilité du dispositif est inférieure à 0,1 micron.

La fig. 5-7 montre l'extensomètre en place sur une éprouvette.

On comprendra que l'utilisation de ce dispositif nécessite de grandes précautions d'emploi afin d'éviter de mesurer des phénomènes parasites (éviter les variations de température, les vibrations, voire les courants d'air).

5.2.3. L'enregistrement et la mesure

Les techniques d'enregistrement sont trop universelles pour que nous les décrivions dans le détail. Aussi nous signalerons seulement les appareils que nous avons utilisés.

Pour la mesure des variations de résistance des capteurs S.F.I.M., nous avons employé les enregistreurs graphiques bien connus de la Pyrométrie Industrielle. Deux modèles ont permis l'enregistrement continu des essais de fluage (chap. 6, paragraphe 6), l'un d'une capacité de 1 000 Ω , comportant 18 pistes, l'autre d'une capacité de 300 Ω et comportant 12 pistes.

Pour les capteurs A.C.B., les variations de la différence des tensions secondaires provoquées par les variations de mutuelle induction primaire-secondaire sont enregistrées graphiquement sur un enregistreur potentiométrique C I M A T I C type C I M A P O T à deux voies, par l'intermédiaire d'un démodulateur A.C.B. D 0502 (auxiliaire pour 6 capteurs).

Les capteurs C I M A T R A N C.A.D.I. utilisent le même enregistreur mais ont l'avantage de ne pas nécessiter de démodulateur (mais alimentation stabilisée 8-10 V continu).

5.3. LA MESURE DES EFFORTS ET DES PRESSIONS

Ces mesures ne posent généralement pas de problème particulier. Tous les appareils d'essais mécaniques sont munis soit d'un dynamomètre soit d'un manomètre à cadran.

Dans le premier cas on ramène la force à une pression en la divisant par la section de l'éprouvette, dans le deuxième cas on lit directement la pression sur le manomètre.

Mais ces mesures ont le gros inconvénient d'être discontinues, de permettre une erreur de lecture quand la pression varie rapidement et de nécessiter un repérage sur l'enregistrement des déformations.

C'est pourquoi nous avons utilisé, mais pour trop peu d'essais malheureusement, des manomètres à variation de mutuelle induction A.C.B. H 52. A l'aide d'un enregistreur X Y C I M A T I C 2025 nous avons pu obtenir directement la courbe pression-déformation.

5.4. LES APPAREILS D'ESSAIS MECANIQUES

5.4.1. Les presses

Toutes les presses utilisées sont hydrauliques, donc à vitesse de mise en charge réglable et constante mais non à vitesse de déplacement constante. La mesure des efforts se fait à l'aide d'un dynamomètre pendulaire permettant de choisir différentes sensibilités. Nous avons disposé

d'une presse universelle Mohr et Federhaff, type ZPD 20 possédant 5 sensibilités, 1 T, 2 T, 5 T, 10 T et 20 T et d'une presse de 50 T. Ces deux presses sont commandées par un pupitre de commande manuelle ou automatique, muni d'un cadencomètre permettant de faire des essais de fatigue (fig. 5-8).

5.4.2. Les presses de fluage

Nous avons utilisé les presses hydrauliques de 10 T mises au point au C.E.B.T.P.* (fig. 5-9). La pression est réglable manuellement, par enfoncement d'un piston horizontal dans un cylindre plein d'huile. L'huile transmet la pression à l'éprouvette par l'intermédiaire d'une membrane en caoutchouc appuyant sur un piston. La valeur de la pression sur la membrane est fournie par un manomètre à cadran.

5.4.3. La cellule triaxiale

L'inexistence dans le commerce d'un appareil simple et bon marché nous a amenés à étudier nous-mêmes une cellule adaptée à nos besoins, et à la faire exécuter par "la Savoisienne des Vérins hydrauliques" à Albertville (Savoie). De conception classique cette cellule est du type à piston axial et à pression latérale d'huile (fig. 5-10). Construite pour des éprouvettes de 38 mm de diamètre et de 76 mm de hauteur, elle comprend une colonne d'essai avec un support d'éprouvette amovible (4) et un piston (5). Ces deux pièces sont percées axialement de façon à permettre le passage d'un fluide. Dans le cas d'un essai avec fluide interstitiel, celui-ci est réparti sur les têtes d'éprouvette à l'aide de deux pastilles métalliques tenant lieu de pierre poreuse (6).

La cellule est composée de deux cylindres (1 et 2) s'emboîtant l'un dans l'autre et maintenus par un large écrou de serrage (3). Elle comporte dans sa partie inférieure une arrivée d'huile (9) et une arrivée de fluide interstitiel (10), et dans sa partie supérieure un bouchon de purge (12).

Entièrement en acier au nickel-chrome, cette cellule autorise une pression d'huile de 600 bars et le piston peut subir un effort de compression de 35 T ce qui représente une pression d'environ 3 000 bars sur l'éprouvette.

Un deuxième modèle du même type, mais différant par ses dimensions, a été construit pour permettre une pression d'huile de 1 000 bars et une pression axiale de 5 000 bars. Ces appareils, très simples, se sont montrés robustes et d'emploi très commode. Il est possible d'effectuer une dizaine de manipulations dans la journée.

* Centre Expérimental du Bâtiment et des Travaux Publics.

Une seule pièce, le joint torique n° 13, subit une usure et doit être changé d'autant plus fréquemment que les déplacements du piston sont plus importants.

5.4.4. L'appareil de cisaillement double

L'idée de cet appareil a été empruntée à LUNDBORG (1966). Il s'agit d'une boîte dans laquelle peut s'enfoncer librement un piston de section carrée (fig. 5-11). La boîte et le piston comportent un évidement cylindrique permettant de glisser une éprouvette de 38 mm de diamètre et d'élancement 4. La clavette enlevée, le piston peut s'enfoncer dans la boîte en cisillant l'éprouvette. Une presse spéciale, conçue par le Département géotechnique de l'E.D.F., permet, au moyen de deux vérins hydrauliques, d'appliquer un effort normal sur les têtes d'éprouvette et un effort de cisaillement sur le piston de la boîte de cisaillement (fig. 5-12).

5.4.5. La machine de cisaillement (fig. 5-13)

Cette machine, mise au point et construite par la S.E.I.L., fonctionne sur le principe de la boîte de Casagrande bien connue en Mécanique des sols. Elle permet d'effectuer des essais de cisaillement sur des surfaces rectangulaires de $15 \times 20 \text{ cm}^2$. L'effort normal est appliqué par un étrier vertical articulé, solidaire d'un vérin de 50 T. L'effort de cisaillement est assuré, dans un plan horizontal, par un vérin de 100 T alimenté par une pompe haute pression à débit réglable.

Le déplacement de cisaillement s'effectue à vitesse constante. Les pressions normale et de cisaillement sont lues sur des manomètres à cadran mais peuvent faire l'objet d'un enregistrement continu grâce à l'utilisation de capteurs de pression.

5.5. LES METHODES D'ESSAIS MECANIQUES

5.5.1. L'essai de compression uniaxiale

Par sa banalité cet essai ne mériterait guère de description particulière. Il consiste à soumettre une éprouvette à un champ de contraintes uniaxiales entre les deux plateaux d'une presse, et à étudier soit sa résistance R_c soit sa déformabilité. Toutefois, malgré son apparente simplicité, cet essai subit l'influence de nombreux paramètres qui peuvent modifier considérablement le résultat.

Le premier de ces paramètres est l'élancement de l'éprouvette.

* Société d'Etudes Industrielles et de Laboratoire.

De nombreux auteurs ont déjà étudié l'effet de l'élancement sur la résistance des roches et ont trouvé qu'il fallait que celui-ci soit voisin de 2 pour que les plans de rupture se développent librement. La craie justifie ce résultat et l'on peut voir sur la figure 5-14 le développement de ces plans. Seul l'élancement 2 à l'extrême gauche a permis au plan de rupture de se développer continûment d'une extrémité à l'autre de l'éprouvette.

L'effet sur les résistances (fig. 5-15) est également sensible. Celles-ci décroissent à mesure que l'élancement augmente, montrant ainsi que pour l'élancement 2 l'obstacle au libre développement des plans de rupture est minimum. Tous nos essais ont été faits avec un tel élancement.

Le frettage des têtes d'éprouvette causé par des frottements tangentiels au niveau du contact plateau-éprouvette sont habituellement une source de discussion pour savoir s'il faut ou non interposer un matériau dans le but d'une part de limiter ces frottements parasites et d'autre part d'assurer une meilleure répartition des contraintes dans l'éprouvette. Pour limiter les frottements certains auteurs conseillent l'utilisation de graisse graphitée ou non tandis que d'autres craignent l'effet inverse, c'est-à-dire un anti-frettage causé par l'extrusion de la graisse pendant la compression. L'idéal est évidemment d'interposer un matériau dont le rapport des constantes élastiques E et ν soit identique à celui de l'éprouvette. Mais cela revient à allonger l'éprouvette elle-même ! Aussi l'élancement 2 nous paraît résoudre le problème de lui-même. D'ailleurs MORLIER (1964) a montré par une étude photo-élastique que l'élancement 2 autorisait un champ de contraintes homogène dans l'éprouvette à une distance de ses extrémités égale à 1 rayon. C'est pourquoi nous avons choisi de laisser un contact direct plateau-éprouvette en soignant les surfaces et de mesurer les déformations longitudinales sur une base de 100 mm centrée sur le milieu de l'éprouvette (fig. 5-16).

Certains essais cependant, surtout les essais de rupture, ont fait l'objet d'une mesure de déformation globale par comparateurs. La vitesse de mise en charge est aussi un facteur important. La forme de la courbe contrainte-déformation dépend évidemment de cette vitesse mais HOUPERT (1966) a montré également que la résistance des roches grenues augmentait avec cette vitesse, en faisant varier cette dernière de 10 à 10 000 bars/mn. Dans une gamme de vitesse comprise entre 30 et 3 000 bars/mn nous n'avons pas décelé pour la craie de variation significative de la résistance. Notre but n'était pas d'étudier l'influence de la vitesse de charge mais plutôt de savoir si des variations accidentelles de celle-ci pouvaient modifier le résultat.

Tous nos essais ont été effectués à une vitesse voisine de 30 bars/mn

Cette vitesse n'est justifiée que par des impératifs technologiques. Il fallait en effet que les essais ne soient pas trop longs tout en permettant une lecture et une mesure précises et en laissant un temps suffisant pour l'observation. Plus l'essai est rapide, plus les phénomènes dynamiques sont importants, moins les champs de contraintes et de déformations sont homogènes ce qui nuit à l'étude des lois de comportement.

5.5.2. Les essais de traction

L'essai de traction a une signification physique beaucoup plus nette que l'essai de compression. Mais s'il n'y a qu'une méthode pour l'essai de compression, la multiplicité des essais de traction effraye toujours un peu. On peut en effet obtenir des contraintes de traction en tirant directement sur les extrémités d'une éprouvette, c'est l'essai de traction directe, mais on peut également induire de telles contraintes en donnant une forme appropriée à l'éprouvette et en la soumettant ensuite à une compression, ce sont les essais de traction indirecte. Les essais de flexion sont également des essais de traction indirecte.

Nous devons reconnaître que nous n'avons pu mettre au point une méthode correcte. En effet le seul essai donnant une valeur de la résistance dont on soit sûr qu'elle représente la résistance à la traction est l'essai de traction directe. Mais il a deux exigences :

- l'attache de l'éprouvette à la machine de traction doit être parfaite, tant du point de vue captage que résistance des attaches et de la colle ;
- la forme de l'éprouvette doit permettre la création d'un champ de traction homogène et uniforme et si possible une rupture au milieu de l'éprouvette. La forme en diabolo avec partie centrale cylindrique répond à cette exigence.

Aussi, faute d'avoir réussi cet essai parfait nous donnerons divers résultats obtenus soit par flexion soit par écrasement de cylindres suivant une génératrice (essai brésilien). Mais désireux d'obtenir des résultats plus probants nous avons fait faire quelques essais de traction centrifuge au Centre d'Essais scientifiques et techniques de Grenoble. Cet essai mis au point par le professeur BERTHIER consiste à placer dans une centrifugeuse une éprouvette (pour nous, des cylindres $\varnothing 38$ mm, H 140 mm) soumise à une rotation de plus en plus rapide. La vitesse de rotation au moment de la rupture permet au moyen d'un nomogramme de calculer la résistance à la traction, à condition de connaître la densité du matériau.

5.5.3. L'essai de compression triaxiale

Nous avons utilisé pour cet essai la cellule décrite en 5.4.3. L'essai est du type axi-symétrique c'est-à-dire qu'il permet d'appliquer une contrainte principale maximale σ_1 au moyen d'une presse, tandis que les contraintes principales intermédiaire σ_2 et minimale σ_3 , sont égales à la pression d'huile de la cellule.

Dans la suite nous désignerons par pression axiale la pression obtenue par la presse et le piston et par pression latérale la pression transmise par l'huile de la cellule. Cette dernière pression est obtenue au moyen d'une pompe manuelle et lue sur un manomètre.

Montage de la cellule : (figures 5-17 a, b, c, d)

L'éprouvette, placée entre le support et le piston, est isolée de l'huile par une gaine en caoutchouc (chambre à air de bicyclette). La colonne, ainsi prête, est placée dans la moitié inférieure de la cellule. Le pot supérieur est enfilé sur le piston et adapté au pot inférieur, puis l'écrou de serrage vient maintenir le tout.

Le remplissage d'huile s'effectue avec la pompe à main, le bouchon de purge enlevé. Le remplissage terminé, le bouchon de purge en place, la cellule, prête pour l'essai, est installée entre les plateaux d'une presse.

L'erreur classique consiste maintenant à monter simultanément la pression axiale et la pression latérale jusqu'à la valeur désirée de la pression latérale. Pendant cette première phase l'éprouvette est soumise à un champ de contraintes isotrope ou hydrostatique. Ensuite, la pression latérale est maintenue constante et la pression axiale est augmentée jusqu'à la rupture ou la déformation désirée. Pendant cette deuxième phase l'éprouvette est soumise à un champ de contraintes déviatoire.

Par un abus de langage conventionnel on désignera par déviateur D la simple différence entre la contrainte axiale σ_1 et la contrainte latérale σ_3 . (Le tenseur déviateur $\|D\|$ est en réalité la différence entre le tenseur $\|\sigma\|$ de valeurs principales $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ et le tenseur isotrope de valeurs principales égales à :

$$\frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}.$$

Le dispositif nécessaire pour effectuer des essais avec eau

interstitielle est schématisé sur la figure 5-18. Le mode opératoire consiste d'abord à saturer d'eau le circuit et l'éprouvette. L'eau est appliquée avec une pression de quelques bars à la base de l'éprouvette tandis que le vide est fait à l'extrémité opposée. On sature ainsi progressivement l'échantillon et le circuit. Ensuite l'essai peut être drainé ou non. Dans le premier cas on laisse simplement l'eau s'écouler par le circuit de drainage. Dans ce cas de l'essai non drainé on mesure la pression de l'eau dans l'échantillon ou pression interstitielle μ en vérifiant l'équilibre de la pression aux extrémités inférieure et supérieure de l'éprouvette à l'aide de deux manomètres à cadran.

La mesure des déformations longitudinales est globale. On mesure simplement à l'aide d'un comparateur mécanique ou d'un capteur C. A. D. I. le rapprochement des plateaux de la presse. La déformation transversale n'est pas mesurée en cours d'essai. Afin d'obtenir quelques valeurs on la mesure en fin d'essai avec un pied à coulisse au 1/100 mm, et c'est aussi au pied à coulisse que l'on vérifie la déformation longitudinale permanente.

5.5.4. Les essais de cisaillement

Le principe de l'essai de double cisaillement type Lundborg est d'induire sur les flancs de l'éprouvette une contrainte latérale σ_3 en appliquant une contrainte axiale σ_1 (fig. 5-19) et de cisailier ensuite l'éprouvette soumise ainsi à un champ de contraintes triaxial, mais on ignore bien sûr la valeur de la contrainte latérale σ_3 ; celle-ci ne dépend en principe que de la contrainte axiale σ_1 et du coefficient de Poisson ν du matériau.

Mais l'uniformité de cette contrainte dépend surtout de la qualité de l'ajustage de l'éprouvette à la paroi de la cellule. Cet ajustage est difficile à réaliser surtout avec un matériau tendre comme la craie. Aussi nous avons réalisé la plupart de nos essais en enveloppant l'éprouvette d'une gaine en plastique assurant ainsi une meilleure répartition des contraintes latérales tout en diminuant les frottements à la paroi. Cette enveloppe de plastique a naturellement une résistance négligeable au cisaillement.

Notons enfin que, dans le cas d'un matériau humide, cet essai est du type non drainé.

Le cisaillement à la machine S. E. I. L. ne justifie aucune remarque particulière. On utilise des prismes 15 x 20 x 25 cm que l'on présente dans la boîte de telle façon qu'ils soient cisailés suivant une surface 15 x 20 cm. Une fois l'effort normal appliqué, celui-ci est maintenu constant tandis que se développe l'effort de cisaillement. Il semble que cet appareil se prête mieux à l'étude de joints avec ou sans remplissage entre deux blocs rocheux qu'à l'étude du cisaillement de la matrice rocheuse.

La mesure du déplacement de la moitié supérieure de la boîte sur la moitié inférieure fixe est faite à l'aide d'un capteur C. A. D. I. 120.

5.5.5. Les essais de compression uniaxiale sous charge constante

Ces essais sont habituellement appelés essais de fluage. Ils consistent à étudier la déformation d'une éprouvette, maintenue sous une charge constante, en fonction du temps. Nous avons effectué deux catégories d'essais, les uns d'une durée de 3 heures dits de courte durée, les autres de un ou plusieurs mois dits de longue durée.

Pour tous les essais nous avons utilisé des éprouvettes $\varnothing$ 100 mm, H 200 mm, saturées ou sèches. Nous avons d'abord tenté de conserver l'humidité des éprouvettes saturées en les peignant avec une peinture blanche Astral spéciale pour les bétons. Malheureusement cette peinture s'est avérée très peu efficace, surtout pour les essais de longue durée, et nous avons alors enfermé les éprouvettes dans des sacs en plastique. Ce dernier procédé s'est révélé beaucoup plus efficace mais il fut impossible de conserver la saturation plus d'un an. Nous aurions dû laisser une certaine quantité d'eau entre le sac et l'éprouvette.

En plus de la conservation de l'humidité des échantillons les précautions à prendre pour les essais de fluage sont nombreuses. Il importe en effet de limiter autant que possible les causes extérieures susceptibles d'intervenir dans la déformation de l'éprouvette. En particulier la température et l'hygrométrie doivent être contrôlées le mieux possible. D'après CAILLEUX (1962) le coefficient de dilation linéaire d'un calcaire tendre est égal à $2,5 \cdot 10^{-6}/^{\circ}$ pour des températures comprises entre 20° et 100° C. C'est heureusement très faible devant les déformations obtenues sur la craie. En revanche le coefficient de l'acier est $12 \cdot 10^{-6}/^{\circ}$ et la dilatation des colonnes des presses peut jouer. Aussi nous avons préféré pour les essais de longue durée installer les presses de fluage dans un local à température réglée à $22^{\circ} \pm 1^{\circ}$ C.

L'hygrométrie n'a pu être maintenue constante. Elle a varié de

35 à 70 %, mais son influence est faible sur le gonflement des roches.

Quant aux vibrations parasites, MORLIER (1964) a montré leur influence minime. Nous avons toutefois installé les presses de fluage sur des semelles de latex.

Les essais de longues durées ont été effectués avec les presses de fluage C E B T P. Les déformations longitudinales étaient mesurées par capteurs à résistance S. F. I. M., 2 par éprouvettes (fig. 5-20). L'ensemble des capteurs était relié à un enregistreur potentiométrique P. I. A l'aide de deux enregistreurs nous avons pu mener 15 essais simultanément.

Les essais de courte durée ont été effectués sur la presse Mohr-Federhaff de 20 T, et les mesures de déformation longitudinales étaient faites par des capteurs à induction A. C. B. ; Quand cela a été possible nous avons également mesuré la déformation transversale avec l'extensomètre annulaire.

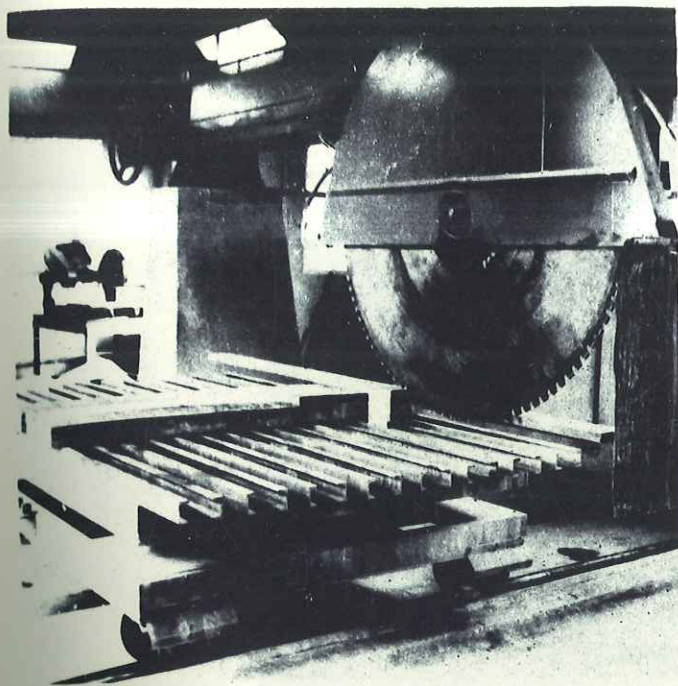


Fig. 5-1

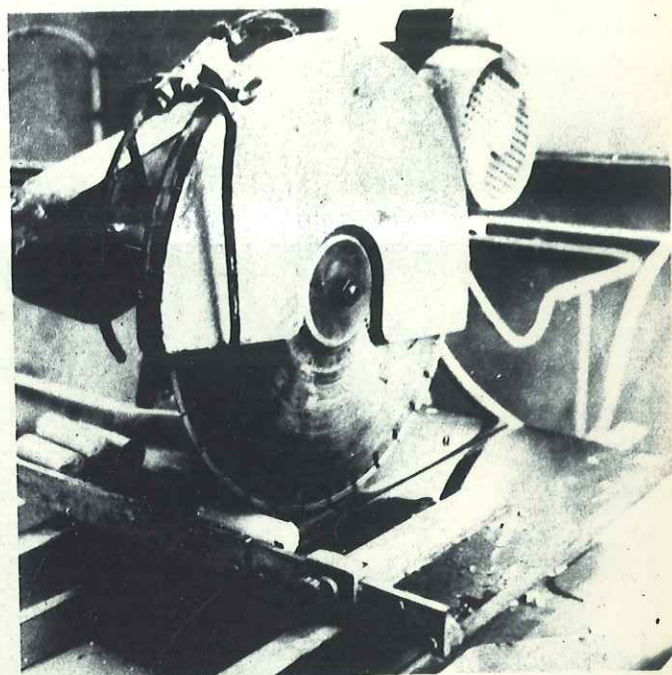


Fig. 5-2

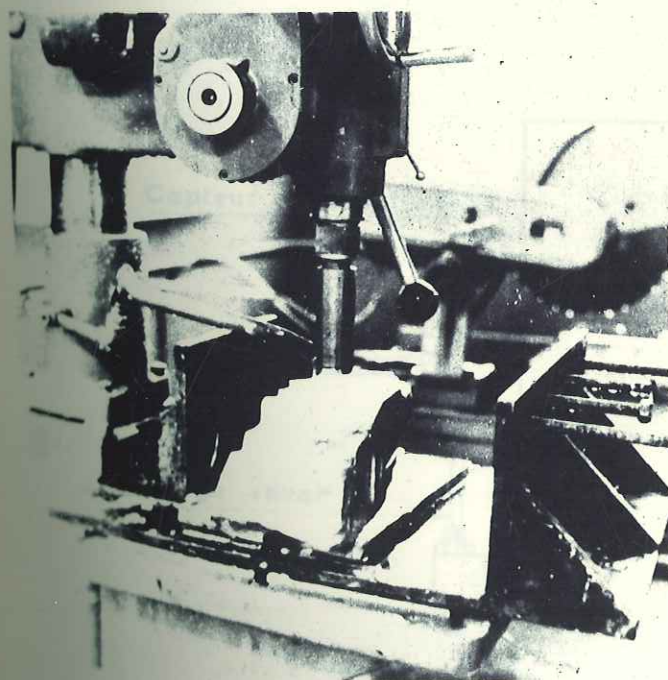


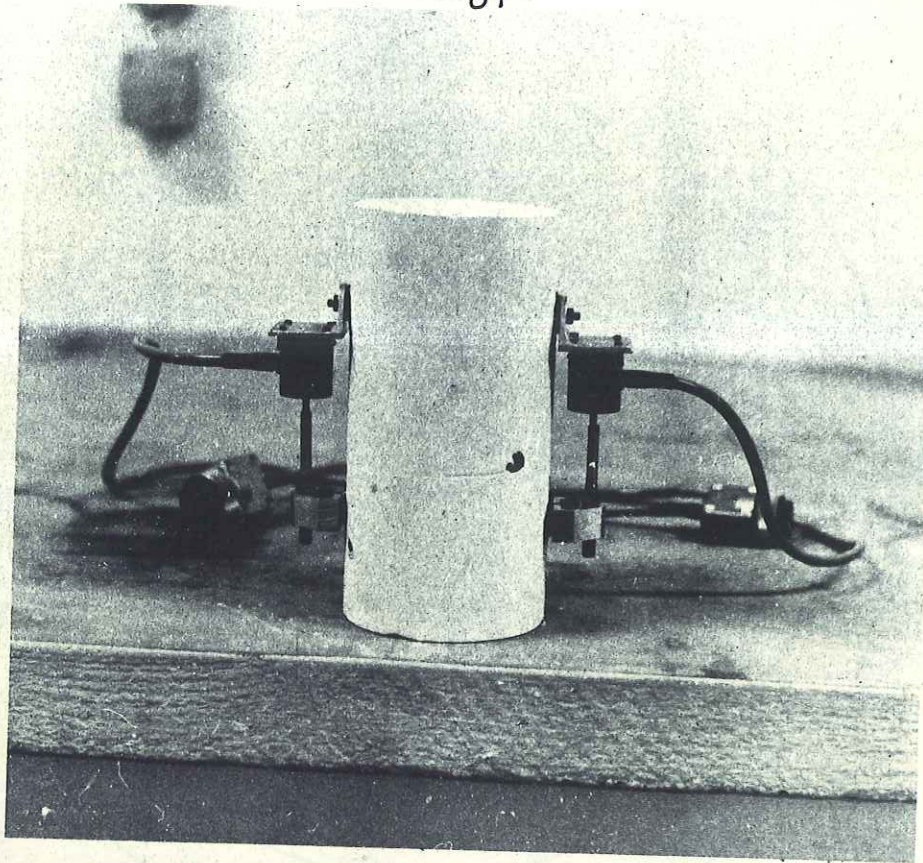
Fig. 5-3

Fig. 5-1 : Scie Perrot et Aubertin
 ϕ 1500 mm

Fig. 5-2 : Scie Diamant - Boart
 ϕ 450 mm

Fig. 5-3 : Foreuse universelle
 Matheys - Optiver
 ϕ 10 à 200 mm

b.



a.

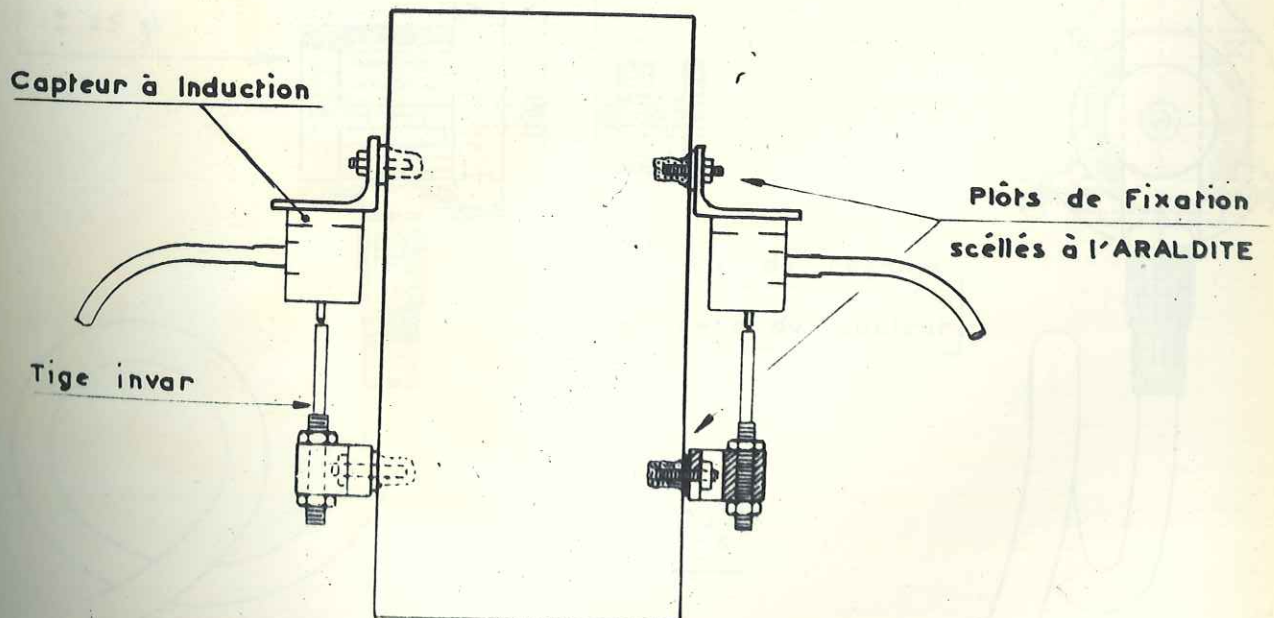


Fig.5.4 - Dispositif de Mesure des Déformations Longitudinales

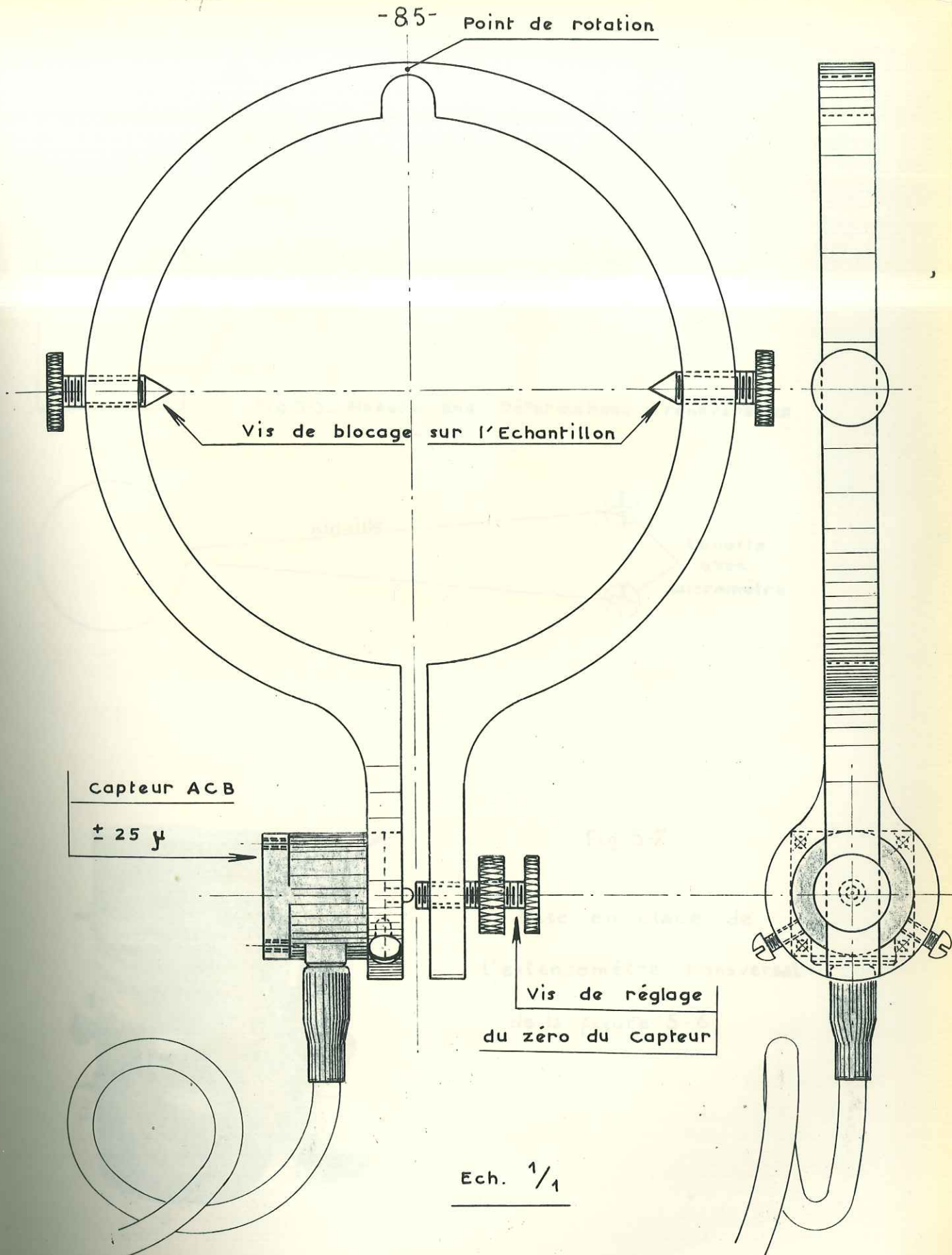


Fig.5.6 - Dispositif de mesure des déformations transversales

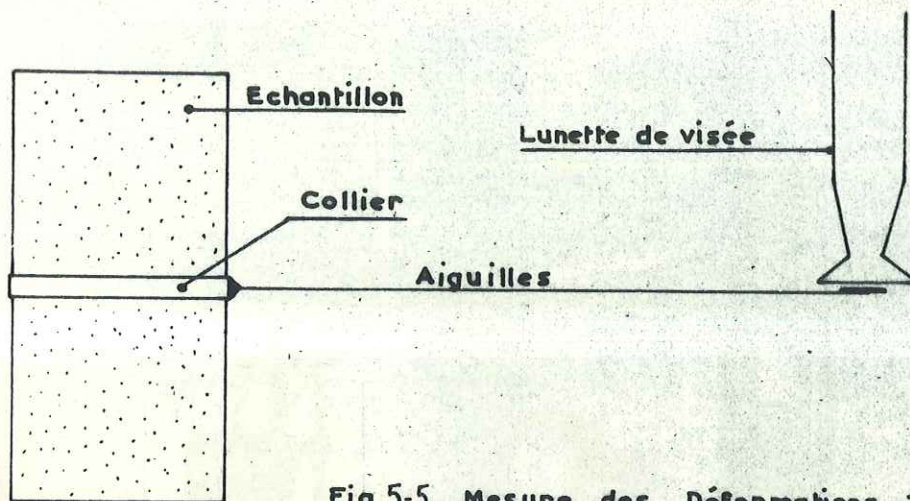


Fig.5-5_ Mesure des Déformations Transversales

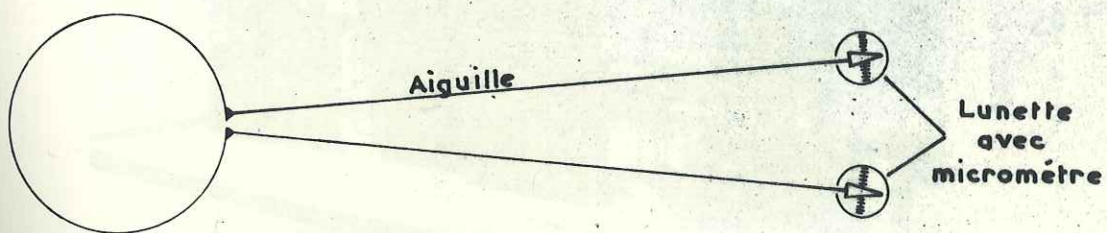
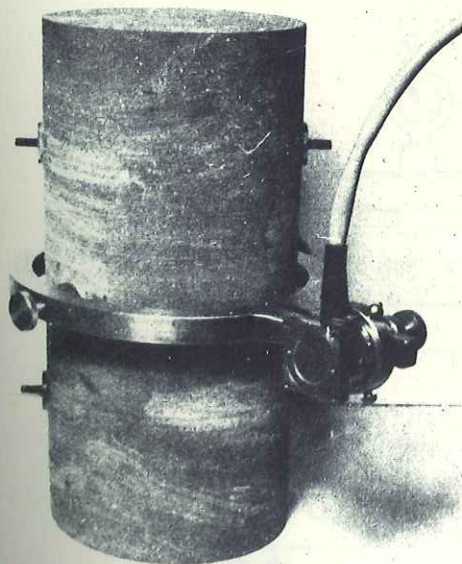


Fig.5-7

Mise en place de
l'extensomètre transversal
de la figure 5-6



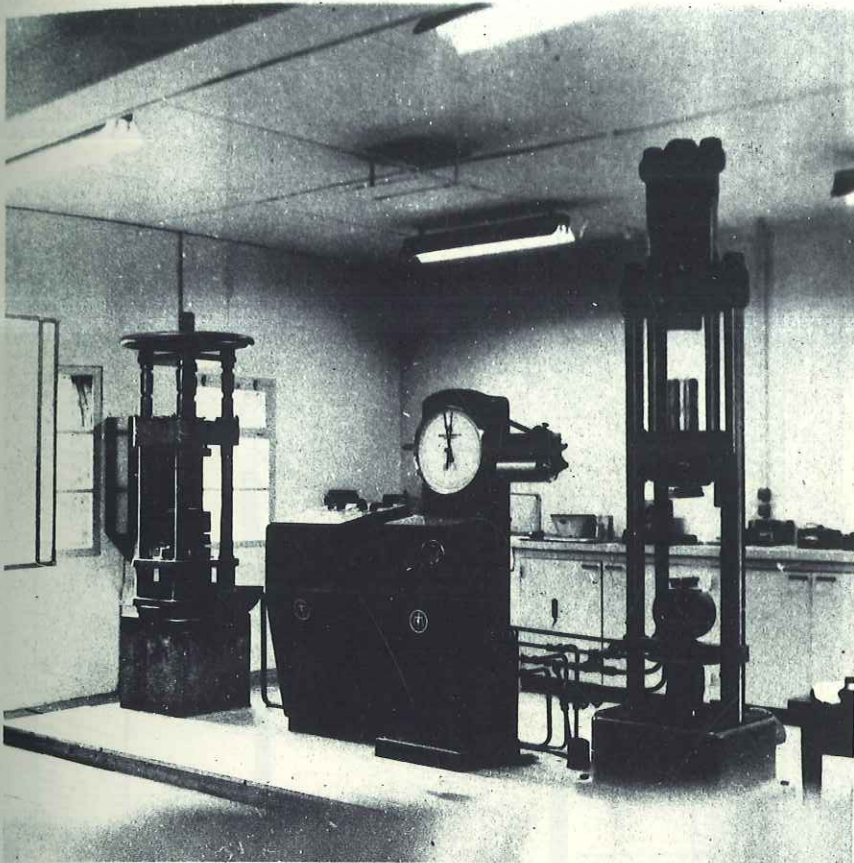


Fig. 5-8

Presses et pupitre
de commande
automatique

50 T à droite
20 T à gauche

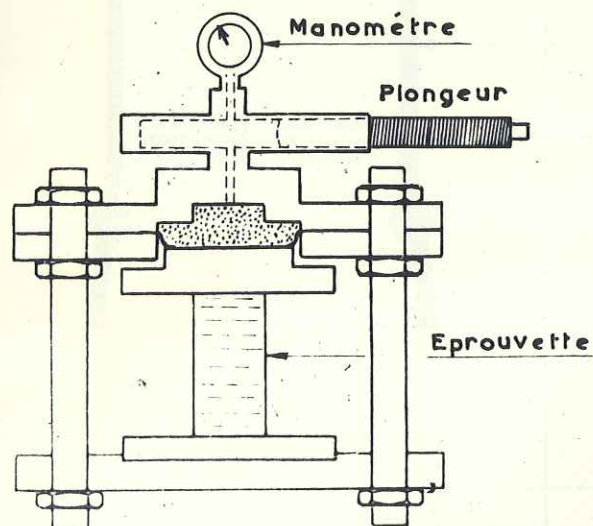


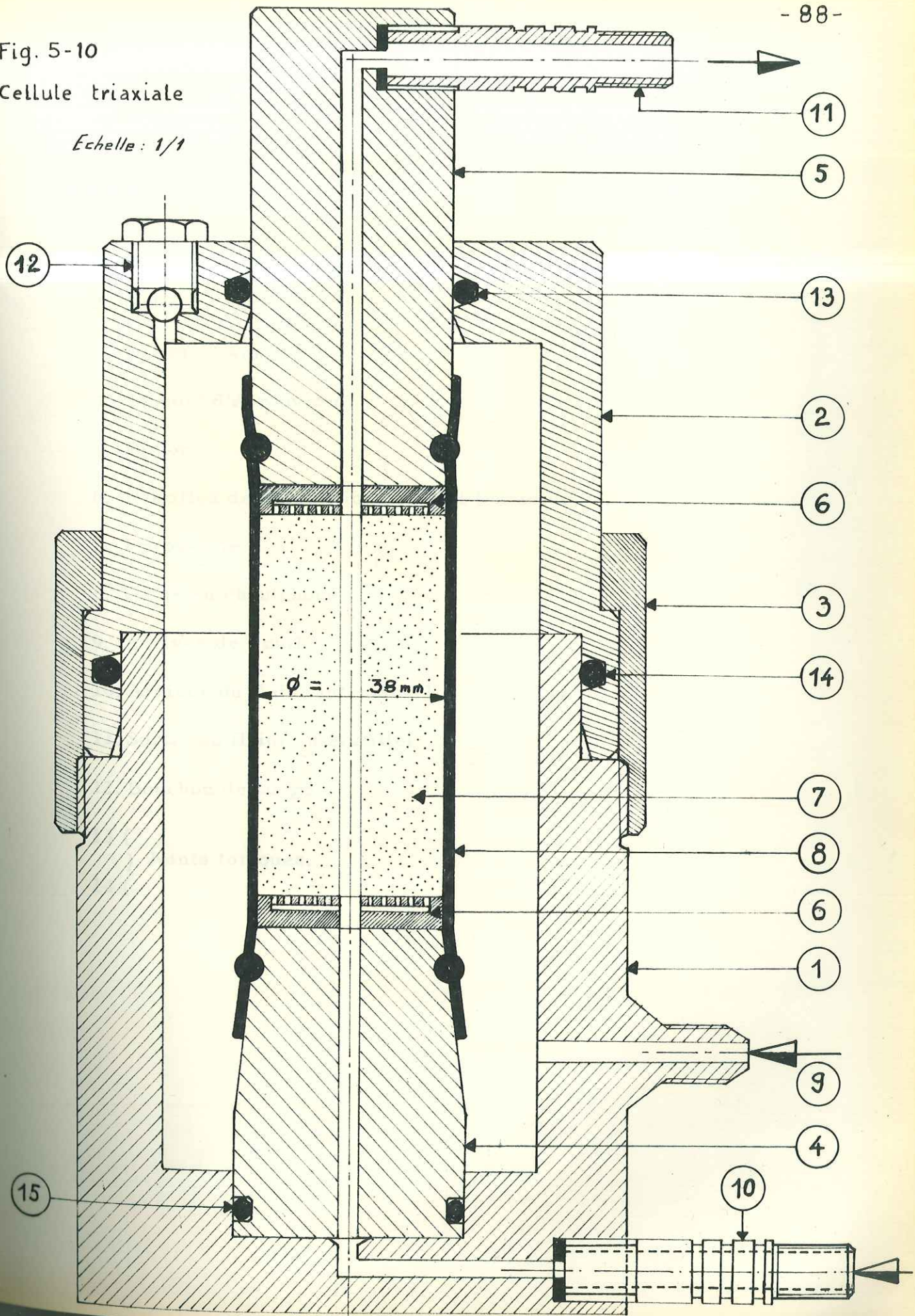
Fig. 5-9

Schéma de la
presse hydraulique
de fluage

Fig. 5-10

Cellule triaxiale

Echelle: 1/1



LEGENDE DE LA FIGURE 5-10

1. Cylindre inférieur
2. Cylindre supérieur
3. Ecrou de serrage
4. Support d'éprouvette
5. Piston
6. Pastilles de répartition de l'eau (en acier)
7. Epreuve
8. Gaine en caoutchouc
9. Arrivée de l'huile
10. Arrivée du fluide interstitiel
11. Sortie du fluide interstitiel
12. Bouchon de purge
- 13 () Joints toriques.
- 14 ()

Fig. 5-11 - Boite de double cisaillement

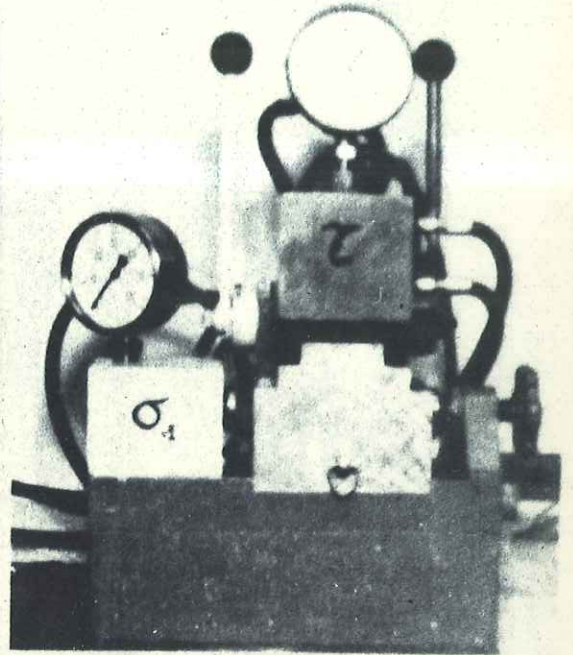
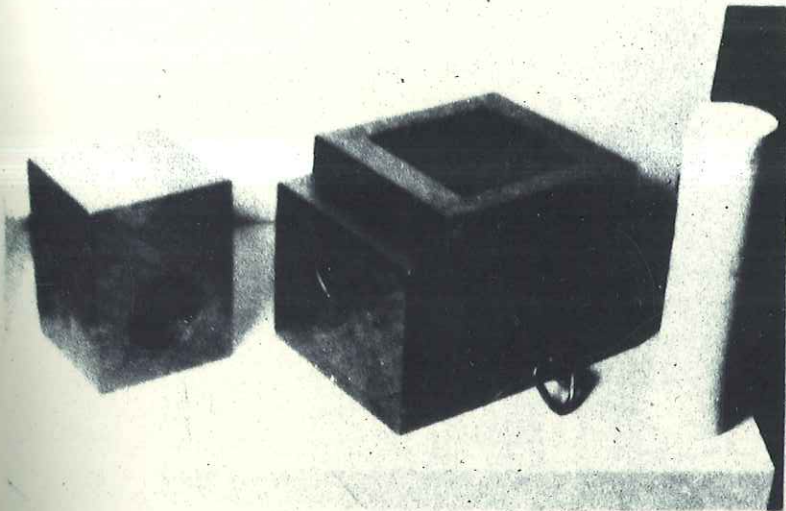


Fig. 5-12 - Presse biaxiale E.D.F.

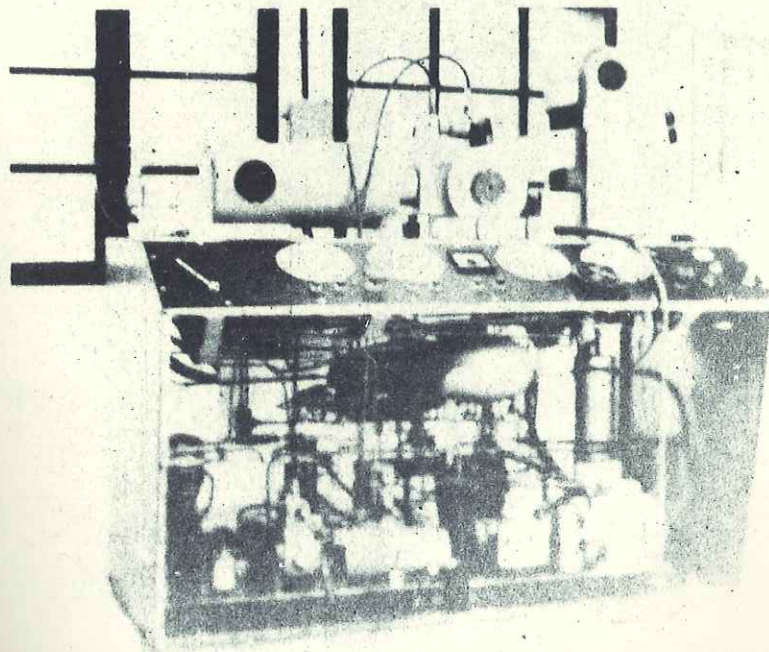


Fig. 5-13 - Machine de cisaillement S.E.I.L.

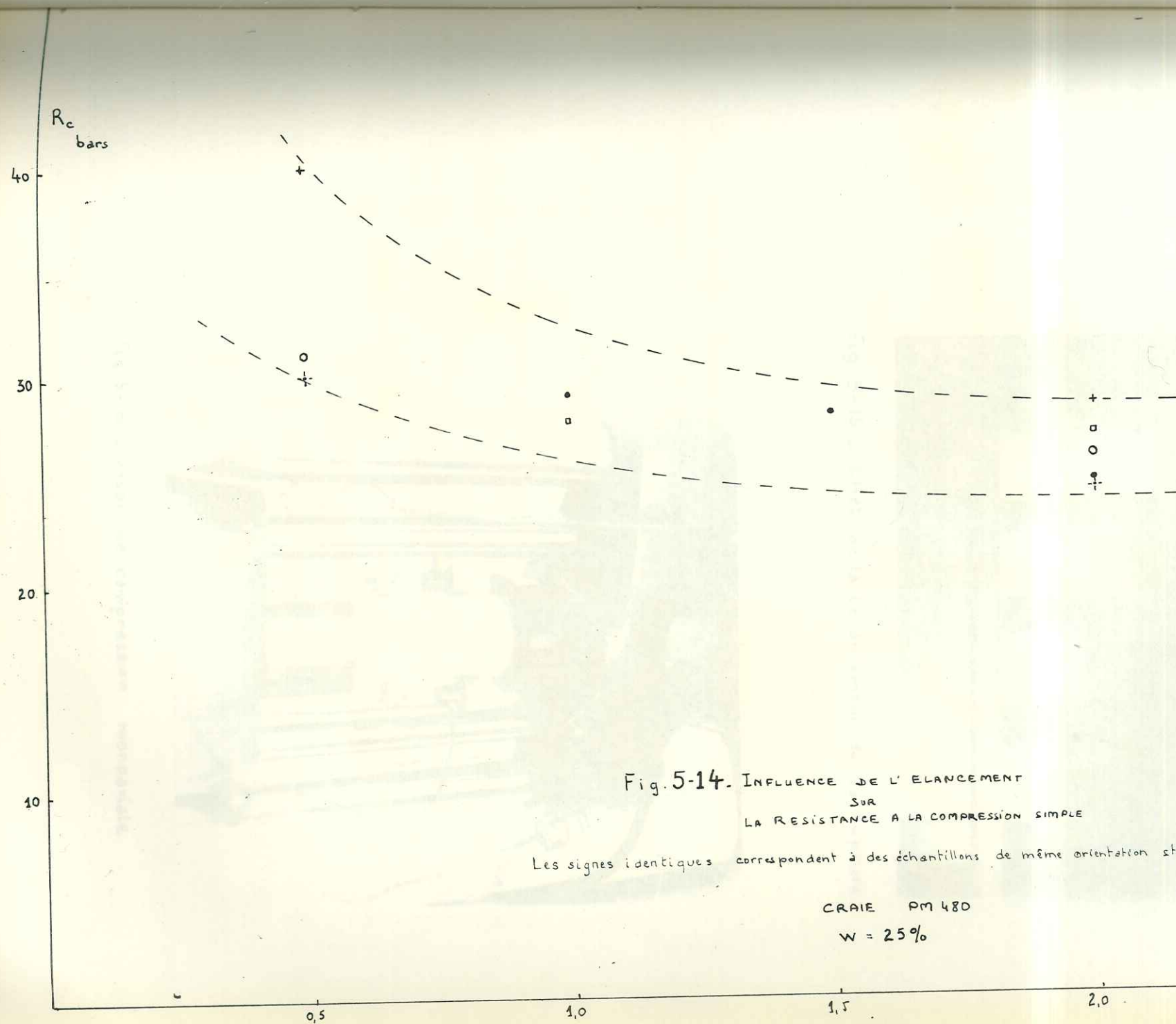


Fig. 5-14. INFLUENCE DE L'ELANCEMENT
SUR
LA RESISTANCE A LA COMPRESSION SIMPLE

Les signes identiques correspondent à des échantillons de même orientation structurale

CRAIE PM 480

W = 25%

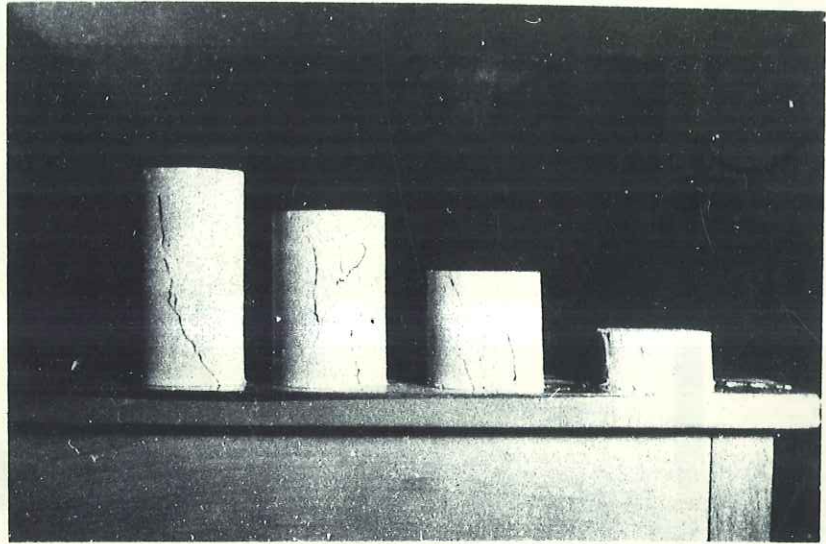


Fig. 5-15 - Effet de la l'élancement sur la rupture

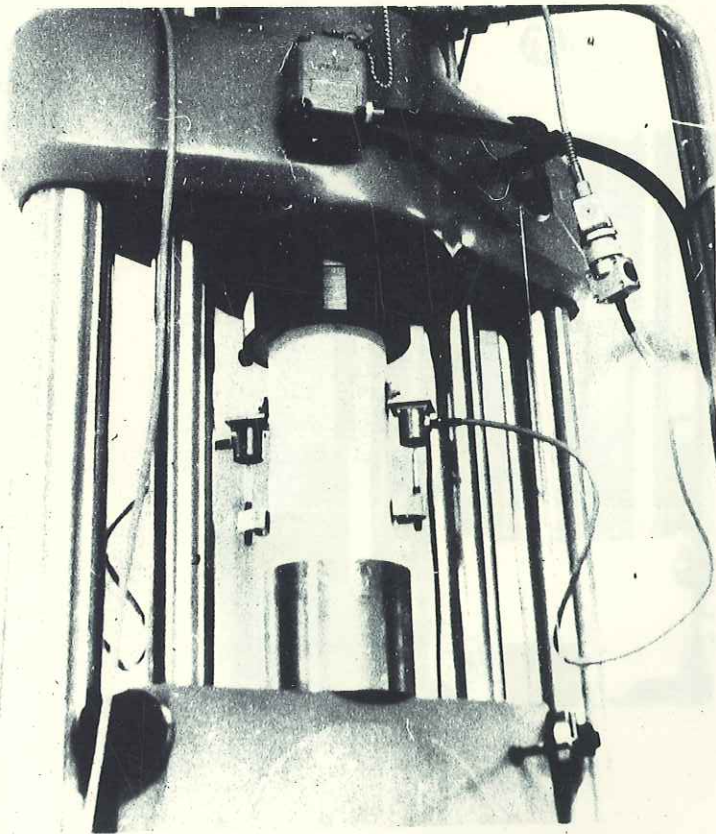
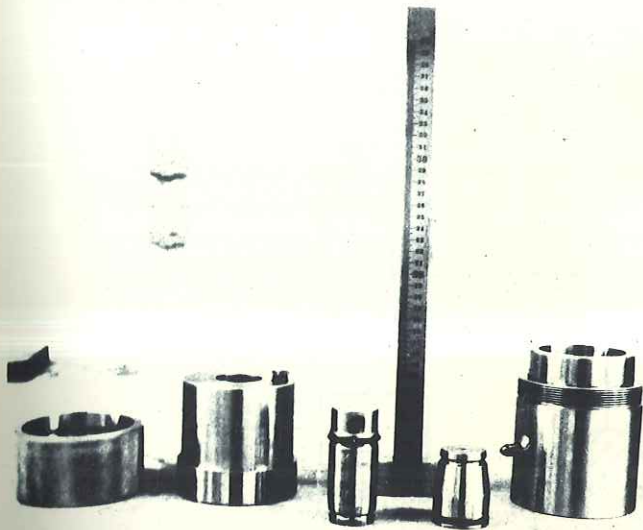
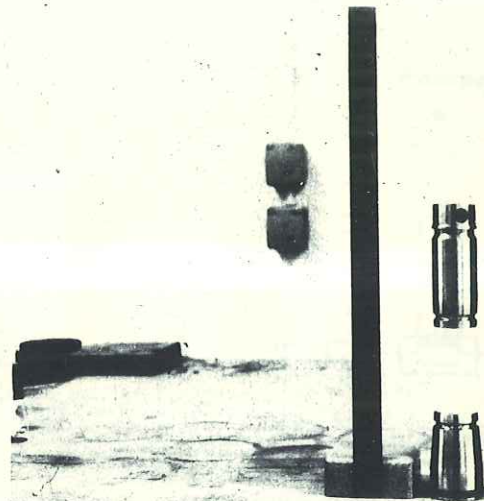


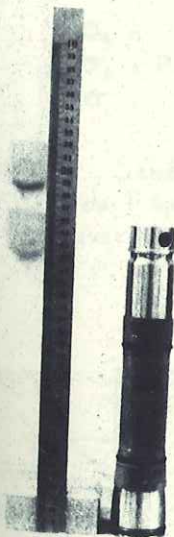
Fig. 5-16 - Essai de compression monoaxiale



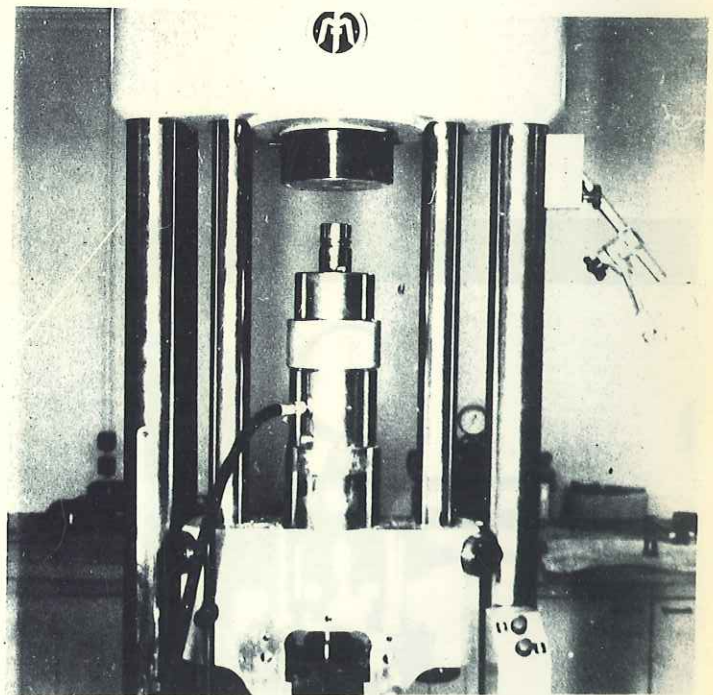
- a -



- b -

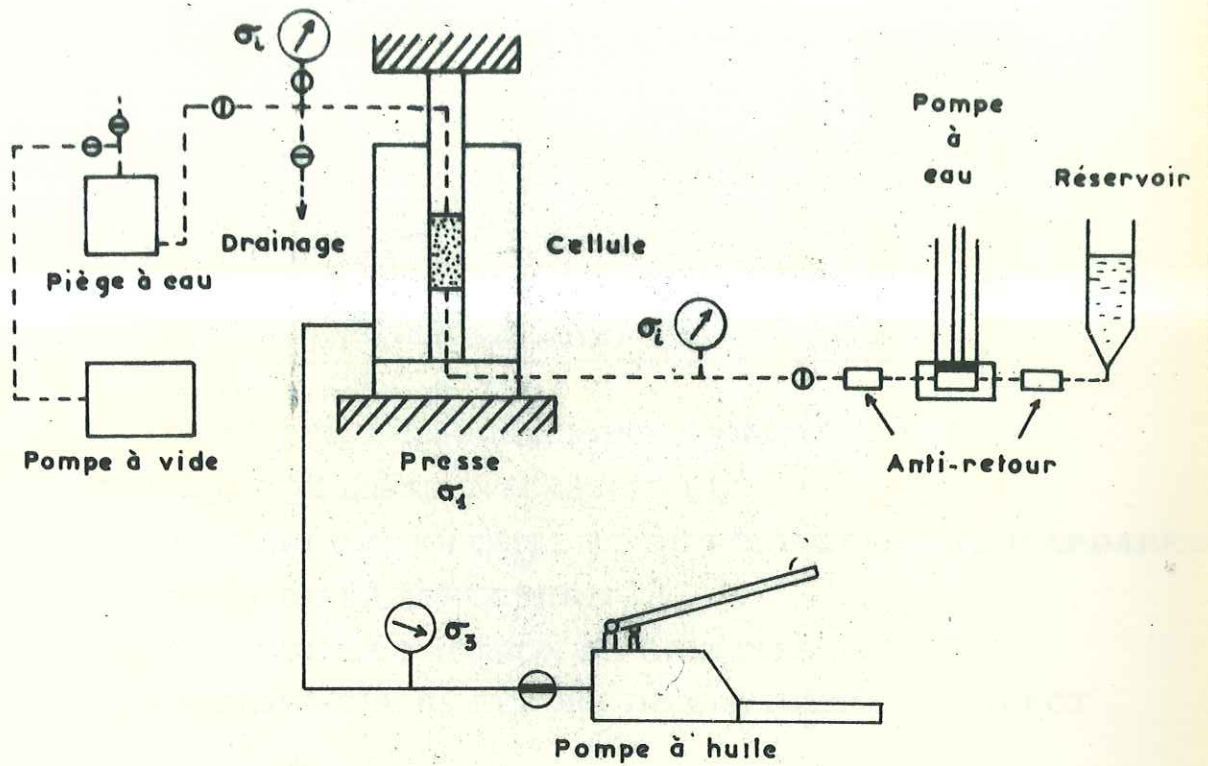


- c -



- d -

Fig. 5-17 - Montage de la cellule triaxiale



σ_1 = axiale
 σ_3 = Pression latérale
 σ_i = interstitielle

Fig. 5-18 - Schéma d'utilisation de l'appareil triaxial avec eau interstitielle.

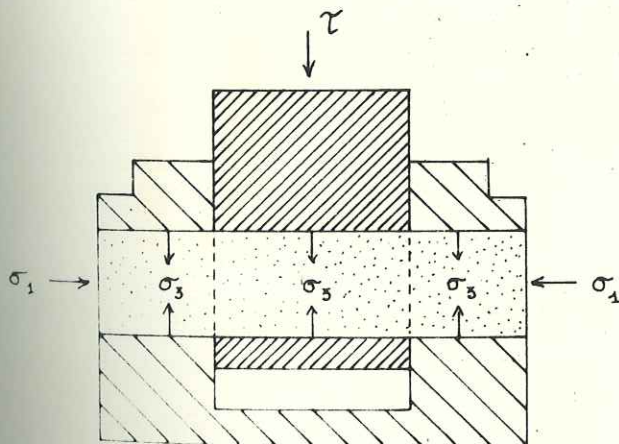
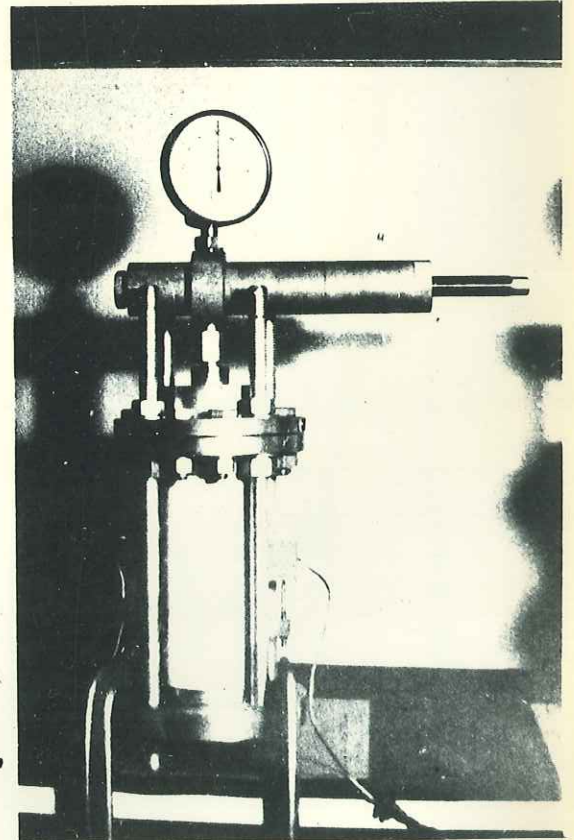


Fig. 5-19 - Principe de l'essai de double cisaillement LUNDBORG

Fig. 5-20 - Essai de fluage →



CHAPITRE 6

COMPORTEMENT RHEOLOGIQUE DE LA CRAIE

- 6.1. LE COMPORTEMENT SOUS CHARGE MONOAXIALE
 - 6.2. INFLUENCE DE L'EAU INTERSTITIELLE
 - 6.3. INFLUENCE DE LA POROSITE ET DU POIDS SPECIFIQUE APPARENT
 - 6.4. INFLUENCE DE LA STRUCTURE
 - 6.5. INFLUENCE DE LA PRESSION DE CONFINEMENT
 - 6.6. COMPORTEMENT SOUS EFFORT DE CISAILLEMENT DIRECT
 - 6.7. INFLUENCE DU TEMPS
-



Eprouvette de craie sèche déformée de 55%
Pression de confinement 200 bars

L'expérience la plus simple pour étudier le comportement mécanique d'un matériau est de soumettre ce matériau à une compression ou une traction monoaxiale et d'observer sa déformation et sa rupture. Nous commencerons donc cette étude en soumettant simplement la craie sèche à une compression monoaxiale et nous étudierons ensuite l'influence de différents facteurs sur la déformation et la résistance. Les différents facteurs que nous envisagerons seront :

- l'eau interstitielle
- les paramètres physiques : densité-porosité
- les paramètres structuraux : anisotropie-défauts idéalisés
- la pression de confinement ou pression latérale
- le temps.

L'étude du comportement des roches n'est pas une science "exacte". La raison essentielle est que la roche n'est pas un solide continu et homogène. Aussi nous ne nous attacherons pas dans ce chapitre à définir les valeurs exactes des différents paramètres de la rhéologie de la craie, ce qui n'aurait pas de sens, mais bien plutôt à définir des ordres de grandeur de ces paramètres et surtout leur évolution en fonction des différents facteurs ci-dessus.

6.1. LE COMPORTEMENT SOUS CHARGE MONOAXIALE

Nous examinons ici le comportement de la craie après un séchage en étuve à température modérée (environ 80° pendant 24 h) ou un simple séchage dans l'atmosphère du laboratoire pendant plusieurs jours. Nous la désignerons par craie "sèche".

En compression monoaxiale (fig. 6-1, courbes A8 et A10) la craie "sèche" se comporte comme un solide élastique fragile.

L'élasticité de la craie est alors définie par la quasi-linéarité de la relation σ, ϵ . Mais cette relation n'est pas univoque. En effet des cycles charge-décharge (fig. 6-2) montrent un léger hystérésis indiquant que la déformation dépend à la fois du temps et de la contrainte. Si la contrainte maximale atteinte n'est pas trop proche de la contrainte de rupture, sa suppression ne ramène pas immédiatement la déformation à l'origine, mais celle-ci y revient au bout d'un temps variable dépendant de la déformation maximale atteinte. Nous reviendrons sur ce problème quand nous étudierons l'influence du temps.

La concavité de la partie inférieure des courbes de la figure 6-1 doit être imputée au système de mesure globale de la déformation. En effet cette mesure tient compte de l'écrasement des têtes d'éprouvettes au début de l'essai. Une mesure partielle par capteurs (base 100 mm) ne montre

pas de serrage initial du matériau (fig. 6-2 et 6-3).

Ce serrage, quand il est significatif, est généralement considéré comme une phase caractéristique de la déformation des roches, phase attribuée au resserrement de fissures ouvertes qui existent effectivement dans la plupart des roches de surface, décomprimées.

L'absence de serrage distingue donc fondamentalement la craie des autres roches. La craie est un solide poreux (nous l'avons vu) mais non fissuré. La fragilité est une notion plutôt intuitive liée au mode de rupture des matériaux. Si l'on en observe facilement les effets (rupture brutale, ne prévenant pas) il est plus délicat d'en donner une définition scientifique rigoureuse. On s'accorde généralement pour qualifier de fragile le comportement d'un solide peu déformable, se rompant sans déformation permanente appréciable ou sans que la séparation de deux parties du solide ne soit précédée de glissements relatifs dans la zone de rupture. Cette définition est celle adoptée par le Conseil du Groupe français de Rhéologie en 1967. Notons que la notion de fragilité n'est absolument pas liée à une faible résistance.

Nous avons retrouvé tous ces caractères dans le mode de rupture de la craie "sèche" : rupture sans déformation permanente au terme d'une phase quasiment linéaire de la relation σ, ε , sans glissement préalable, explosive, en colonnettes parallèles à l'axe de l'effort. Certains auteurs parlent alors de rupture par extension, mais nous ne préjugerons pas de la nature des contraintes provoquant la rupture.

Le mode de rupture n'est pas le seul critère de fragilité. Les métallurgistes utilisent également la morphologie de la cassure. Ils distinguent en particulier la rupture fragile à grain de la rupture ductile à nerf. Toutefois la rupture à nerf rayonnante est un indice de semi-fragilité ; elle est l'image de la propagation rapide du plan de rupture à partir d'un défaut.

La craie offre de telles figures de rupture fragile ou semi-fragile (fig. 6-4). Quand le plan de rupture est suffisamment important les deux surfaces (empreinte et contre-empreinte) sont fréquemment conchoïdales comme celles d'un verre épais.

La craie "sèche" est donc bien un solide élastique fragile, doué d'une légère viscosité.

Les valeurs de la résistance en compression simple et du module d'élasticité sont indiquées dans le tableau 6-1. Nous verrons dans la suite que ces valeurs dépendent de plusieurs paramètres mais nous pouvons

indiquer qu'elles varient autour de 100 bars pour la résistance et 70 000 bars pour le module.

6.2. INFLUENCE DE L'EAU INTERSTITIELLE ET COMPORTEMENT DE LA CRAIE SATURÉE

Nous avons vu dans le chapitre 4 que cette eau se présentait sous la forme d'une eau capillaire et peut-être adsorbée pour la fraction la plus liée.

La résistance de la craie décroît quand sa teneur en eau augmente (fig. 6-5). Ce phénomène est très rapide autour de 1 % de degré de saturation, tandis que la variation est très faible à partir de 40 %. Un résultat identique a été obtenu par BIAREZ (1961) pour la variation du module d'élasticité d'un grès et par SIRIEYS (1966) pour la variation de la résistance d'une marne.

La figure 6-6 montre combien il est nécessaire d'effectuer un séchage poussé pour éliminer au maximum l'eau adsorbée. La différence de teneur en eau entre un séchage à 100° et un séchage à 150° n'est pratiquement pas accessible à notre mesure mais la différence de résistance est importante.

Il semble donc que la fraction de l'eau la plus liée au squelette solide joue un grand rôle dans la résistance ce qui confirme les résultats de MORLIER (1970). Dans la suite nous n'étudions que l'influence d'un degré de saturation voisin de 100 %.

Il est d'ailleurs très difficile d'obtenir des degrés de saturation homogènes entre 1 et 100 % et ceux-ci ne présentent pas d'intérêt pratique.

Un essai de compression jusqu'à la rupture sur un échantillon saturé montre non seulement une différence de résistance mais également une différence de comportement (fig. 6-1, courbes A 13 et A 14).

La relation σ/ε est beaucoup moins linéaire et la courbe manifeste une convexité importante dans sa partie supérieure. Pour un même effort la craie saturée se déforme davantage que la craie sèche.

La résistance est beaucoup plus faible (2 à 3 fois) mais nous notons que la déformation à la rupture est à peu près la même pour la craie sèche et pour la craie saturée. Cette remarque est importante car elle montre combien la déformation est une notion plus importante que la contrainte dans le phénomène de rupture. Nous referons la même observation dans l'étude du fluage.

BIBLIOTHÈQUE
GRENOBLE-SCIENCES
UNIVERSITAIRES

Le mode de rupture est très différent de celui que nous avons observé pour la craie sèche. La séparation, beaucoup moins brutale, se fait par glissement le long d'une surface à peu près plane inclinée à 60° environ sur l'horizontale (fig. 6-4).

Ainsi, alors que la rupture de la craie sèche semble suivre une loi d'extension, la rupture de la craie saturée semble suivre une loi de cisaillement.

Les glissements qui mènent à la rupture commencent avant qu'il y ait séparation. Ceci est confirmé par deux faits :

- la rupture n'est pas brutale mais progressive et dans certains cas elle est même précédée d'une fissuration qui se traduit par des décrochements de la courbe σ, ε (fig. 6-7);

- la convexité finale de la courbe σ, ε peut débiter longtemps avant la rupture finale (fig. 6-8).

Il résulte de ces deux observations que la déformation à la rupture par séparation peut être plus importante pour la craie saturée que pour la craie sèche car le glissement peut durer plus longtemps que l'extension. Mais ceci n'infirme pas notre proposition précédente concernant la notion de déformation car pour une craie de même origine (PM 480) le glissement débute toujours pour la même valeur que la déformation qui est en gros la limite de linéarité de la relation σ, ε (fig. 6-8).

Enfin nous remarquerons que la déformation à la rupture par séparation est d'autant plus importante que le "module d'élasticité" est plus bas (fig. 6-8 et 6-9).

Les modules indiqués sur les courbes de rupture n'ont pas de signification car la mesure de déformation est une mesure globale par comparateurs, tenant compte de la déformation des têtes d'éprouvettes. Comme pour la craie sèche, ils sont beaucoup plus faibles que ceux mesurés par capteurs sur le centre de l'éprouvette.

Les figures 6-10 et 6-11 représentent des cycles charge-décharge. L'hystérésis est plus marqué que pour la craie sèche. Les paliers de déformation au sommet de chaque cycle (fig. 6-10) sont aussi plus importants mais la récupération de la déformation à la charge est presque totale, indiquant ici aussi qu'il s'agit d'une déformation visco-élastique.

BIBLIOTHEQUE
GRENOBLE-SCIENCES
UNIVERSITAIRE

On notera sur la figure 6-11 que les cycles de déformation transversale ont la même allure que les cycles de déformation longitudinale et qu'en particulier le changement de pente A, traduisant une évolution de comportement, se produit à la même contrainte (16 bars soit un peu plus de 50 % de la résistance à la compression simple) pour les deux déformations. A partir de ce changement de pente le comportement devient moins élastique : c'est le début de la phase de glissement, et l'ordre de grandeur du coefficient de Poisson passe de 0,23 à 0,30 (fig. 6-12).

Ce coefficient est toujours plus grand en décharge qu'en charge ce qui peut s'expliquer par une viscosité de la déformation transversale plus grande que celle de la déformation longitudinale. Ce phénomène est encore plus important à l'annulation de la contrainte : la déformation longitudinale "récupère" plus vite que la déformation transversale.

L'élasticité de la craie saturée doit être attribuée en partie à l'eau interstitielle qui, à cause de la faible perméabilité de la craie, n'a pas le temps de s'échapper au cours d'un essai aussi bref. Il ne peut y avoir de consolidation au sens de la Mécanique des sols.

Tant que des glissements n'ont pas pris naissance dans certains plans privilégiés, la craie saturée se comporte comme un solide visco-élastique mais la viscosité est plus importante que dans le cas de la craie sèche. La phase visco-élastique est suivie d'une phase de glissements irréversibles d'importance variable. Cette dernière phase précédant la rupture enlève toute fragilité à la craie saturée.

6.3. INFLUENCE DE LA POROSITE ET DU POIDS SPECIFIQUE APPARENT

Il n'est évidemment pas possible de faire varier la porosité d'une même roche comme on peut le faire pour un sable, sans détruire complètement la structure. Aussi sommes-nous obligés d'étudier l'influence de la porosité en comparant des roches de porosité différente. Il convient bien sûr que ces roches aient à peu près la même composition minéralogique et si possible la même granulométrie.

La comparaison de la craie de Venteuil avec d'autres craies nous a paru, à ce sujet, intéressante. Nous avons profité des résultats de nombreux essais de compression simple effectués lors des reconnaissances géotechniques du tunnel sous la Manche et publiés en 1967.

Il s'agit de craies du Cénomanién appartenant aux deux niveaux

inférieurs dits craie bleue (marne crayeuse) et craie grise. La craie bleue a une teneur en carbonate de calcium supérieure à 60 %, la craie grise une teneur supérieure à 80 %. Nous avons calculé les porosités à partir du poids spécifique apparent sec et de la teneur en eau, en supposant un degré de saturation de 100 %. Nous avons ainsi obtenu une gamme de porosité allant de 10 % à 30 %.

La figure 6-13 montre la variation de la résistance à la compression simple d'échantillons saturés en fonction de la porosité. Celle-ci décroît très nettement quand la porosité augmente. Nous avons séparé la craie marneuse de la craie grise ce qui permet d'observer qu'à porosité égale la craie est d'autant plus résistante que sa teneur en carbonate de calcium est plus élevée.

La craie blanche du Sénonien de Venteuil avec une teneur en carbonate voisine de 95 % vient d'ailleurs se placer dans le prolongement de la limite supérieure de la variation.

6.4. L'INFLUENCE DE LA STRUCTURE

6.4.1. Anisotropie

A l'oeil nu la craie ne montre pas de structure particulière. A peine peut-on distinguer parfois un léger litage horizontal. Celui-ci apparaît mieux au microscope optique mais nous n'avons pu le retrouver au microscope électronique. Dans le détail il ne semble pas que ce léger litage corresponde à une orientation privilégiée des coccolithes.

En fait il est certain que les couches de craie déposées horizontalement ont subi un tassement vertical et il paraît probable que ce simple tassement soit à l'origine de cette légère anisotropie structurale.

Quoi qu'il en soit nous avons pu vérifier sur des échantillons orientés, malheureusement en trop petit nombre, que cette anisotropie structurale se traduisait par une anisotropie du comportement mécanique.

Nous appelons α l'angle de la normale au plan de stratification avec l'axe de l'échantillon (axe de l'effort en compression simple). Les échantillons saturés de diamètre ϕ 38 mm ou ϕ 25 mm ont été prélevés suivant trois directions ($\alpha = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$) sur les carottes du sondage V119. Une dizaine d'essais ont été réalisés dans chaque direction. La figure 6-14 est un diagramme polaire sur lequel on a reporté les résistances à la compression simple en fonction de l'angle α .

L'anisotropie des résistances est bien marquée, surtout pour les valeurs minimales et moyennes. Mais ce qui paraît remarquable c'est la continuité de la variation. Ceci différencie l'anisotropie de la craie de l'anisotropie discontinue des roches à texture orientée.

Cette continuité, à laquelle on pouvait s'attendre, confirme que l'anisotropie structurale de la craie n'est pas liée à une orientation préférentielle des particules mais bien plus probablement à une géométrie anisotrope des vides due au tassement vertical du sédiment. Ceci modifie l'angle des réactions mécaniques entre les particules soumises à une sollicitation et provoque une anisotropie du comportement mécanique.

Sur des échantillons $\varnothing$ 100 mm, H 200 mm, provenant des sondages 1, 2 et 3 du PM 292 de la galerie nous avons pu mesurer non seulement la résistance en compression simple mais également le module de Young et la résistance à la traction.

Le module de Young est plus élevé dans la direction perpendiculaire à la stratification ($\alpha = 0^\circ$) (fig. 6-15) que dans la direction parallèle (fig. 6-16). Ces figures montrent encore une fois la grande différence de forme des courbes contrainte-déformation suivant que l'on effectue une mesure globale par comparateurs ou une mesure locale par capteurs. Les remarques suivantes ne concernent que les mesures locales par capteurs.

On notera, en comparant les figures 6-15 et 6-16, que l'hystérésis des cycles est plus important pour $\alpha = 90^\circ$ que pour $\alpha = 0^\circ$, ce qui implique une plus grande viscosité de la craie horizontalement que verticalement. Enfin l'enveloppe des cycles pour $\alpha = 0^\circ$ est très nettement une droite, tandis que pour $\alpha = 90^\circ$ la convexité de l'enveloppe est assez prononcée surtout dans sa partie supérieure, à partir de $\sigma = 15$ bars.

La résistance à la traction mesurée sur des éprouvettes $\varnothing$ 38 mm, H 140 mm à la centrifugeuse du professeur BERTHIER montre une anisotropie inverse de celle obtenue en compression simple.

Le tableau ci-après résume et chiffre l'anisotropie de la craie saturée.

TABLEAU 6-1. ANISOTROPIE DE LA CRAIE SATURÉE

(Valeurs en bars)

Direction	Module PM 292	Compression PM 292	Compression Sondage V119	Traction PM 292
Verticale $\alpha = 0^\circ$	58 000 (= 0 à 30 bars)	37 à 54 moy. <u>48</u>	46 à 53 moy. <u>50, 4</u>	3 à 11 moy. <u>6</u>
$\alpha = 45^\circ$			32 à 59, 5 moy. <u>45, 5</u>	
Horizontale $\alpha = 90^\circ$	25 000 à 50 000 (= 0 à 25 bars)	Parallèle axe galerie 21 à 33 moy. <u>27, 5</u> Perpendiculaire axe galerie 23 à 33 moy. <u>29</u>	11, 5 à 43, 5 moy. <u>22, 5</u>	7, 5 à 10 moy. <u>9</u>

Dans le plan horizontal des essais suivant deux directions perpendiculaires (parallèle et perpendiculaire à l'axe de la galerie) n'ont pas montré de différence notable de la résistance, ce qui implique une symétrie de révolution de l'anisotropie autour de l'axe perpendiculaire à la sédimentation.

En conclusion la craie possède une anisotropie continue de révolution autour de l'axe vertical.

6.4.2. Effet d'un défaut idéalisé

Nous avons remarqué assez fréquemment dans la craie la présence de défauts sous la forme de coquilles dissoutes ou mal épigénéisées en pyrite. Certaines ruptures anormales semblaient provenir de ces défauts, les plans de rupture passant précisément par ces défauts. Nous avons voulu vérifier dans quelle mesure une telle hétérogénéité pouvait affecter la résistance en compression simple.

Faute de pouvoir reproduire la même hétérogénéité nous avons idéalisé un défaut sous la forme d'un trait de scie horizontal à mi-hauteur de l'éprouvette. L'épaisseur de la fente est d'environ 1 mm et nous avons fait varier sa profondeur de 8 mm à 40 mm.

La figure 6-17 donne la variation de la résistance en fonction de la profondeur de l'entaille. Cette résistance diminue rapidement quand la profondeur augmente.

Le processus de la rupture est constant. La fracture se propage toujours à partir du fond de l'entaille vers les extrémités de l'éprouvette symétriquement par rapport au plan médian perpendiculaire à l'entaille (fig. 6-17).

La symétrie par rapport au plan de l'entaille n'a été observée que pour les plus grandes entailles (33 mm et 40 mm). La rupture est provoquée par les contraintes de traction importantes induites à l'extrémité fermée de l'entaille par l'effort de compression. Les théories sont nombreuses, qui démontrent l'existence de telles contraintes de traction aux extrémités d'une fissure ou d'une entaille.

Nous avons stoppé certains essais avant la rupture complète et nous avons observé la fracture débutant à l'extrémité de l'entaille et n'atteignant pas encore l'extrémité de l'éprouvette. Il s'agit bien d'un phénomène de propagation de rupture naissant dans une zone de concentration de contraintes.

Comme tous les matériaux fragiles, la craie est affaiblie par un défaut.

6.5. INFLUENCE DE LA PRESSION DE CONFINEMENT

Tous les résultats qui suivent ont été obtenus sur des échantillons de diamètre 38 mm et de hauteur 76 mm. Leur orientation par rapport à la stratification est quelconque. Les essais ont été effectués soit dans la cel-

lule triaxiale de 600 bars soit dans celle de 1 000 bars. Les mesures de déformations longitudinales sont globales (rapprochement des plateaux de la presse).

Le chemin suivi dans l'espace des contraintes au cours des essais est représenté sur la figure 6-18. Le chemin suivant la trissectrice est le chemin isotrope avec $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$. Il peut être suivi d'un chemin déviatoire avec $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$.

Nous étudierons d'abord l'effet de la pression de confinement σ_3 sur la craie sèche avant d'aborder son effet sur la craie saturée.

6. 5. 1. Diminution de la fragilité

Nous avons donné au paragraphe 6.1. deux définitions de la fragilité, l'une relative au mode de rupture, l'autre relative à la morphologie de la cassure. Si l'utilisation de ces critères est aisée en compression monoaxiale, elle est beaucoup plus délicate en compression triaxiale. Dans ce dernier cas en effet les seules observations que l'on puisse faire au moment de la rupture portent sur la forme de la courbe effort-déformation. Aussi BIAREZ et BELLIER (1968) ont tenté de définir la fragilité par le rapport :

$$f = \frac{\sigma_m - \sigma_3}{\sigma_p - \sigma_3} \quad \text{où } \sigma_m \text{ représente la valeur maximale de la contrainte}$$

principale majeure et σ_p la valeur de cette même contrainte au palier de la courbe (fig. 6-19). Et on observe que le degré de fragilité f diminue quand la pression de confinement σ_3 augmente.

Faute de pouvoir faire des essais à vitesse de déformation contrôlée nous n'avons pu obtenir de variation correcte de la contrainte principale majeure σ_1 après la rupture. Toutefois la figure 6-20 représente une série de courbes effort-déformation obtenues pour différentes pressions de confinement de 5 bars à 200 bars. Il s'agit des courbes brutes d'enregistrement et nous avons volontairement conservé la force axiale en ordonnée car nous verrons plus loin qu'il importe, pour calculer la contrainte, de faire des corrections de section que nous n'avons pu faire dans cette série.

Il est très net que le pic de rupture est d'autant moins brutal et accentué que σ_3 augmente. Et s'il ne nous est pas possible de calculer le degré de fragilité f de façon correcte, il est évident qu'il diminue quand σ_3 augmente.

Jusqu'à $\sigma_3 = 30$ bars la rupture se fait par cisaillement suivant un plan incliné à 60° (fig. 6-21).

Pour $\sigma_3 = 40$ bars la rupture se fait par cisaillement suivant deux plans symétriques par rapport à l'axe de l'éprouvette.

A partir de $\sigma_3 = 50$ bars on ne peut plus obtenir de rupture par séparation. L'éprouvette se déforme "en tonneau" (fig. 6-21) jusqu'à des déformations longitudinales pouvant dépasser 40 %. et page de garde

La quasi-totalité de la déformation acquise est alors permanente (fig. 6-22).

La pression de confinement diminue la fragilité de la craie. A partir de $\sigma_3 = 50$ bars la craie devient même un solide ductile.

6.5.2. Déformation sous contrainte isotrope σ_0

La compression isotrope est la première phase de l'essai triaxial. Sous le seul effet de cette compression la déformation longitudinale de la craie atteint déjà 7 % pour $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = 900$ bars (fig. 6-23).

A partir d'une série d'essais sur laquelle nous reviendrons plus loin nous avons pu mesurer les diamètres des éprouvettes, en sortant ces dernières de la cellule pour différents taux de déformation. La figure 6-24 montre les variations de la déformation axiale ε et de la déformation transversale $\bar{\varepsilon}$, chaque point appartenant à une éprouvette différente.

La déformation transversale est de même signe que la déformation longitudinale à partir d'une contrainte isotrope $\sigma_0 = 200$ bars. Au-dessous de cette pression la déformation transversale est difficilement appréciable et elle peut être considérée comme nulle devant la déformation axiale.

Ces observations impliquent naturellement une diminution de volume de la craie sous contrainte isotrope (fig. 6-25). Le coefficient de dilatation cubique $\Theta = \frac{\Delta V}{V}$ atteint 15 % pour $\sigma_1 = \sigma_3 = 900$ bars. Il est négatif puisque il s'agit ici d'une contraction.

Nous avons rapproché cette courbe de compressibilité de celles obtenues par PELLEGRINO (1968) sur le tuf jaune napolitain (fig. 6-26). La ressemblance, frappante, s'explique par la très forte porosité des deux roches. Le tuf A dont nous avons représenté la variation de volume a une porosité de 0,5 à 0,6, tandis que le tuf B a une porosité de 0,4 à 0,5.

L'influence de la porosité est nette : à contrainte isotrope égale, l'augmentation de la porosité conduit à une augmentation de la compressibilité.

On distingue sur la courbe de la figure 6-25 trois phases très distinctes, soit OA, AB et BC. La phase OA correspond à une relativement faible compressibilité mais la pente $d\Theta/d\sigma_0$ augmente rapidement avec σ_0 . A la phase AB correspond une relation quasiment linéaire entre Θ et σ_0 soit :

$$\Theta = k_1 \sigma_0 + k_2$$

Les coefficients k_1 et k_2 dépendent très probablement de la porosité .

Enfin la troisième phase BC montre une diminution de la pente $d\Theta/d\sigma_0$, indiquant une décroissance de la compressibilité avec l'augmentation de σ_0 .

Ces différentes phases sont évidemment liées à une évolution du squelette solide de la craie. L'examen des courbes de la figure 6-24 nous fournit quelques renseignements. Pendant la première phase OA la déformation latérale débute par une légère dilatation jusqu'à $\sigma_0 = 200$ bars. Il semble que cette phase corresponde à un comportement élastique du squelette. Puis vient une phase de transition pendant laquelle la déformation transversale devient une contraction. Le niveau de la contrainte σ_0 devient suffisant pour rompre les liens entre les particules. Quand ces liens sont tous brisés on entre dans la phase AB de grande déformation, pendant laquelle les particules comblent rapidement les vides. Bien qu'elle conserve encore une certaine cohésion, la craie n'est plus, pendant cette phase, le matériau rocheux qu'elle était à l'origine.

Nous verrons plus loin que d'autres critères permettent d'établir qu'elle se comporte alors comme un matériau pulvérulent.

Enfin comme cela est normal pour un matériau pulvérulent la décroissance de la porosité entraîne progressivement une diminution de la compressibilité, un durcissement.

L'examen des modules de compression isotrope E_i correspondant à la figure 6-23 permet aussi de mettre en évidence les différentes phases de compressibilité (tableau 6-2).

TABLEAU 6-2. VARIATION DU MODULE ISOTROPE E_i AU COURS DES
DIFFERENTES PHASES DE LA COMPRESSION ISOTROPE

Phase	Domaine de contrainte isotrope en bars	Module isotrope E_i en bars
Elastique	0 - 200	30 000 à 60 000
Transition	200 - 300	10 000 à 15 000
Comportement pulvérulent	> 300	6 500 augmentation progressive jusqu'au durcissement
Durcissement	800 - 900	30 000

On remarquera sur ce tableau que le module isotrope E_i , pendant la phase élastique, est inférieur au module E de la compression simple (craie sèche) qui est rarement inférieur à 70 000 bars.

Malgré l'importance des déformations atteintes après la phase élastique la réversibilité de la déformation atteint encore 25 % de la déformation totale pour $\sigma_0 = 700$ bars. (fig. 6-23).

Dans son ensemble cette interprétation est tout à fait semblable à celle de A. PELLEGRINO (1968) sur le tuf napolitain. Nous devons dire cependant que nous étions arrivés à la conclusion de l'évolution d'un matériau rocheux en un matériau pulvérulent par d'autres observations, comme nous le verrons plus loin.

6. 5. 3. Déformation sous déviateur

Nous rappelons que nous entendons par déviateur la simple différence $\sigma_1 - \sigma_3$. Autrement dit nous allons étudier maintenant l'évolution du comportement et de la déformation de la craie lorsqu'à partir d'un état isotrope de contraintes nous augmentons la contrainte axiale σ_1 .

Nous avons déjà vu au paragraphe 6. 5. 1. que le comportement de la craie dépendait de la pression de confinement. Nous n'explorerons ici que le domaine ductile au-delà de $\sigma_3 = 50$ bars.

L'augmentation de surface de la section de l'éprouvette, surtout de la section centrale à cause de la déformation en "tonneau", nécessite une correction dans le calcul de la contrainte axiale σ_1 . En effet bien que l'effort continue à croître, il vient un moment où la contrainte axiale réelle sur l'échantillon décroît. Ainsi les courbes de déformation en fonction du déviateur montrent toutes un maximum (fig. 6-27 et 6-28).

6. 5. 3. 1. La limite élastique

Ces courbes présentent deux points caractéristiques (fig. 6-28) le premier correspondant au coude A et le deuxième au sommet B. On remarque que le coude A est d'autant moins marqué que la pression de confinement est plus élevée, au point qu'il n'apparaît plus pour les pressions de confinements supérieures à 200 bars.

L'examen visuel d'un échantillon immédiatement après le coude A n'a pas permis de déceler la moindre trace de rupture. Ce coude correspond à une évolution interne du matériau, une rupture des liaisons du squelette qui marque la limite élastique du matériau. Cette transformation est donc à peu près l'équivalent de la rupture par séparation obtenue pour des pressions de confinement plus basses.

L'inexistence du coude A à partir de $\sigma_3 = 300$ bars est liée à l'évolution du matériau sous la seule pression isotrope : c'est le terme de la première phase de la courbe de compressibilité (fig. 6-25).

On peut traduire ce seuil de rupture du squelette, que nous appelons limite élastique, sur un graphique (σ, τ) en traçant l'enveloppe des cercles de Mohr. Ces cercles viennent compléter la série des cercles de rupture par séparation en traction simple, en compression simple et pour les positions de confinement inférieures à 50 bars.

On obtient ainsi l'enveloppe complète de limite élastique (fig. 6-29).

Cette enveloppe vient naturellement se refermer sur l'axe des contraintes normales. Il s'agit là d'un résultat tout à fait original pour un matériau naturel. MORLIER (1969) avait prévu théoriquement ce type de courbe intrinsèque et dans un exposé au Groupe français de Rhéologie (Cahier en publication, 1970) il en a donné un exemple obtenu sur un bronze fritté.

On comprend également qu'à partir d'une certaine pression de confinement les cercles de Mohr puissent être plus ou moins concentriques les uns aux autres. L'enveloppe est alors imaginaire et à la limite on obtient un point sur l'axe de contraintes normales. Nous verrons un tel point plus loin.

6.5.3.2. L'écrouissage et le durcissement

Dans le but de suivre les modifications de structure de la craie après sa limite élastique nous avons effectué une série d'essais triaxiaux sur sept échantillons auxquels on a fait subir une déformation longitudinale totale de 50 % sous une pression de confinement respectivement de 100, 200, 300, 400, 500, 700 et 900 bars. L'originalité de la manipulation a été de sortir de la cellule chaque échantillon après chaque tranche de déformation d'environ 5 % afin de faire des observations sur son mode de déformation et des mesures de densité.

Nous obtenons de cette manière une série de cycles déviateur-déformation pour chaque échantillon. La figure 6-30 montre une telle série pour l'échantillon déformé sous une pression de confinement de 100 bars. On peut alors tracer l'enveloppe des sommets de chaque cycle (fig. 6-31), qui ne correspondent au point de déformation maximale que dans la partie croissante de l'enveloppe.

Pendant cette phase croissante de la courbe enveloppe la craie subit d'importantes modifications de sa structure qui se traduisent non seulement par une déformation permanente mais également par une augmentation de sa densité (fig. 6-34) que nous étudierons en détail plus loin.

L'importance de cette phase d'écrouissage dépend de la pression de confinement. Elle augmente avec cette pression mais semble tendre vers une limite comme en témoigne la forme du lieu des sommets des courbes (fig. 6-31).

Chaque cycle situé avant le sommet de la courbe-enveloppe indique un relèvement de la limite élastique par rapport au précédent. Ce relèvement de la limite élastique s'accompagne d'ailleurs d'une compressibilité de plus en plus faible à mesure que la densité augmente, c'est-à-dire que la porosité diminue. Ceci se traduit par un relèvement important du module de déformabilité longitudinale sous contrainte isotrope (fig. 6-32).

Cette phase d'écrouissage est donc une véritable phase de durcissement.

6.5.3.3. La limite d'écrouissage

A partir du sommet des courbes de déformation, c'est-à-dire le point B de la figure 6-28, les cycles (fig. 6-30) montrent un abaissement de la limite élastique. (Il s'agit bien entendu à chaque fois de la limite élastique d'un matériau qui est très différent de la craie originale. Il convient donc de ne pas confondre cette limite élastique avec la limite élastique dont nous avons parlé au paragraphe 6.5.3.1).

Ce sommet marque donc la limite de la phase d'écrouissage et l'examen des échantillons a montré que des plans de cisaillement apparaissent sur leurs flancs immédiatement après ce seuil. L'apparition de ces plans est indiquée par des hachures sur la figure 6-30 (5e cycle) et sur les courbes-enveloppes de la figure 6-31.

On peut traduire ce seuil par l'enveloppe d'une nouvelle série de cercles de Mohr (fig. 6-33). On obtient ainsi un deuxième critère de rupture, le premier correspondant à la limite élastique. Ce deuxième critère est pratiquement linéaire confirmant ainsi que, après sa limite élastique, la craie se comporte comme un matériau pulvérulent. Toutefois, et la bonne tenue des échantillons le prouve, elle conserve une cohésion que la prolongation de la droite intrinsèque jusqu'à l'axe τ ne permet pas d'évaluer avec une grande précision mais qui doit être de l'ordre d'une dizaine de bars.

Au-dessous de cette droite le comportement est un durcissement, au-dessus nous l'appellerons pseudo-plasticité.

6.5.3.4. La pseudo-plasticité

Après la limite d'écrouissage les courbes de déformation sont légèrement décroissantes avant d'atteindre un palier (fig. 6-31). Les plans de cisaillement se développent en deux familles symétriques faisant entre elles un angle à peu près constant compris entre 60° et 70° (Pl. 6.1 et 6.2). On remarque que la fréquence des plans augmente avec la pression de confinement.

Le cisaillement est attesté par de nombreux décrochements et par l'observation au microscope électronique. Ces plans présentent à leur surface des écailles de décollement et les forts grossissements montrent la séparation des amas en particules individualisées (Pl. 6.3). L'aspect de galets roulés laisse imaginer le mouvement de frottement avec déplacement des particules réduites en poussière.

Le palier de la courbe de déformation fait évidemment penser au palier de plasticité des métaux. Cependant la plasticité implique une déformation par glissement des cristaux les uns sur les autres, voire des déformations du réseau cristallin lui-même, théoriquement à volume constant.

Qu'en est-il pour la craie ? Après l'apparition des plans de cisaillement la densité semble bien se stabiliser pour les fortes pressions de confinement, supérieures à 400 bars (fig. 6-34), mais elle continue de croître pour les pressions inférieures bien que le gradient $\frac{d(\Delta d)}{d\epsilon}$ décroisse. Nous verrons plus loin que cette apparente anomalie est peut-être due au manque d'homogénéité du champ de déformation (déformation en "tonneau").

Mais ce qui est plus gênant pour justifier la plasticité de ce comportement, ce sont évidemment les glissements suivant des plans privilégiés. C'est pourquoi nous préférons appeler pseudo-plasticité ce type de comportement.

6.5.3.5. La variation de densité

Pour la mesure de la variation de densité nous avons transposé aux roches la méthode mise au point et décrite par WACK (1968) pour l'analyse de la densité des sables soumis à un champ de contrainte triaxial. Le principe de la mesure, basée sur la variation de l'absorption d'un rayonnement gamma, est décrit avec l'appareillage dans l'annexe A.

Nous avons effectué nos mesures sur chaque échantillon à la fin de chaque cycle. Ces mesures sont prises sur toute la hauteur de l'échantillon à des cotes espacées de 5 mm et suivant trois plans à 120°. On obtient aussi trois profils de densité et un profil moyen à chaque cycle.

La figure 6-35 représente la série des profils moyens de densité obtenue pour le même échantillon sous une pression de confinement de 100 bars. Le profil 1 est celui de l'échantillon non déformé. La densité moyenne du profil est indiquée sous le numéro de chaque profil par un tiret vertical.

C'est cette densité moyenne qui est reportée en fonction de la déformation sur la figure 6-34.

On remarque sur la figure 6-35 que, à mesure que la déformation augmente la densité devient plus grande dans la partie centrale de l'échantillon qu'à ses extrémités. Cela traduit naturellement le manque d'homogénéité du champ de déformation mais il est tout de même remarquable que ce comportement soit inverse de celui d'un sable de même porosité (WACK, 1968).

Afin d'obtenir des mesures plus ponctuelles, nous avons découpé dans une autre série d'échantillons déformés à 40 % une lame de 1 cm d'épaisseur environ par échantillon, pour 4 pressions de confinement différentes. Nous avons ainsi déterminé le champ de densité en effectuant des mesures réparties suivant une maille de 5 mm (DESSENNE et WACK, 1969). Les résultats sont représentés sur la figure 6-36 où nous avons fait figurer tous les points expérimentaux, affectés d'un nombre égal à la partie décimale de la densité arrondie à deux chiffres. Nous avons aussi tracé les courbes isodensités.

Nous constatons que dans la zone centrale la densité est la plus élevée ; ceci est particulièrement visible pour les échantillons déformés sous 100 et 200 bars. Ceci est dû au fait que les contraintes et les déformations sont plus grandes au centre qu'à la périphérie. Ces cartes de densité traduisent bien l'hétérogénéité du champ de déformation.

Sur la figure 6-37 nous comparons les profils de densité obtenus pour une même déformation (40 % et 50 %) mais à des pressions de confinement différentes. Pour les pressions supérieures à 400 bars les profils ont tendance à être plus homogènes, mais la densité devient légèrement plus faible aux extrémités qu'au centre. Naturellement pour une même déformation, l'augmentation de densité est d'autant plus importante que la pression de confinement est plus élevée.

Malgré l'hétérogénéité de la déformation et de la densité la variation de la densité moyenne (fig. 6-34) garde sa signification puisque les densités au centre et aux extrémités varient dans le même sens, c'est-à-dire qu'elles augmentent toujours d'un profil au suivant.

Toutefois nous indiquons sur la figure 6-34, à côté de la variation de densité moyenne, la variation de densité de la zone centrale : celles-ci ne diffèrent de façon appréciable que pour des déformations supérieures à 30 %.

L'augmentation de densité de la craie soumise à un champ de contrainte triaxial s'explique par sa structure lâche compressible et par la faiblesse des liaisons des particules. La rupture des amas provoque le remplissage partiel des vides. La planche 6.4 montre l'aspect qu'offre au microscope électronique à balayage une craie déformée de 33 % sous une pression de confinement de 900 bars. La structure diffère considérablement de celle que nous avons observée sur un échantillon non déformé (Pl. 4.2 et 4.3). En particulier on ne distingue plus de vides importants limités par des amas de plaquettes de coccolithes.

L'augmentation de densité d'une roche poreuse soumise à une compression triaxiale n'est cependant pas générale. En particulier quelques essais effectués sur le minerai de fer lorrain ayant une porosité de 20 % ont montré que la densité pouvait diminuer si la nature du squelette de la roche et sa granulométrie n'autorisent pas la déformation sans dilatation de l'assemblage des grains (DESSENNE et WACK, 1969).

6.5.3.6. Résistance des échantillons déformés

Nous avons mesuré la résistance à la compression simple des sept échantillons précédents déformés à 50 %. Bien entendu l'éclatement voisin de 1 et la forme de l'échantillon ne satisfont pas les normes requises pour un essai de compression simple. De plus, à la différence des autres essais de compression, ceux-ci ont été effectués à vitesse de déformation constante, soit 0,2 mm/mn.

Si la valeur absolue des résistances à la compression n'offre aucun intérêt, la comparaison entre ces résistances devient significative si on les relie à la densité ou à la porosité des échantillons (fig. 6-37_{bis}).

La résistance augmente très rapidement avec la densité. Ce résultat est intéressant parce qu'il concerne une même roche.

6.5.3.7. Effet de l'eau. Plasticité

Si la saturation en eau modifie le comportement de la craie en compression simple, elle le modifie encore plus en compression triaxiale.

Nous n'avons malheureusement pas pu effectuer des essais drainés car un drainage convenable de la craie, surtout si elle est comprimée, est très difficile à obtenir et exige l'immobilisation du matériel d'essai et de mesure pendant un temps très long.

Ainsi la faible perméabilité de la craie nous a pratiquement obligé à faire des essais non drainés auxquels se rapportent les résultats suivants.

Une courbe de déformation longitudinale sous contrainte isotrope est représentée sur la figure 6-38. Sur cette même figure un cartouche compare la craie sèche à la craie saturée dans les mêmes conditions. Une remarque s'impose : le module isotrope E_x de la craie saturée, presque 10 fois plus faible que celui de la craie sèche au début de la courbe, varie en sens inverse et augmente progressivement jusqu'à atteindre une valeur semblable à celle du module de compression simple.

En suivant le chemin déviatoire, la résistance augmente avec la pression de confinement (fig. 6-39) mais le module, dans la phase élastique, demeure du même ordre de grandeur que le module en compression simple.

La fin de la phase élastique se traduit par une diminution rapide du module qui conduit soit à la rupture par séparation (deux ou plusieurs morceaux) pour des pressions de confinement inférieures à 15 bars soit à un palier de déformation infinie pour des pressions de confinement supérieures.

Ce palier est particulièrement bien visible sur la figure 6-40. L'aspect des échantillons sortis de la cellule, après avoir atteint le palier, n'offre trace d'aucune rupture, d'aucun plan de cisaillement. La déformation se fait par rupture des liaisons intergranulaires et glissement des particules les unes sur les autres.

Cette rupture est acquise à la limite élastique c'est-à-dire au coude de la courbe effort-déformation et la structure du matériau reste à peu près constante au cours du palier comme l'atteste l'identité des modules au cours de la remontée des cycles (fig. 6-40). Le sommet de chaque cycle retrouve d'ailleurs le même palier.

La modification du matériau après la limite élastique est mise en évidence par la comparaison des modules avant 13 500 bars, et après, 2 500 bars.

La présence de l'eau non drainée s'oppose à toute variation de volume, c'est-à-dire à une diminution du volume des vides. Il n'y a pas d'écrouissage ou de durcissement comme c'était le cas pour la craie sèche entre la phase élastique et le palier de pseudo-plasticité.

L'absence de variation de volume et de plans de déformation privilégiés permet d'affirmer, dans le cas de la craie saturée, que le palier traduit un comportement purement plastique.

Les cercles de Mohr correspondant aux valeurs maximales de σ_1 (rupture ou palier) permettent de faire la distinction entre la rupture par séparation et le seuil de plasticité. Les angles de frottements ϕ sont compris entre 30° et 40° pour le premier critère et 10° pour le deuxième critère. La cohésion peut varier de 5 à 10 bars.

On remarquera que nous avons préféré tracer deux critères linéaires plutôt qu'une seule et même enveloppe plus ou moins parabolique.

6.6. COMPORTEMENT SOUS EFFORT DE CISAILLEMENT DIRECT

Dans le but de déterminer plus rapidement et plus facilement qu'à l'appareil triaxial la relation $\sigma - \tau$ nous avons effectué quelques essais de cisaillement direct soit dans la boîte à double cisaillement imaginée par LUNDBORG (1966) soit dans la machine de la S. E. I. L. (voir chapitre 5).

Les essais de cisaillement permettent aussi de déterminer avec plus de précision le début de la courbe intrinsèque.

La grande différence entre un essai triaxial et un essai de cisaillement direct vient du fait que dans le premier cas le cisaillement de l'échantillon est libre tandis que dans le second cas il est imposé. Il peut en résulter certaines différences dans les résultats.

Toutefois nous allons voir que dans l'ensemble les résultats sont concordants. Les figures 6-42 a et b donnent les variations de la résistance maximale au cisaillement $\tau_{\max}$ en fonction de la contrainte normale dans le cas des essais de double cisaillement.

On note évidemment une différence importante entre échantillons saturés et échantillons secs. Pour les deux prélèvements auxquels correspondent les deux figures les cohésions sont les suivantes :

	Craie sèche	Craie saturée
PM 180	22 bars	13 bars
PM 300	20 bars	10 bars

Les courbes intrinsèques obtenues au triaxial (fig. 6-29 et 6-41) permettent d'apprécier cette cohésion en interpolant entre les cercles de traction et de compression monoaxiales. On obtient indépendamment du lieu de prélèvement les valeurs approximatives suivantes :

	Craie sèche	Craie saturée
Cohésion C	20 bars	5 à 10 bars

Le coefficient de frottement $\mu = \operatorname{tg} \phi$ varie avec la contrainte beaucoup plus vite pour la craie saturée que pour la craie sèche :

	$0 < \sigma_n < 10 \text{ bars}$	$10 \text{ bars} < \sigma_n < 40 \text{ bars}$	$\sigma_n > 40 \text{ bars}$
Craie sèche	$0,6 < \mu < 0,8$	$\mu \simeq 0,5$	$\mu \simeq 0,5$
Craie saturée	$\mu \simeq 1,0$	$0,3 < \mu < 0,2$	$\mu \simeq 0$

La ductilité de la craie saturée à partir de $\sigma_n = 40$ bars est bien mise en évidence et on peut la caractériser comme les argiles ou les métaux mous par un critère de Tresca :

PM 180	$\tau = 30$ bars
PM 300	$\tau = 35$ bars

On peut remarquer que cette valeur place la craie saturée entre l'argile et l'aluminium :

Critère de Tresca

argile	< 1 bar
craie saturée	$\simeq 30$ bars
aluminium	$\simeq 100$ bars.

Enfin à l'aide de la machine de cisaillement simple type Casagrande (machine S. E. I. L.) nous avons étudié partiellement le glissement bloc sur bloc de la craie saturée, c'est-à-dire le cisaillement d'une surface de discontinuité préexistante. Les surfaces en contact des deux prismes ont été simplement rectifiées à la meule. Les dimensions sont indiquées sur la figure 6-43. Les mêmes blocs glissant sur la même surface ont été utilisés pour 3 essais sous les contraintes normales successives :

$$\sigma_n = 4, 8 \text{ et } 12 \text{ bars.}$$

Afin que la surface de contact reste constante pendant l'essai le bloc inférieur offrait une surface plus grande que celle du bloc supérieur.

Les courbes de déplacement en fonction de la contrainte de cisaillement τ sont représentées sur la figure 6-43. La vitesse de déplacement est constante soit 1,2 mm/mn. On note pour $\sigma_n = 4$ bars un pic très peu marqué qui disparaît totalement pour les contraintes normales supérieures. La figure 6-44 donne la relation $\tau_{\max}, \sigma_n$ qui, comme on pouvait s'y attendre, est linéaire. Pour les trois contraintes σ_n envisagées la loi de rupture satisfait au critère de Coulomb :

$$\tau = C + \mu \sigma_n$$

Par extrapolation on peut évaluer la cohésion C :

$$C \simeq 2 \text{ bars}$$

L'angle de frottement ϕ est de 29° et le coefficient de frottement $\mu = \tan \phi = 0,56$. La loi de frottement de la craie saturée sur une surface de discontinuité plane est donc, dans le domaine de contrainte envisagé :

$$\tau = 2 + 0,56 \sigma$$

6.7. INFLUENCE DU TEMPS

La pente et la courbure de la courbe de compression monoaxiale des roches en général et de la craie en particulier dépendent de la vitesse de chargement. Nous avons déjà noté, lors de l'étude du comportement en compression monoaxiale, qu'une certaine viscosité était responsable de l'hystérésis des cycles effort-déformation.

Et comme l'hystérésis est beaucoup plus marqué pour la craie saturée que pour la craie sèche, cette influence du temps est à rapprocher de la faible perméabilité du matériau.

Dans le but d'étudier l'influence de ce facteur nous avons effectué des essais de compression monoaxiale sous charge constante, sur plusieurs séries d'éprouvettes saturées de diamètre 100 mm et de hauteur 200 mm.

Le principe de l'essai est d'appliquer une charge donnée le plus rapidement possible et de mesurer la déformation en fonction du temps, la charge étant maintenue constante (fig. 6-45). On appelle déformation "instantanée" ϵ_i la déformation acquise pendant la mise en charge, et déformation différée ϵ_d la déformation acquise au bout d'un temps donné à charge constante. Par suppression de la sollicitation une certaine partie de la déformation est récupérée. On appelle recouvrance instantanée ϵ_{ri} la déformation récupérée à la décharge et recouvrance différée la déformation récupérée au bout d'un temps donné après la suppression de la sollicitation.

La déformation différée traduit le phénomène de fluage. Nous verrons que le fluage englobe à la fois un comportement visco-élastique et un comportement plastique. En principe le terme de fluage ne s'applique qu'à la fraction non recouvrable de la déformation différée. Nous tenterons, quand cela sera possible, de distinguer le fluage plastique de la déformation visco-élastique.

Les courbes des figures 6-46 et 6-47 montrent l'évolution des déformations longitudinales ϵ , transversales $\bar{\epsilon}$ et de la variation de volume Θ au cours d'une mise en contrainte monoaxiale jusqu'à 32 bars de deux échantillons saturés du PM 480. La contrainte, atteinte en 1 minute, est ensuite maintenue constante pendant 3 heures.

Les déformations se poursuivent et les figures 6-48 et 6-49 représentent leur variation en fonction du temps.

Après la déformation instantanée on observe une augmentation rapide de la déformation mais la vitesse de déformation décroît et après une phase transitoire A cette vitesse devient pratiquement constante, voire nulle pour la déformation transversale.

On a porté sur les mêmes figures les variations du coefficient de Poisson ν et du coefficient de compressibilité θ . Le coefficient de Poisson reste pratiquement constant pendant le fluage. Mais à la décharge il augmente brutalement, dépassant 0,7, ce qui traduit une dilatation du matériau.

L'importance de la déformation différée croît naturellement avec la contrainte. Cette contrainte peut être exprimée sous la forme d'une fraction de la résistance à la compression monoaxiale R_c . Les courbes de la figure 6-50 donnent l'évolution des déformations longitudinales sur une durée de 3 heures pour différentes fractions de la résistance. On remarque que la durée de la phase transitoire augmente avec la fraction de R_c , mais que même pour des fractions élevées on obtient un fluage secondaire linéaire. Au bout de 3 heures aucune courbe n'a atteint la zone de déformation à la rupture située entre 20 et 30 10^{-4} en compression monoaxiale.

La relation entre la déformation différée ϵ_d à 3 heures et la déformation instantanée ϵ_i est mise en évidence sur la figure 6-51. Cette relation n'est pas linéaire. La déformation différée est la somme d'une déformation visco-élastique réversible et d'une déformation plastique permanente. Nous avons pu, pour certaines éprouvettes, mesurer la déformation permanente obtenue au bout d'un temps variable après la décharge. Ces mesures montrent bien que la part de la déformation plastique croît très vite quand la déformation instantanée dépasse le seuil de $\epsilon_i = 9 \cdot 10^{-4}$ ce qui correspond à un niveau de contrainte voisin de $0,7 R_c$ (fig. 6-51).

Si nous revenons à la figure 6-50 nous pouvons encore observer que, si le fluage secondaire est sensiblement linéaire, sa vitesse croît avec la fraction de R_c . La figure 6-52 indique précisément cette croissance qui présente un coude caractéristique au niveau de $0,5 R_c$. Au-dessous de ce point la vitesse de déformation $\dot{\epsilon}$ est faible et varie peu avec la fraction de R_c , au-delà elle augmente au contraire très vite avec la contrainte suivant une loi linéaire et il ne paraît pas possible de maintenir indéfiniment des charges supérieures à $0,6 R_c$.

Il nous a paru également intéressant de mesurer l'évolution de la résistance en compression monoaxiale après le fluage de 3 heures. Pour cela nous avons évalué le rapport de la résistance effective après fluage à la résistance supposée avant fluage. La figure 6-53 montre la variation de ce rapport avec la fraction de R_c appliquée pendant le fluage. Pour $0,2 R_c$ l'amélioration du matériau est sensible tandis qu'on observe une dégradation à partir de $0,8 R_c$.

Nous avons également effectué des essais de longue durée (certains ont duré 2 ans). Malgré l'absence de mesures sur une grande période

(tirez) il semble que le fluage soit linéaire pour les fractions de R_c appliquées, qui ne dépassent pas $0,7 R_c$ (fig. 6-54, 6-55 et 6-56). La courbe B 5 de la figure 6-55 montre une rupture différée à 60 jours, après que la déformation ait atteint la zone critique de rupture en compression mono-axiale ($20 \text{ à } 30 \cdot 10^{-4}$).

Au terme de ces essais de fluage la plupart des échantillons étaient fissurés et leur résistance considérablement amoindrie.



Fig. 1 - Compression simple. Rupture.
Courbes: effort-déformation
Mesure de la déformation entre platines.

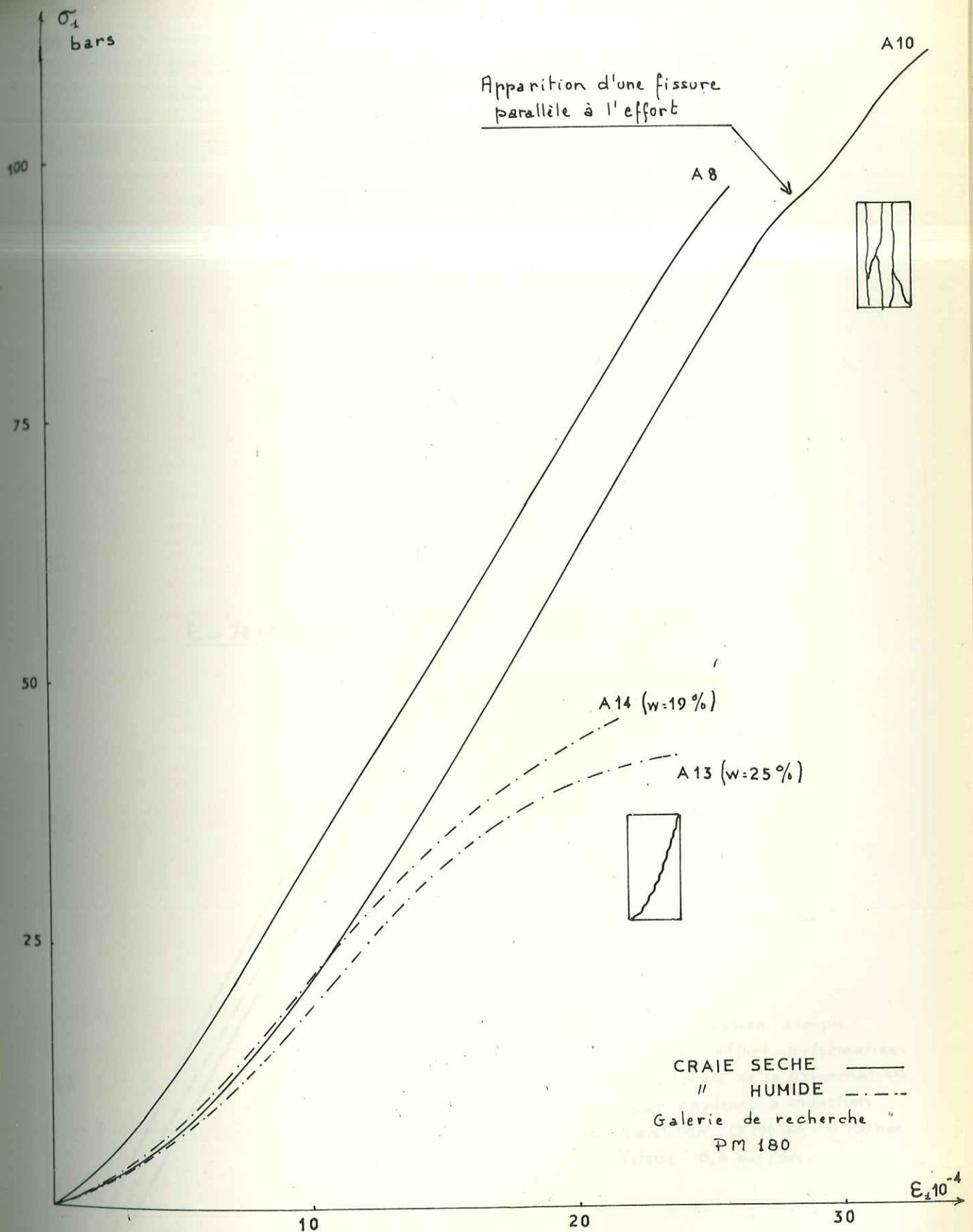


Fig.6-1 Compression simple. Rupture.
Courbes effort-deformation
Mesure de la deformation entre plateaux.

σ_1 bars

- 123 -

Floage 13 mn

50

40

30

$E \approx 70.000$ bars

20

10

CRAIE VENTEUIL
Galerie de recherche
P.M. 180
W = 0%

Fig. 6-2. Compression simple.

Cycles effort-deformation.
Mesure locale de la déformation
par capteurs à induction.

Echantillon $\varnothing 100$ mm - H 100 mm.

Vitesse 0,5 bar/mn.

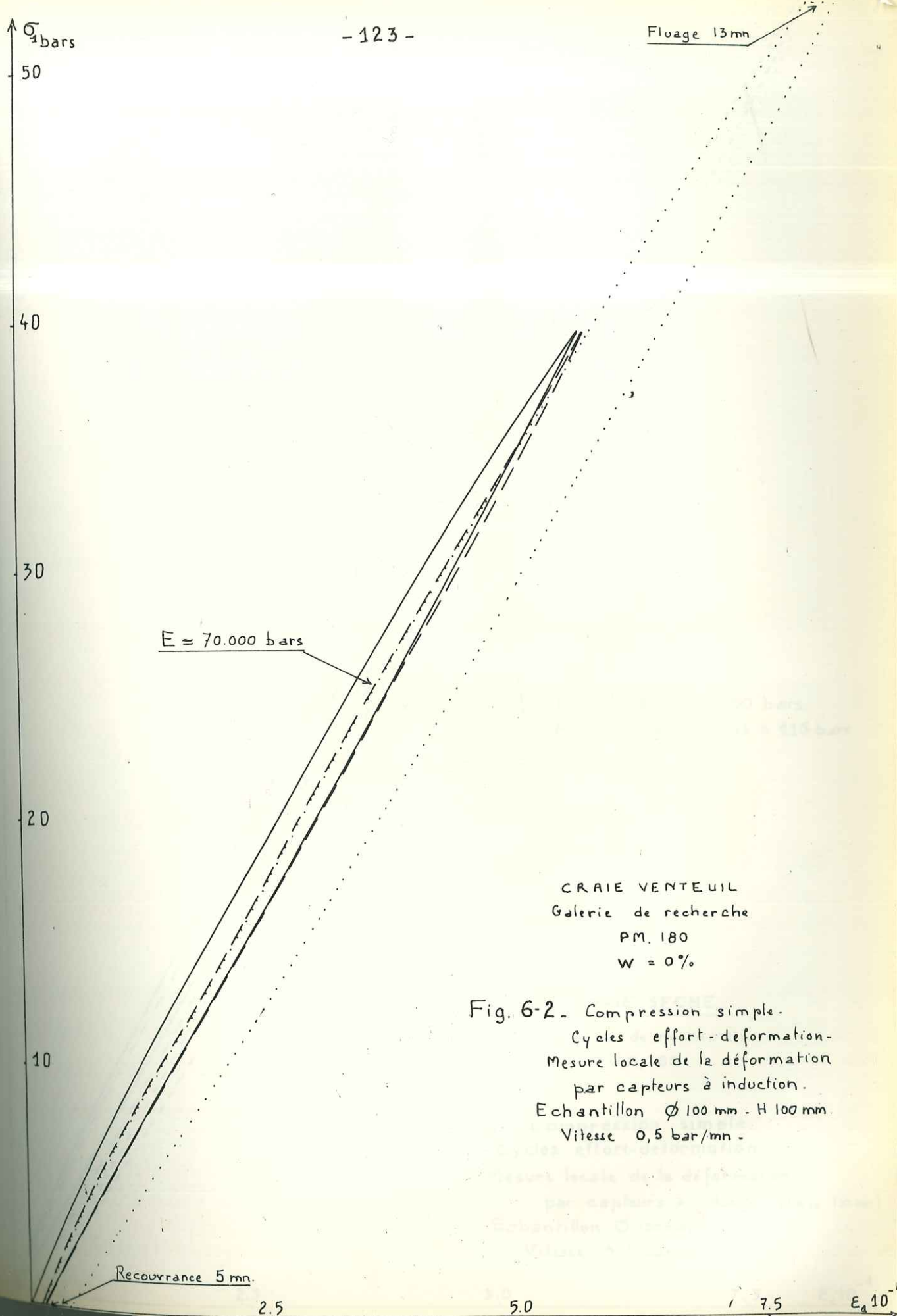
Recouvrance 5 mn.

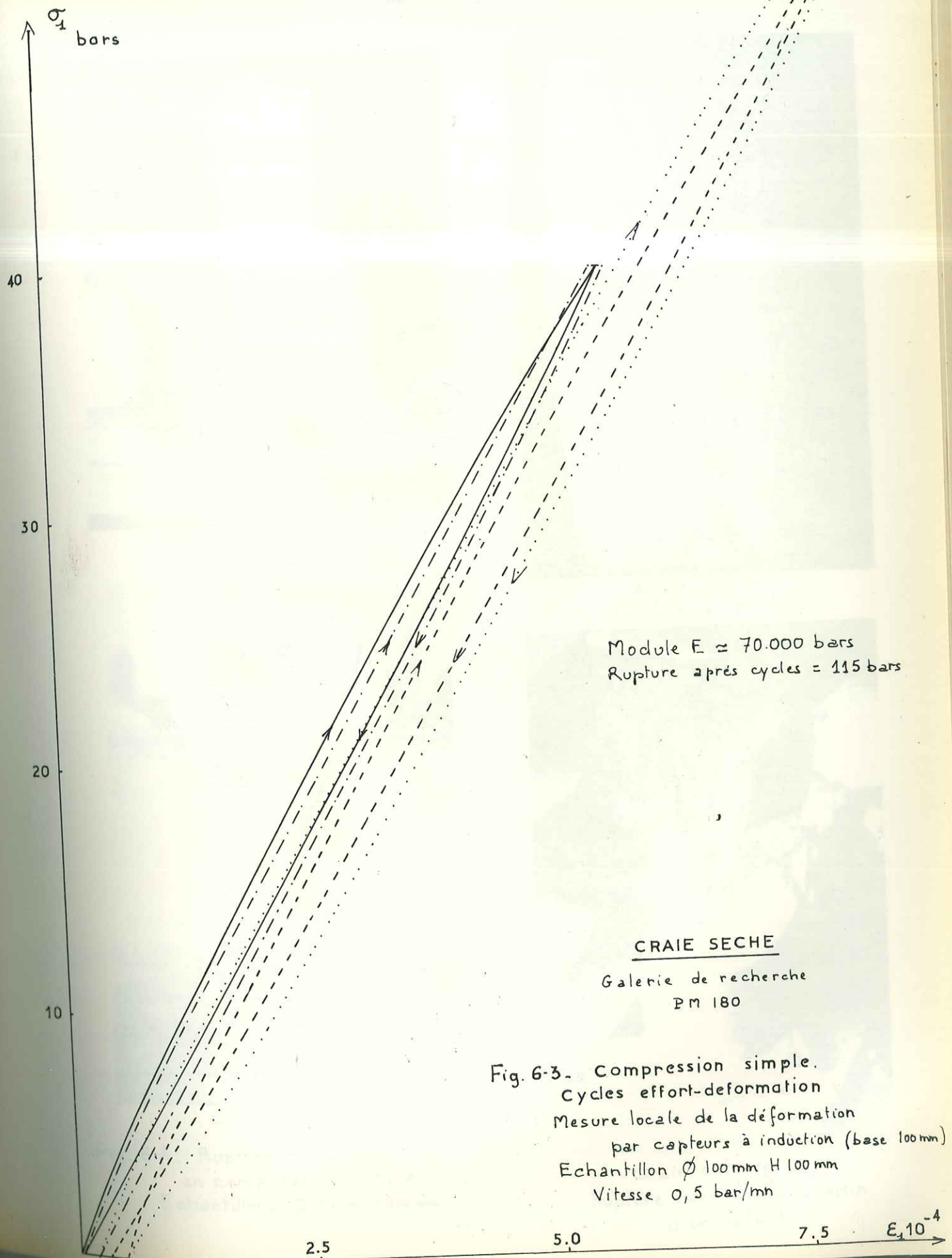
2,5

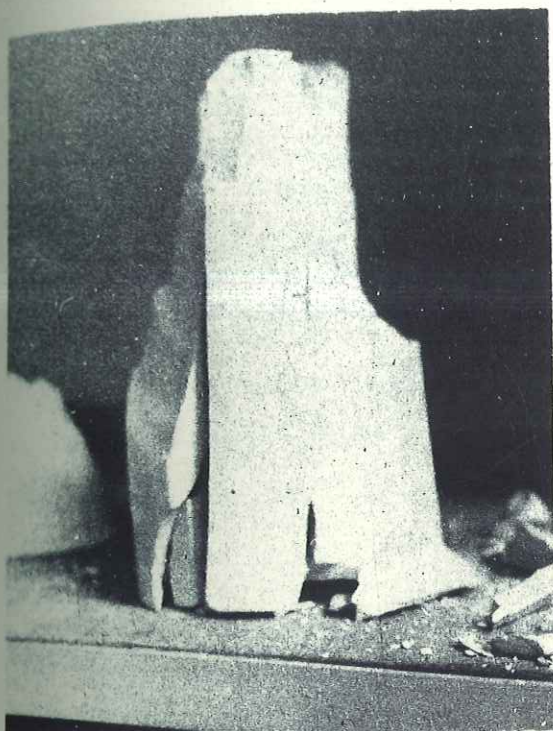
5,0

7,5

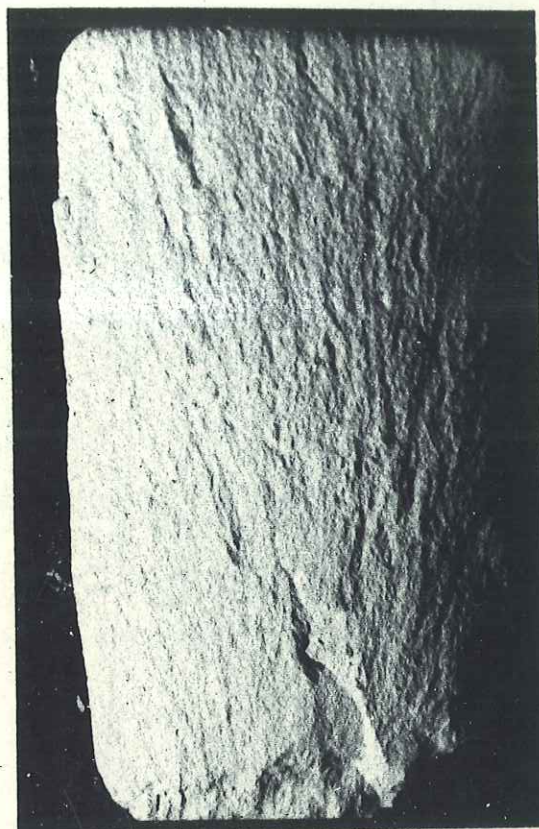
$\epsilon_d 10^{-1}$



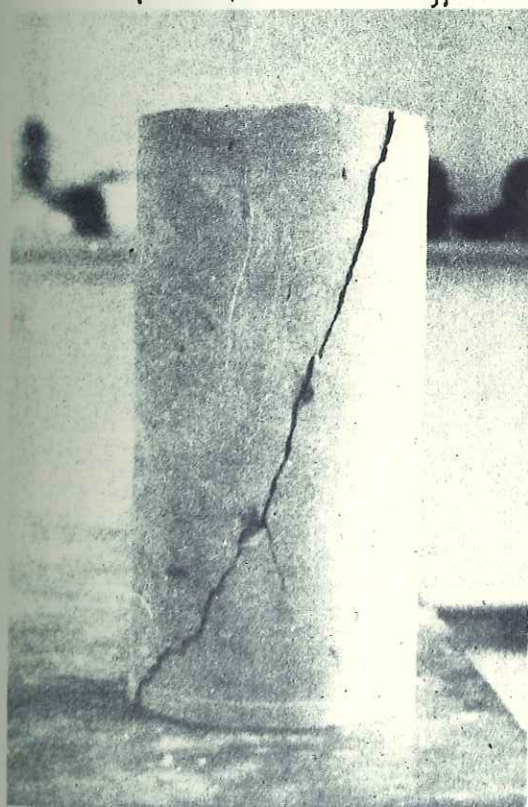




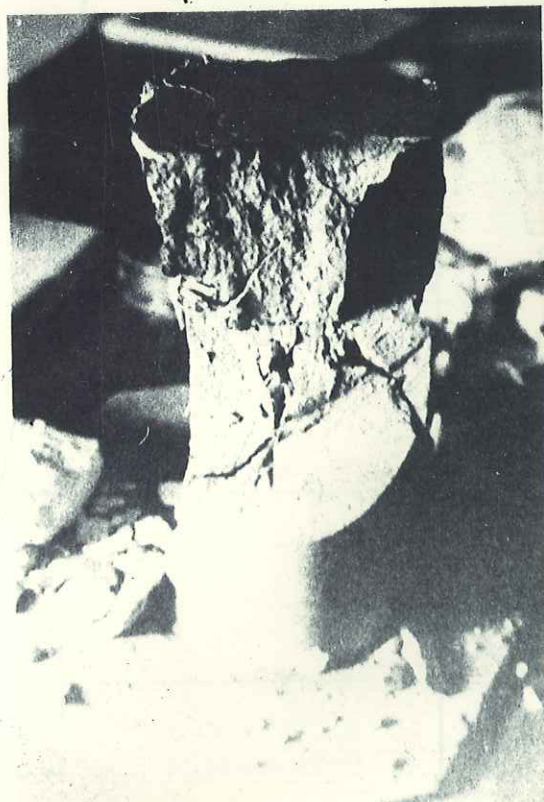
Craie sèche
Rupture parallèle à l'effort



Craie sèche
Rupture à "nerfs"



Craie saturée



Craie saturée
Rupture rayonnante "à partir
d'un défaut"

Fig. 6-4. Rupture de la craie
en compression simple.
Echantillons $\varnothing 100$ mm H 200 mm

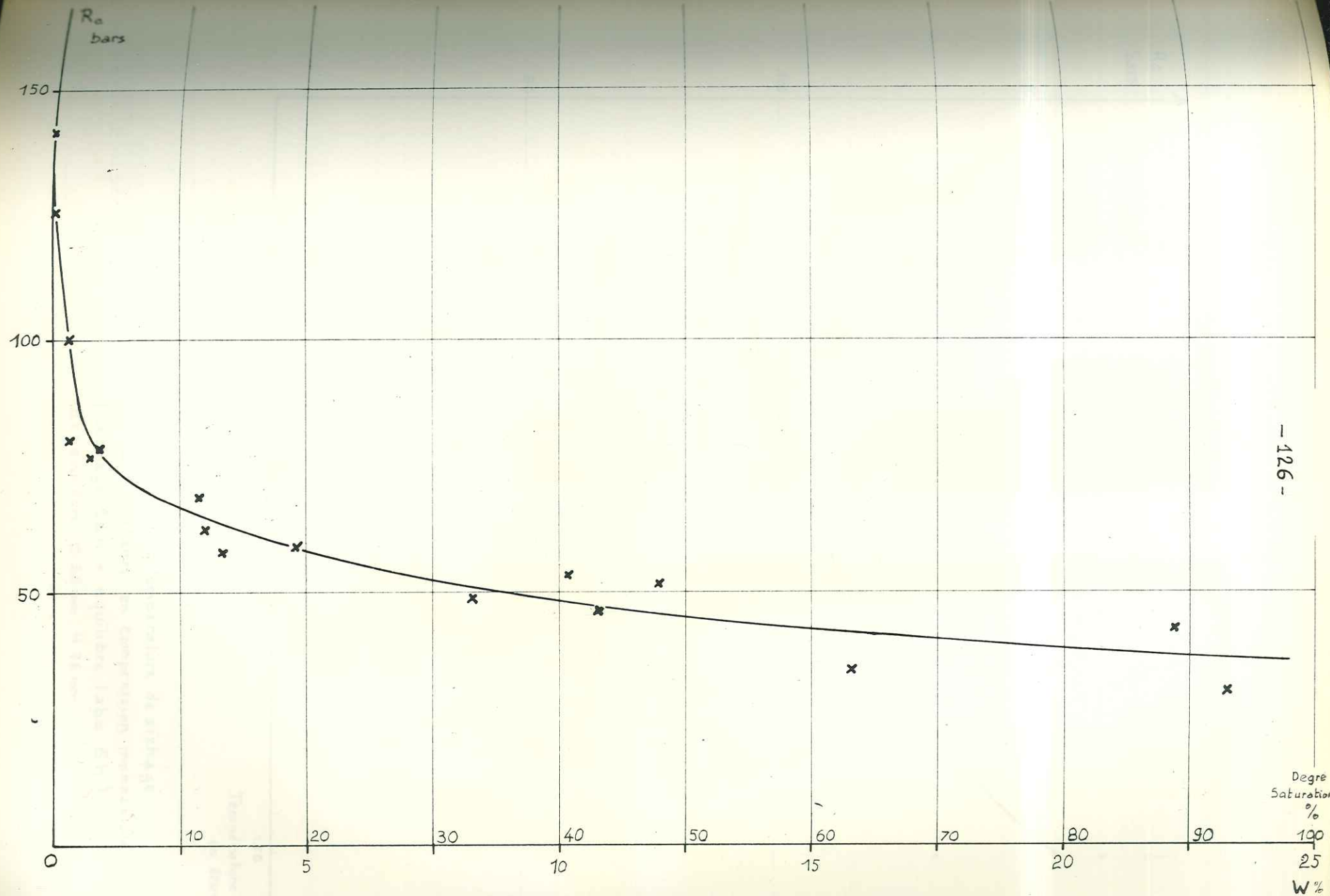


Fig. 6-5. Influence de la teneur en eau sur la resistance en compression monoaxiale.

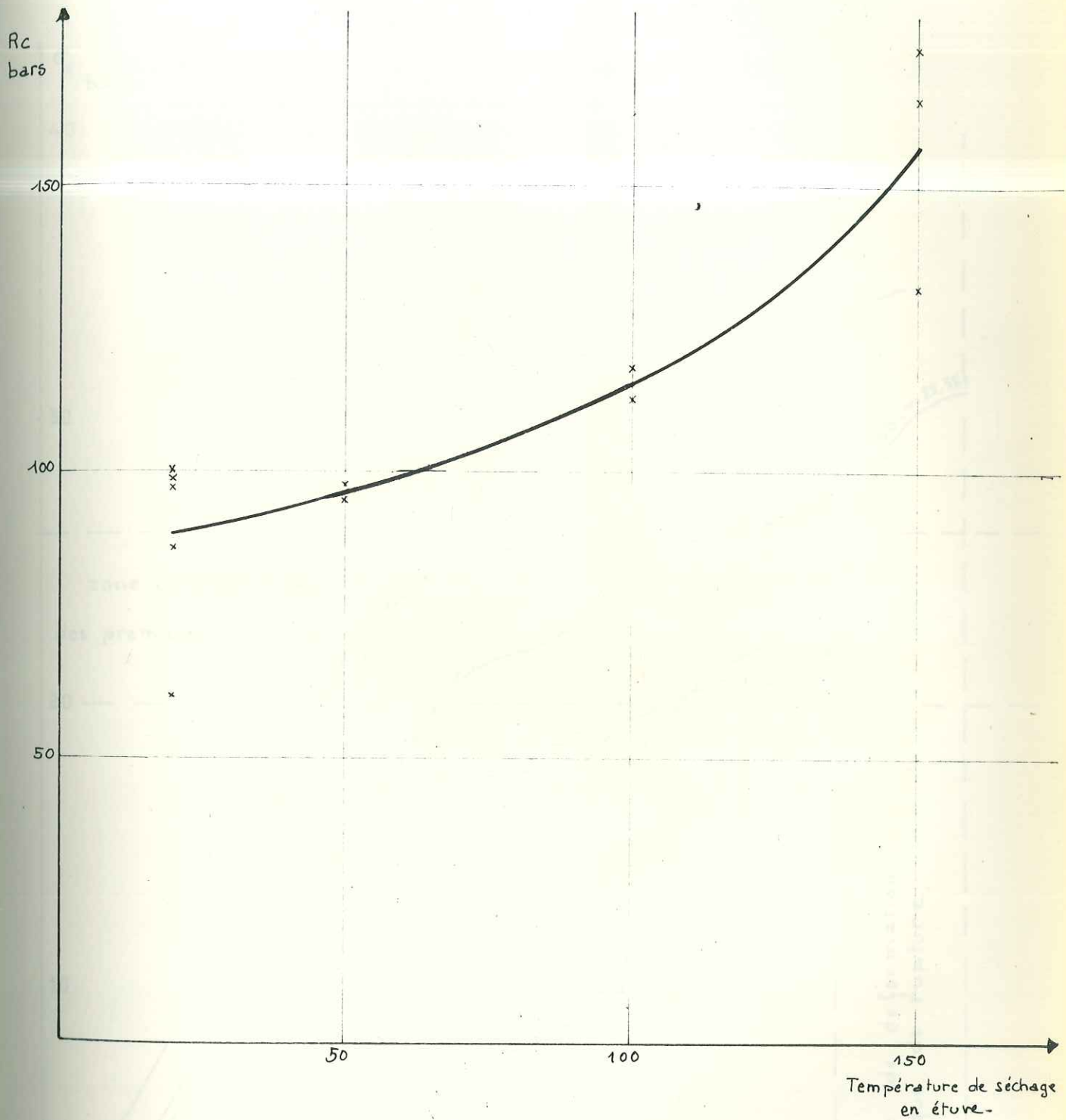
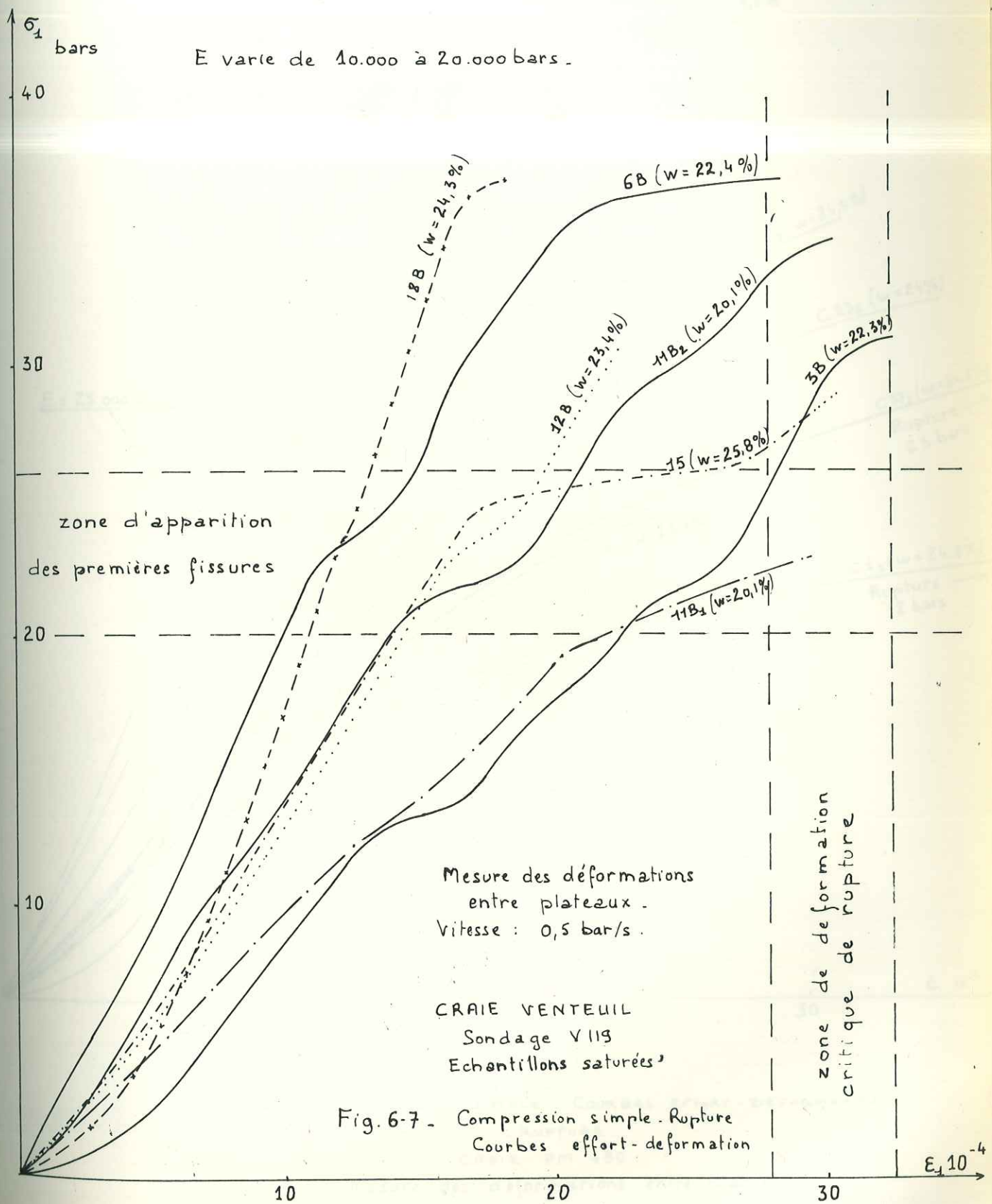


Fig. 6-6. Influence de la température de séchage sur la résistance en compression monoaxiale. (séchage 12 h + équilibre labo 6 h)
Echantillon $\varnothing 38$ mm H 76 mm.



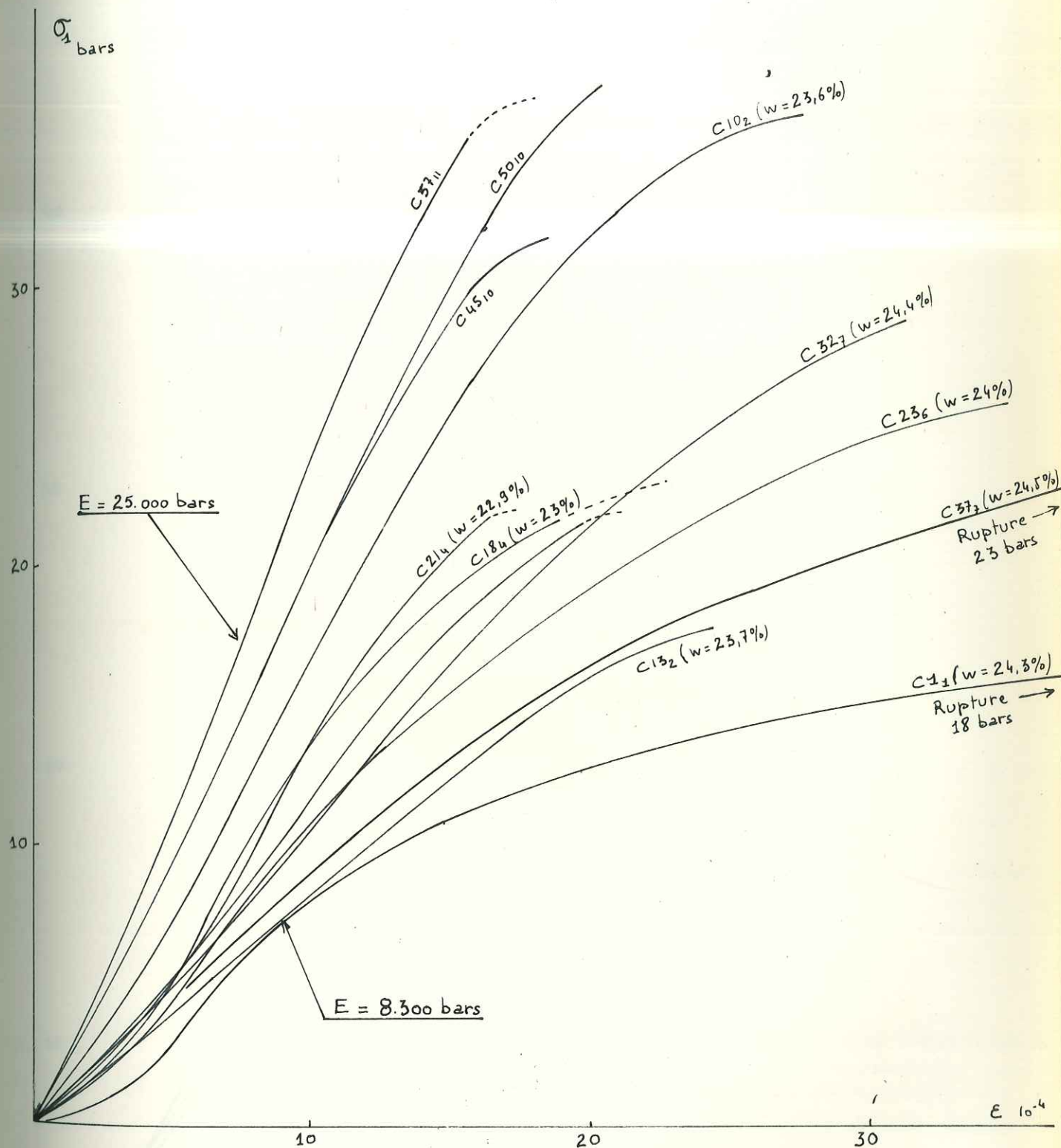


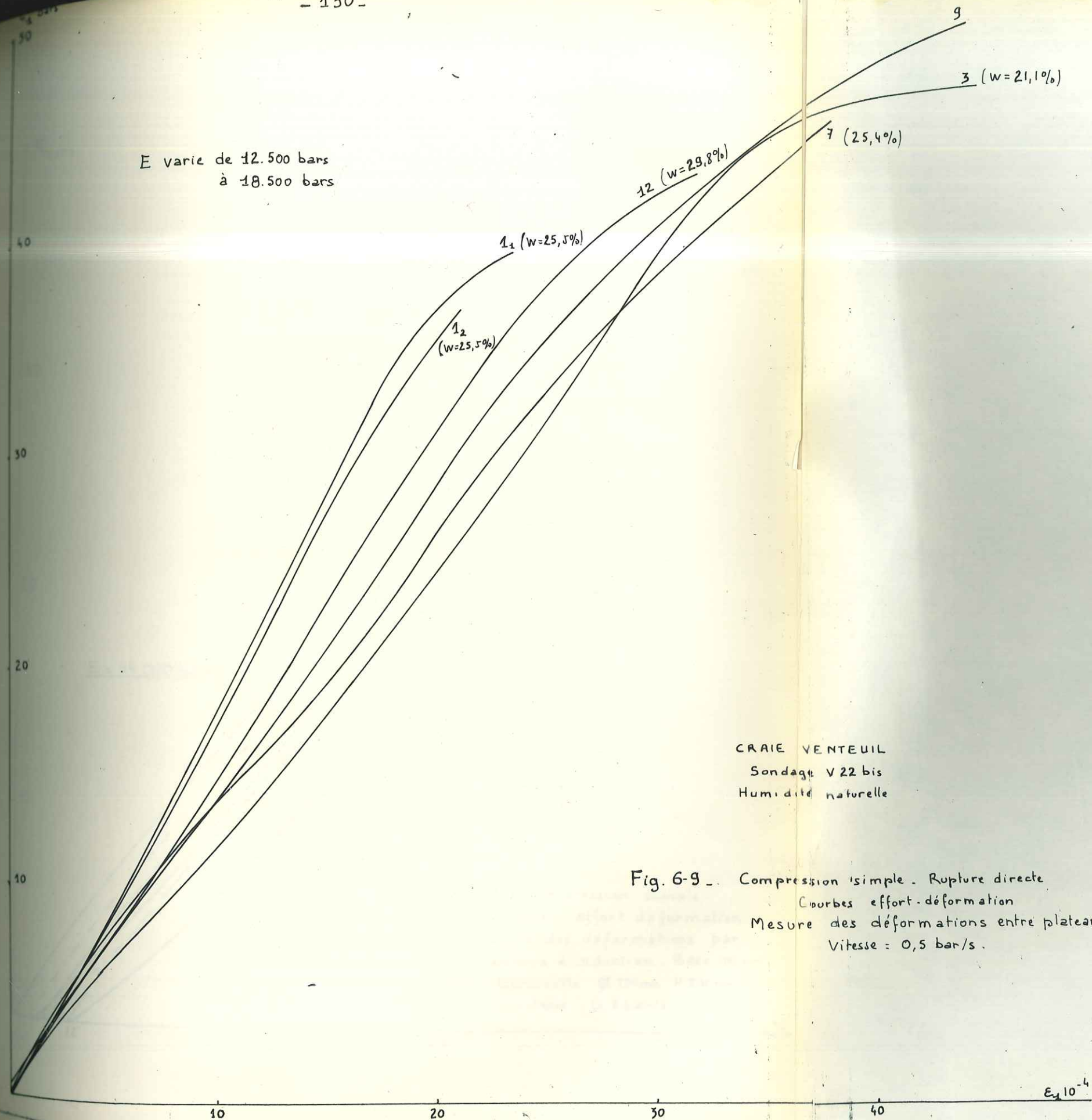
Fig. 6-8. - COMPRESSION SIMPLE. COURBES EFFORT-DEFORMATION
- RUPTURE.

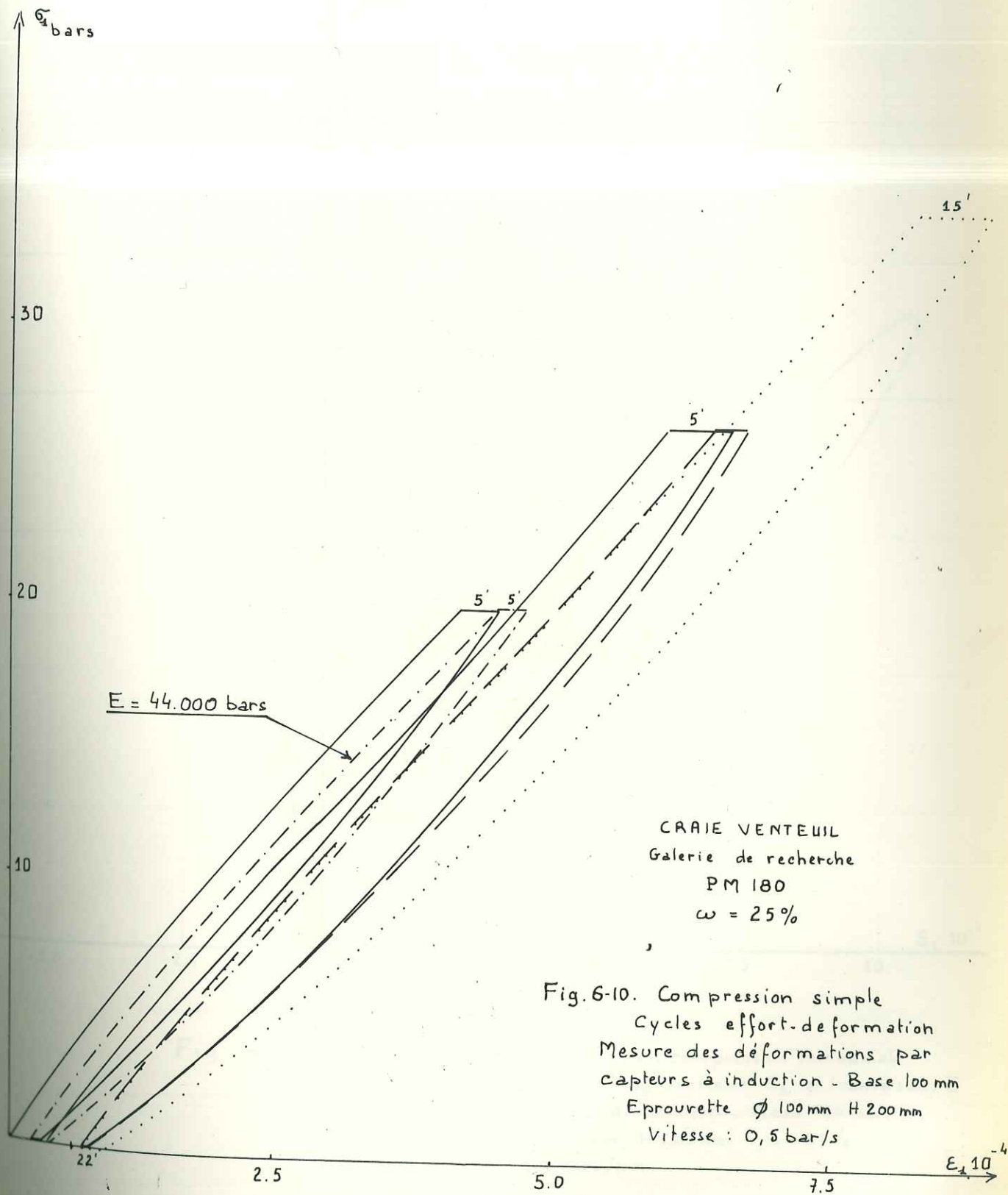
CRAIE PM 480.

Mesure des déformations entre plateaux
par comparateurs.

Vitesse = 0,5 bar/s.

E varie de 12.500 bars
à 18.500 bars





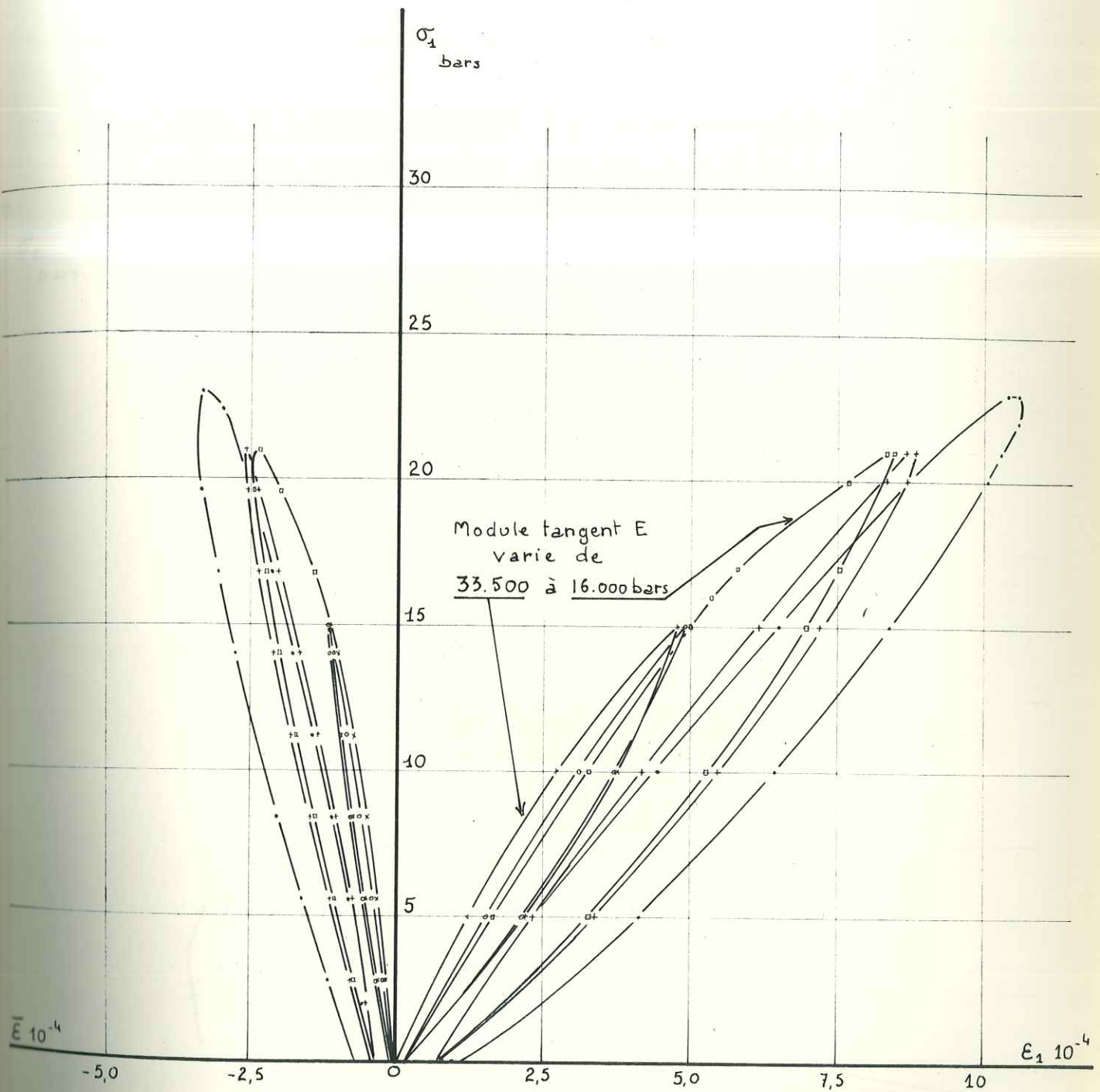


Fig. 6-11. Cycles effort-deformation, en compression monoaxiale.
 Mesure des déformations longitudinales ϵ_1 et transversales $\bar{\epsilon}$
 par capteurs à induction - Base 100 mm.
 Eprouvette ϕ 100 mm H 200 mm - $w = 25\%$
 Vitesse 10 bars/mn.

Le coefficient de Poisson ν varie dans les branches
 montantes de 0,21 à 0,32.

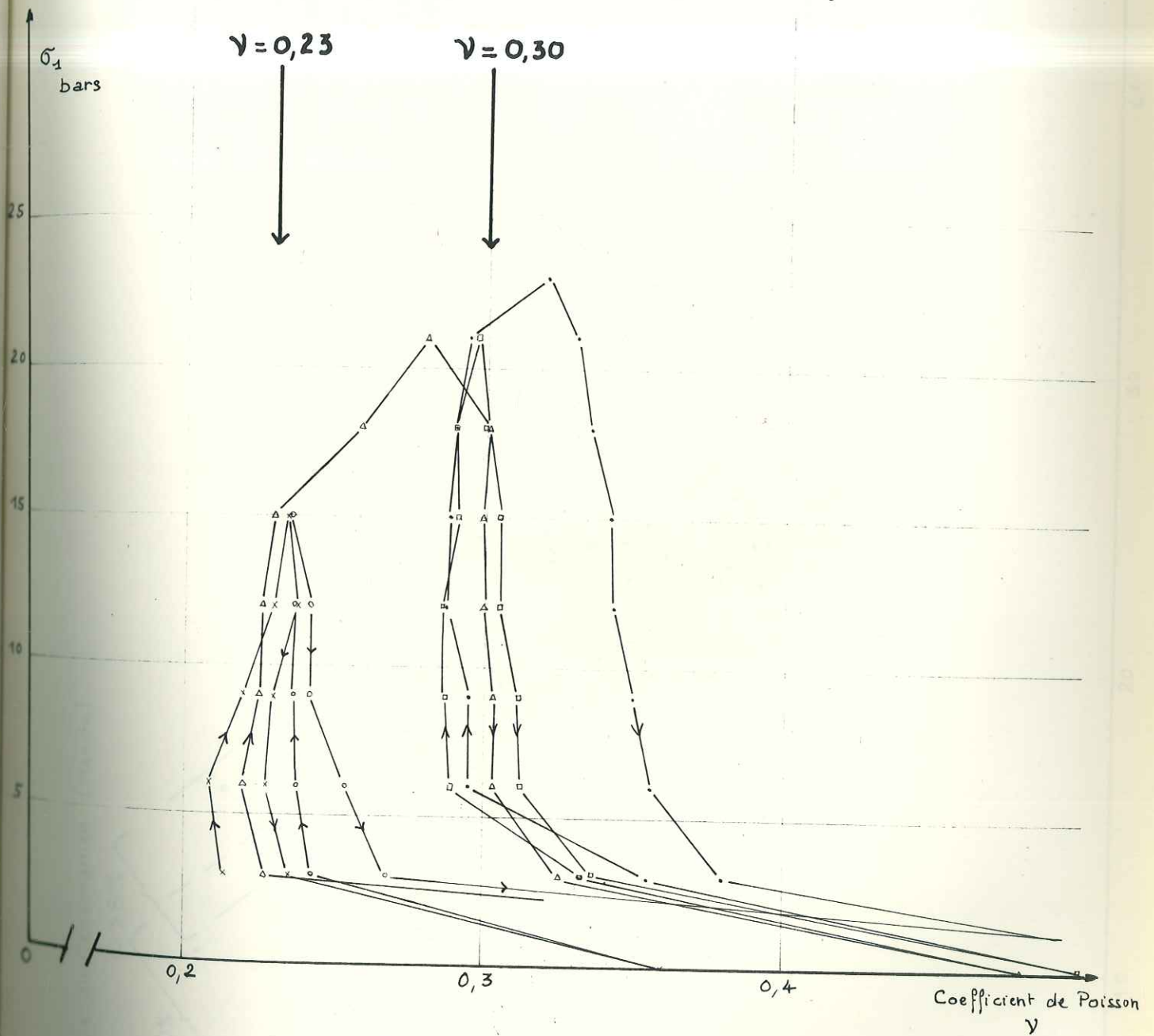


Fig. 6-12. Variation du coefficient de Poisson
au cours des cycles de la figure 6-11.

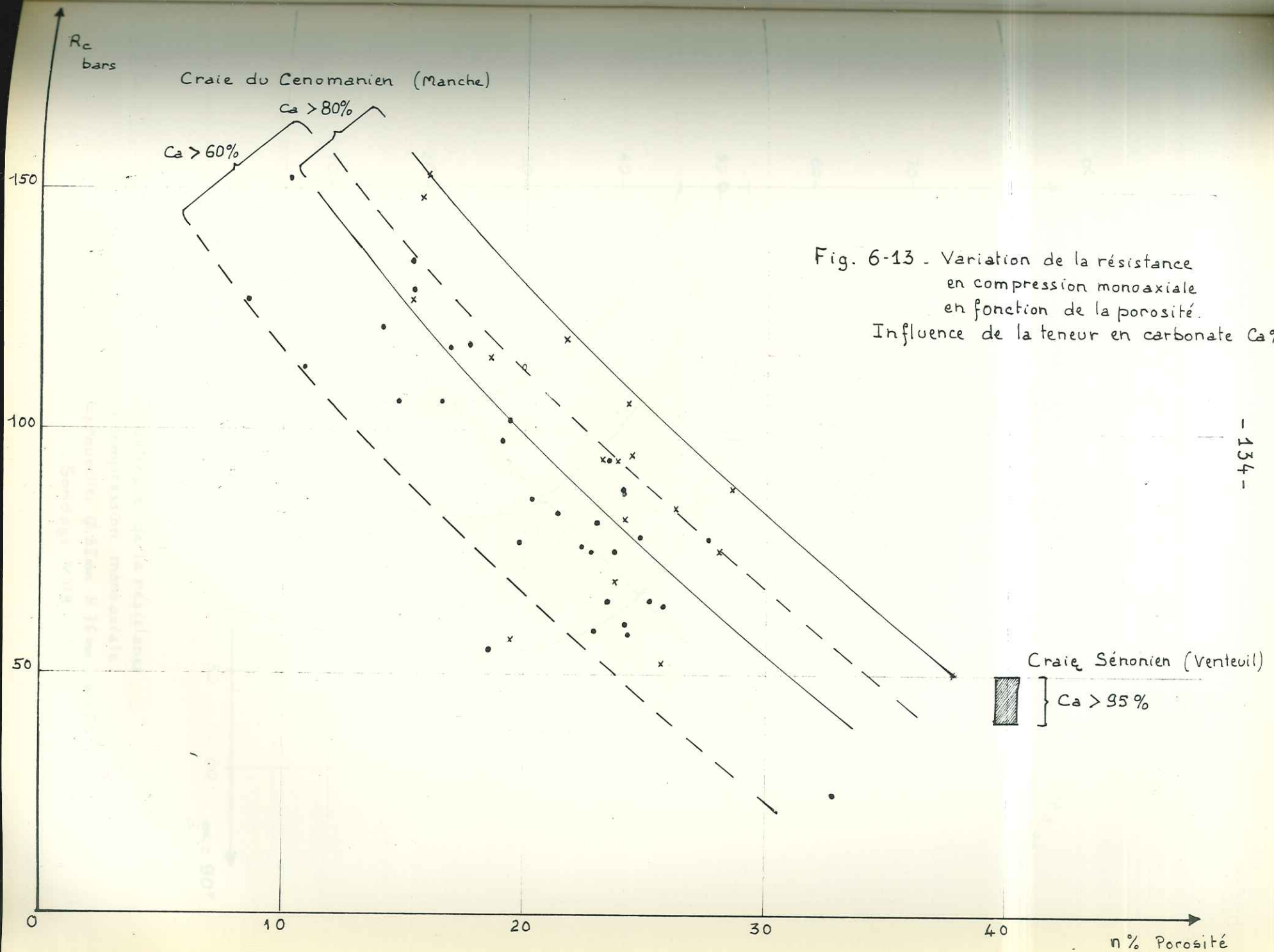


Fig. 6-13 - Variation de la résistance en compression monoaxiale en fonction de la porosité. Influence de la teneur en carbonate $Ca\%$

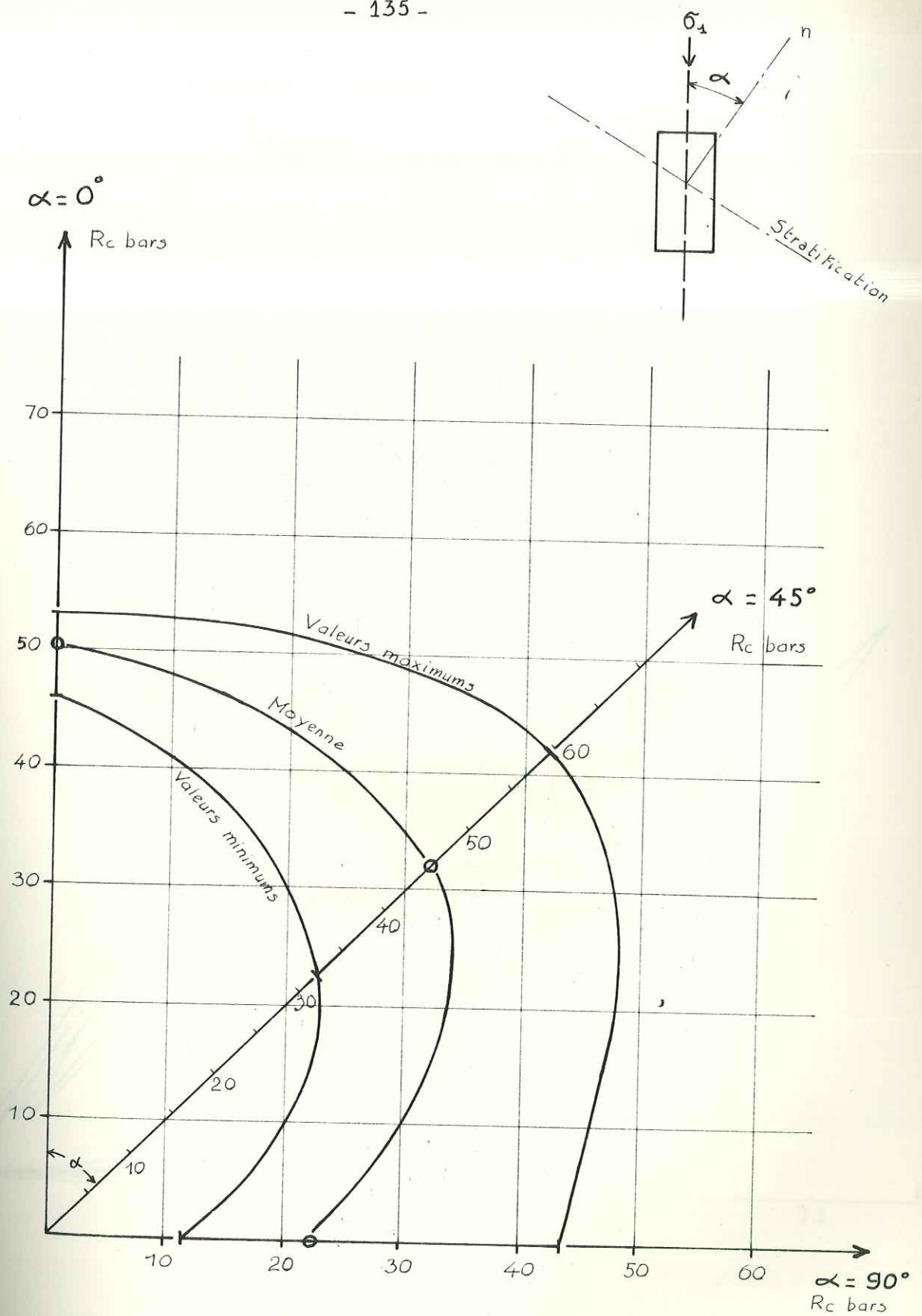


Fig. 6-14. Anisotropie de la résistance en compression monoaxiale.
Eprouvettes $\varnothing 38 \text{ mm}$ H 76 mm - w = 25%
- Sondage V 119 -

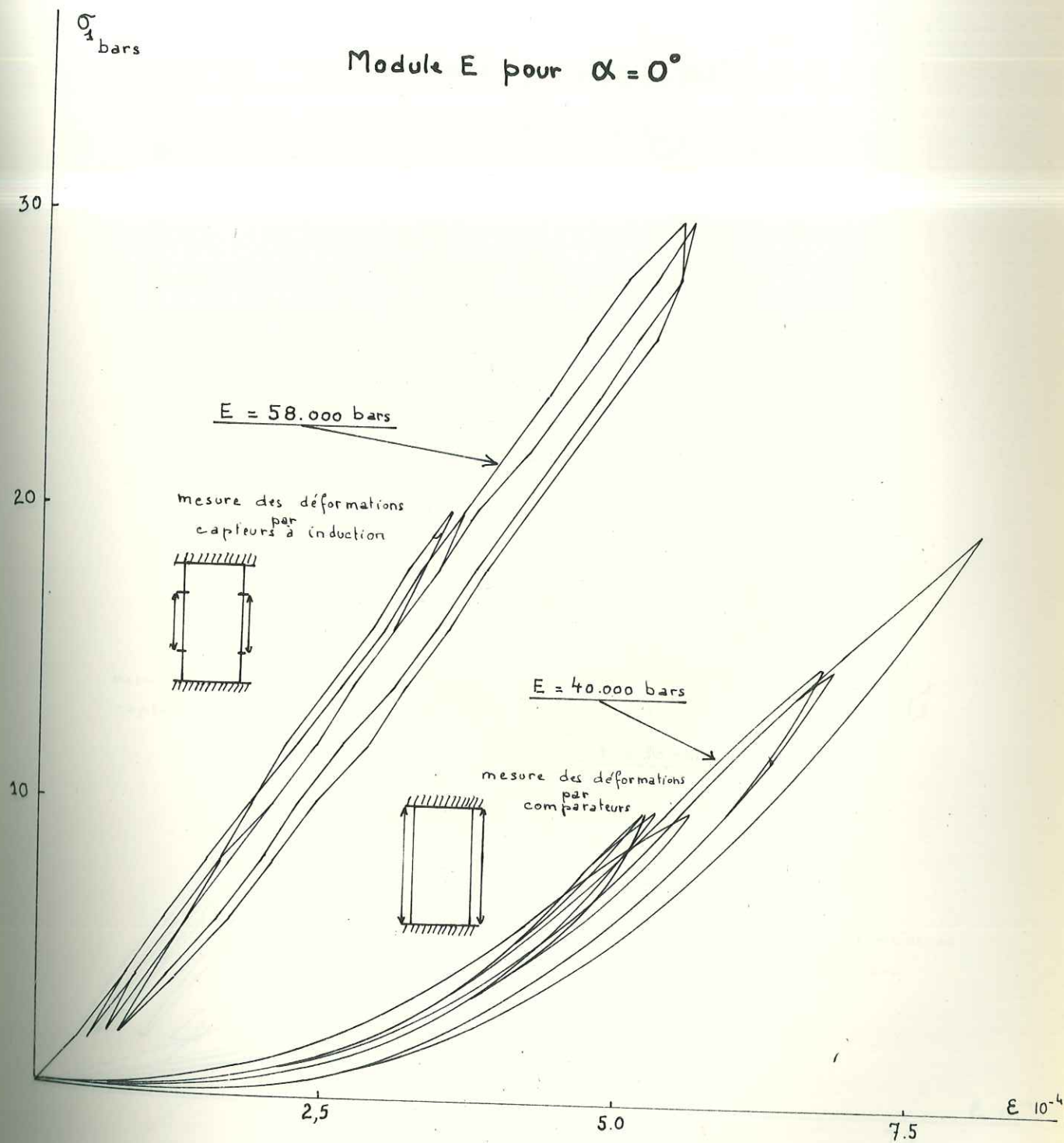


Fig. 6-15- CYCLES EFFORT-DEFORMATION - AXE Z -
CARTE PM 292

Echantillon $\phi 100 \text{ mm}$ H 200 mm . W = 25%
Vitesse 0,5 bar/s -

Module E pour $\alpha = 90^\circ$

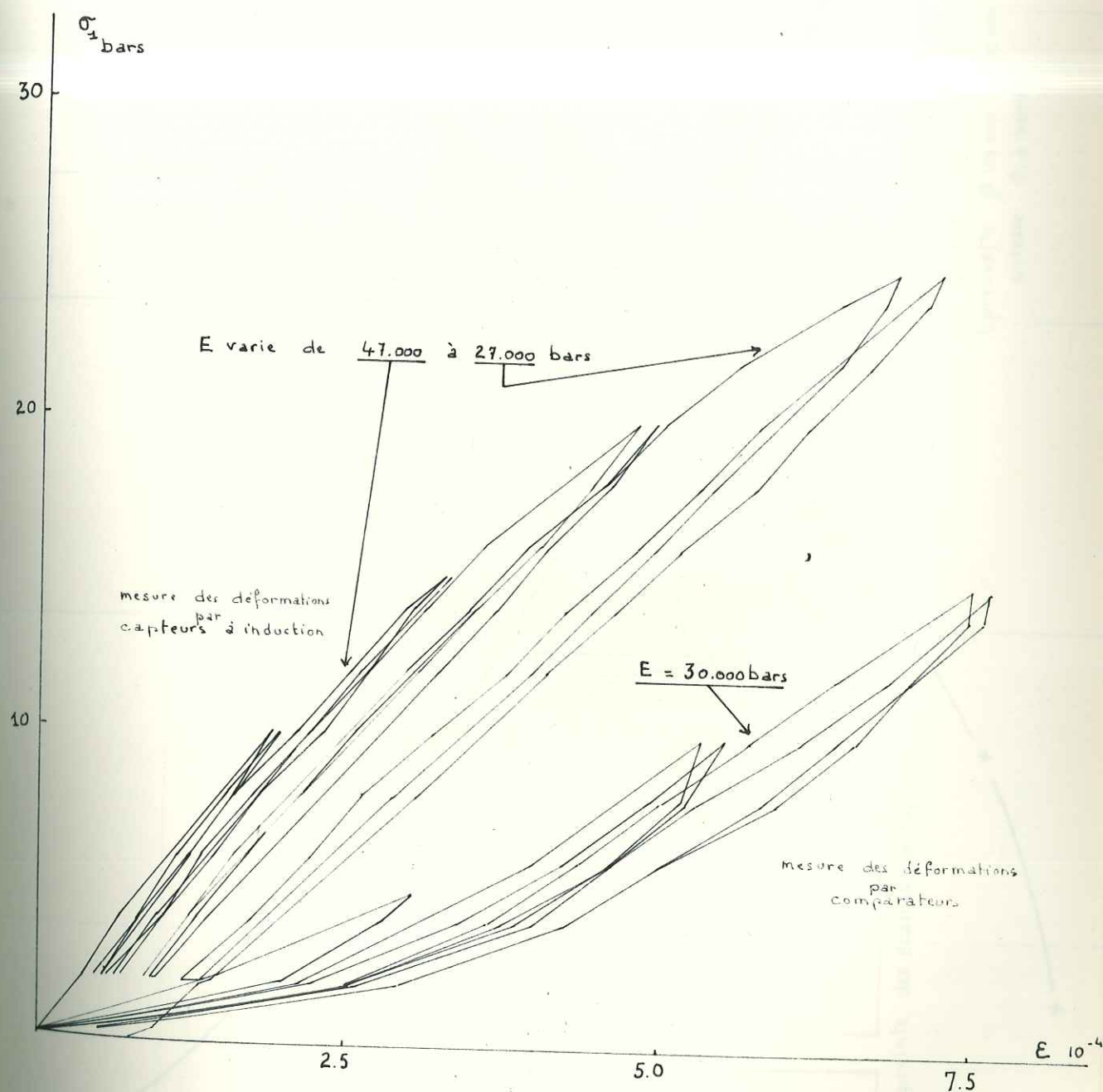


Fig. 6-16 - CYCLES EFFORT-DEFORMATION - AXE X

CRAIE PM 292

Echantillon $\varnothing 100$ mm H 200 mm - W = 25%

Vitesse 0,5 bar/s.

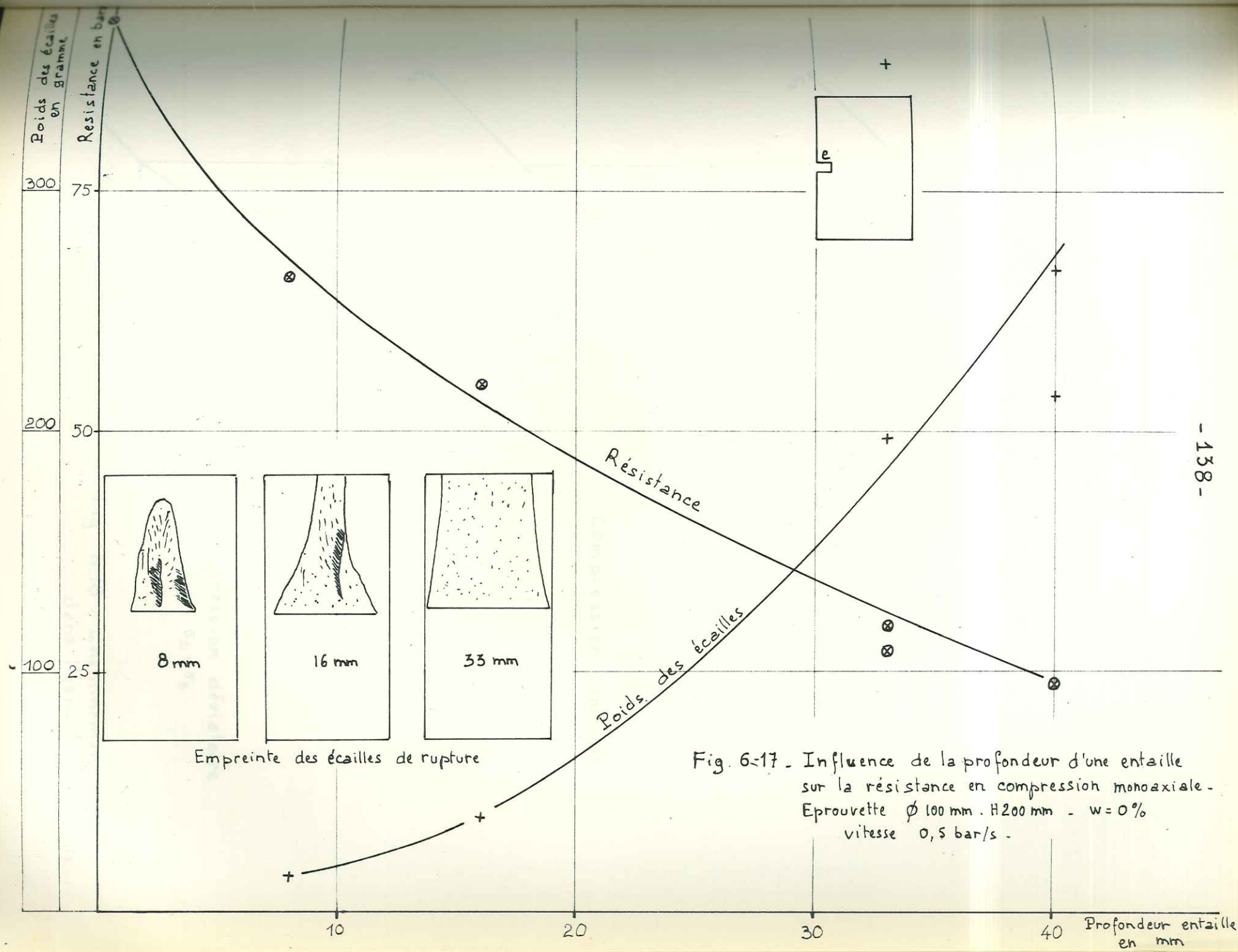
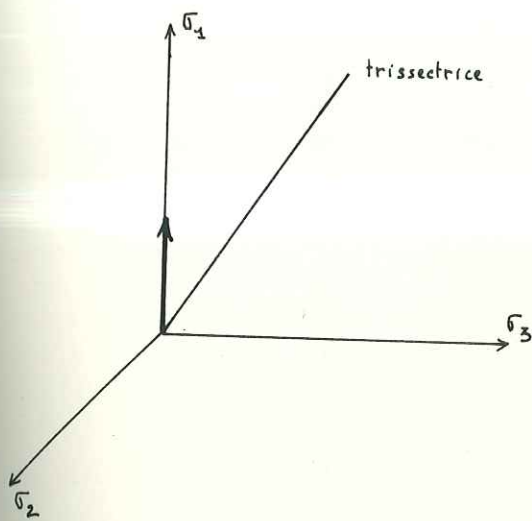
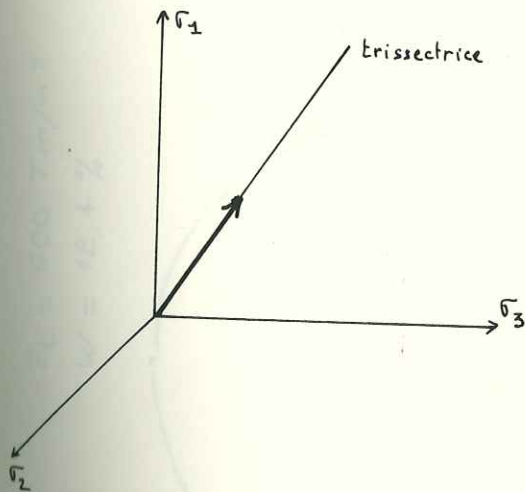


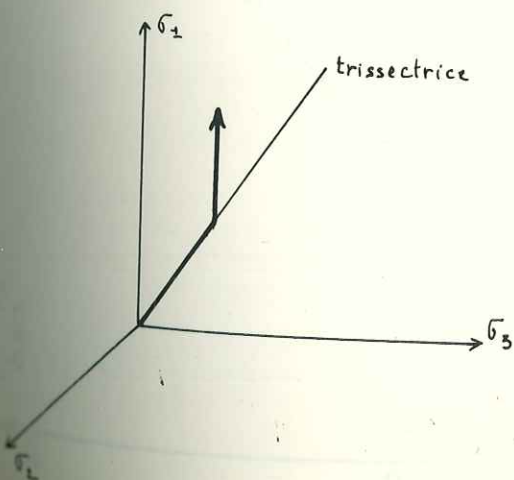
Fig. 6-17 - Influence de la profondeur d'une entaille sur la résistance en compression monoaxiale -
 Eprouvette $\phi 100$ mm. H 200 mm - $w = 0\%$
 vitesse 0,5 bar/s -



Compression monoaxiale



Compression isotrope



Compression déviatoire
avec $\sigma_2 = \sigma_3$

Fig. 6-18 - Cheminement
dans l'espace contrainte.

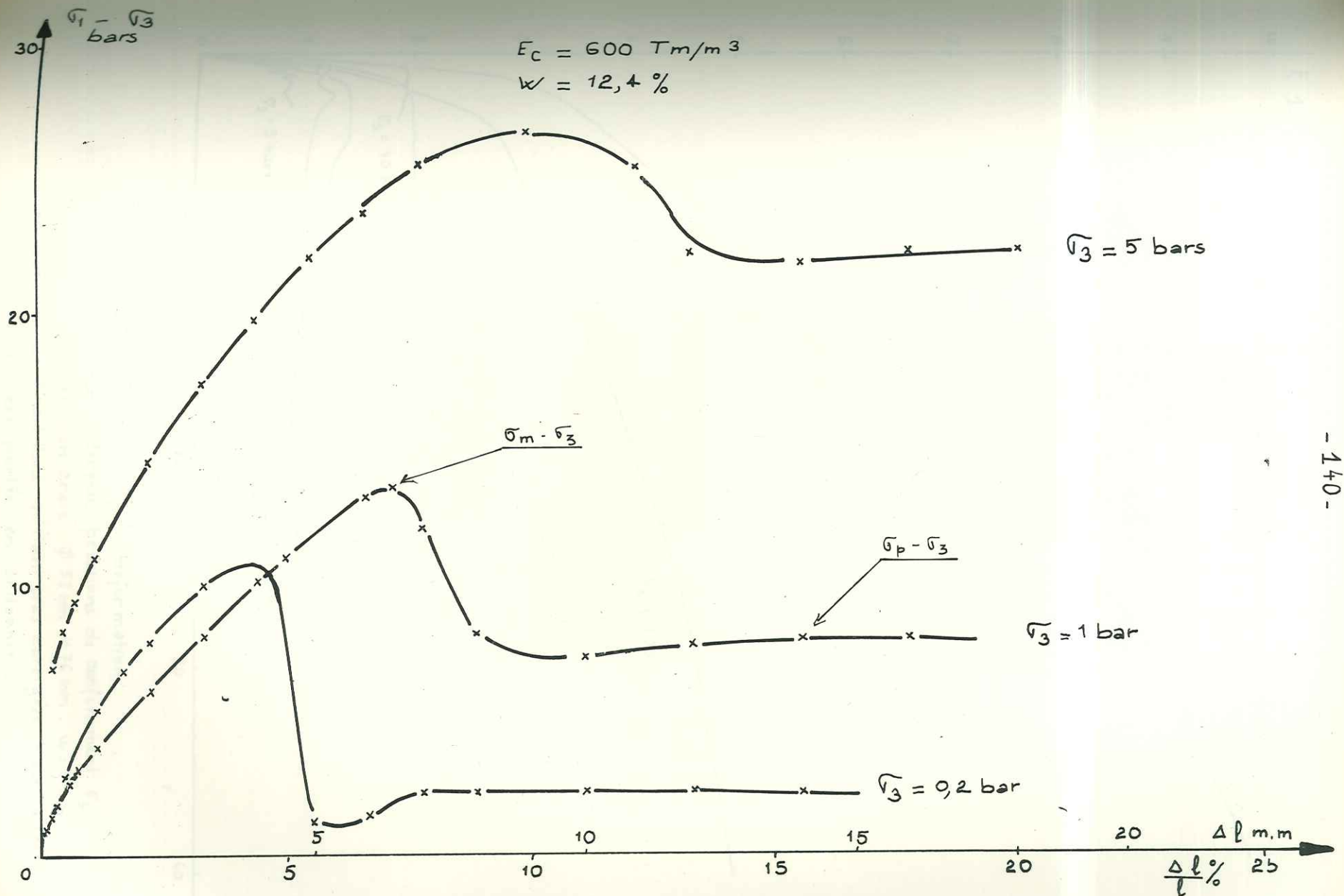


Fig. 6-19. Influence de la pression de confinement
 sur la forme de la courbe effort-déformation.
 et sur la fragilité. (D'après BELLIER)

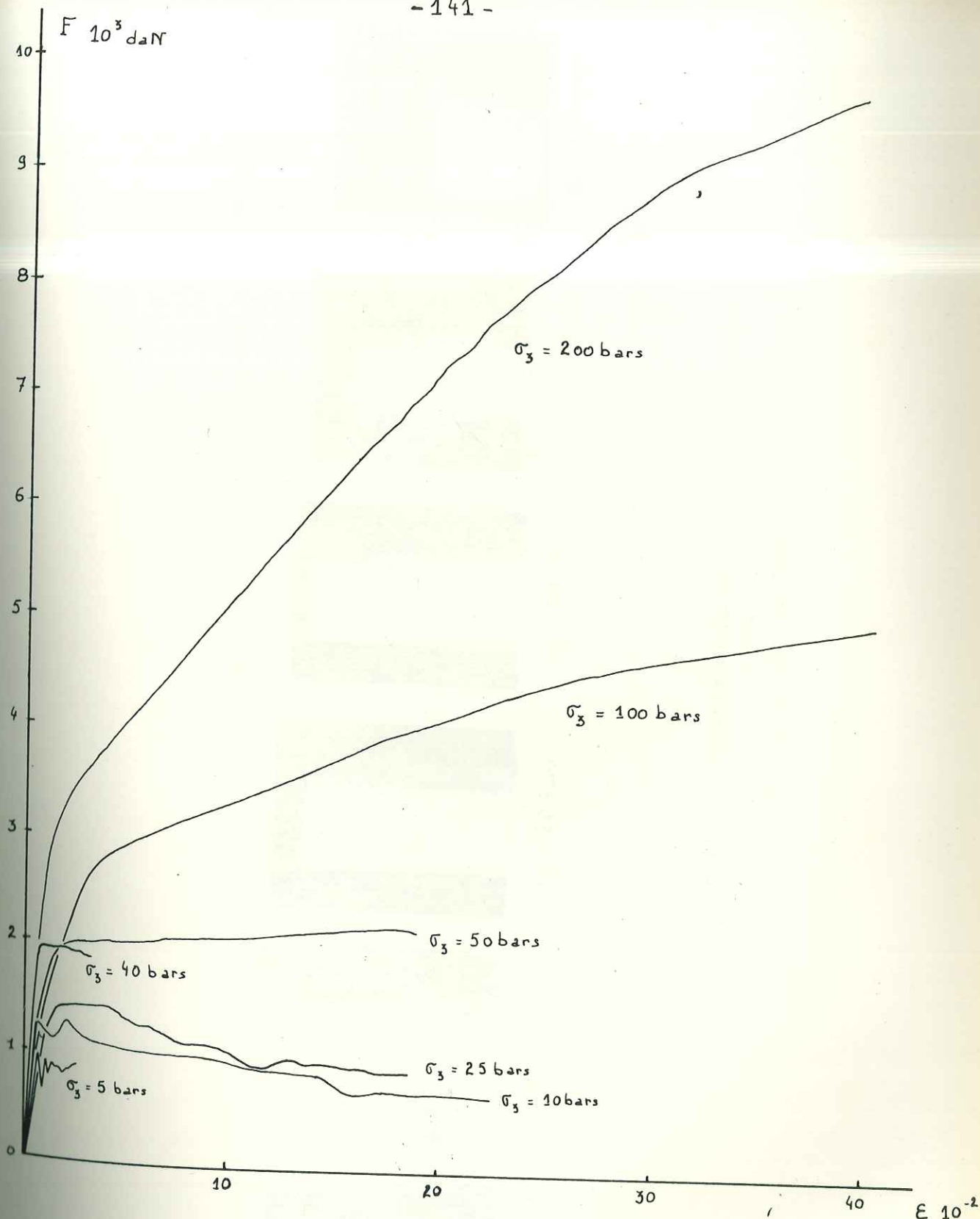
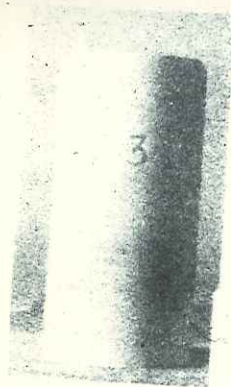
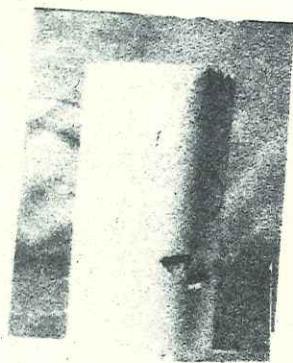


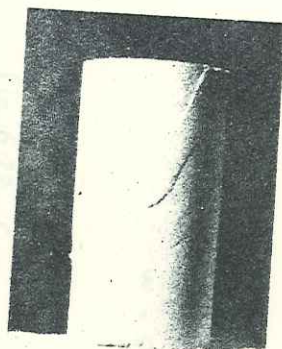
Fig. 6-20. Courbes effort-déformation
pour différentes pressions de confinement σ_3
Echantillon craie $\phi 38 \text{ mm}$ $H 76 \text{ mm}$ - $w = 0\%$
Les sections des échantillons n'étant pas corrigées, c'est la force
qui est portée en ordonnée.



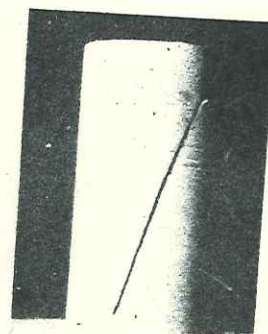
Avant essai



$\sigma_3 = 5 \text{ bars}$



$\sigma_3 = 20 \text{ bars}$



$\sigma_3 = 30 \text{ bars}$

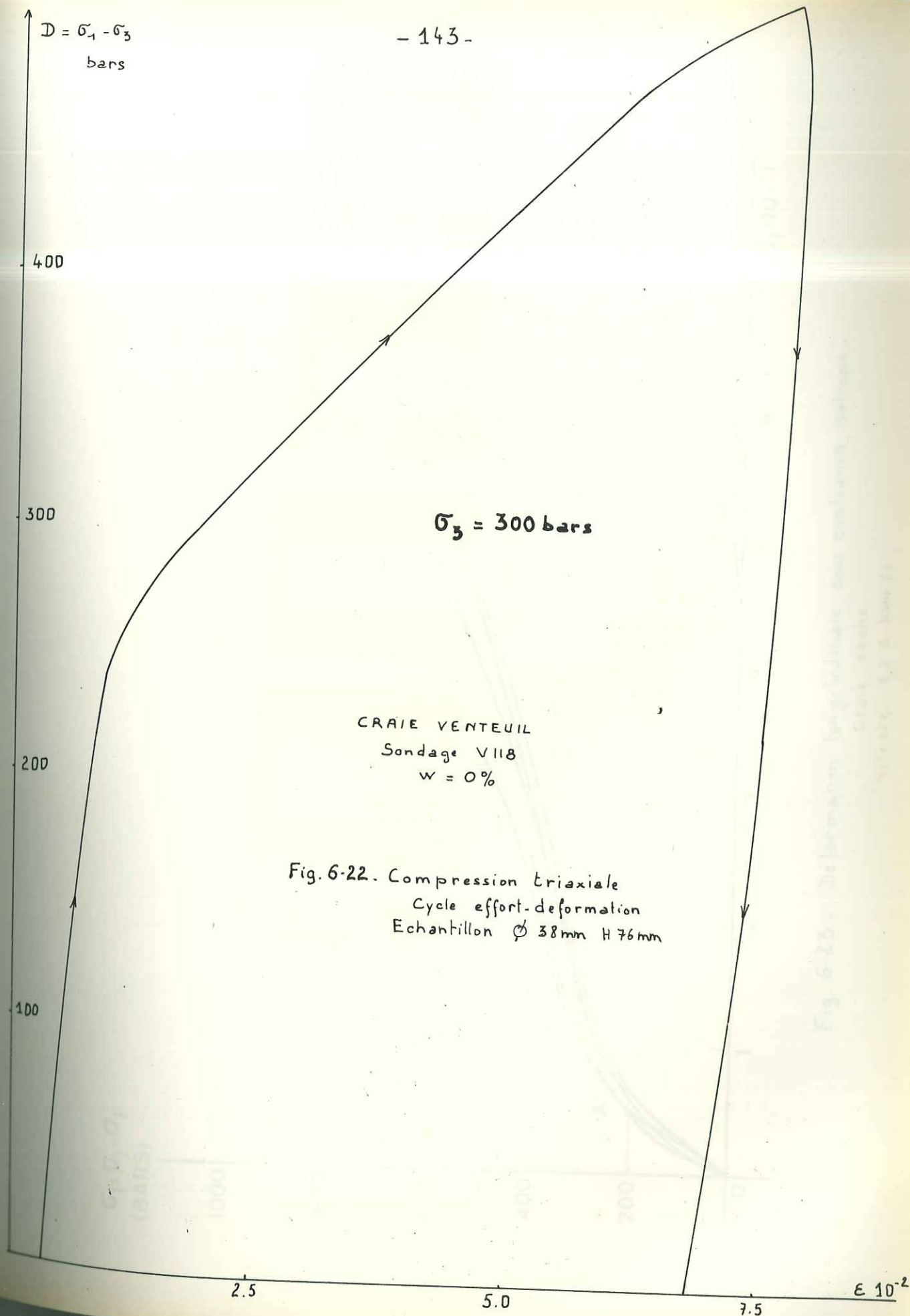


$\sigma_3 = 50 \text{ bars}$



$\sigma_3 = 200 \text{ bars}$

Fig. 6-21. Influence de la pression de confinement sur la rupture.
Echantillons $\varnothing 38 \text{ mm}$ H 76 mm. $w = 0\%$



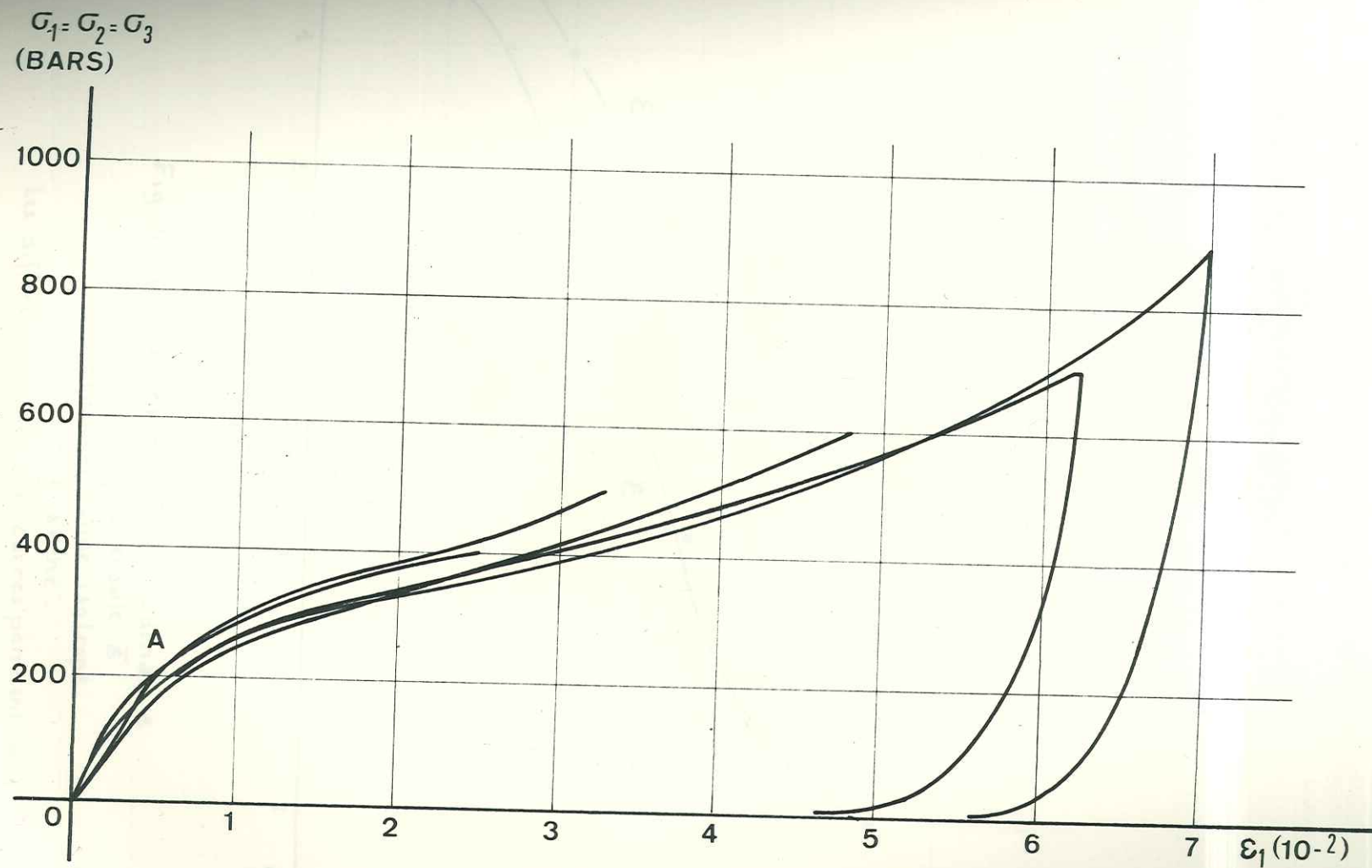


Fig. 6-23 - Déformation longitudinale sous contrainte isotrope.
Craie sèche.
vitesse 1 à 2 bars/s.

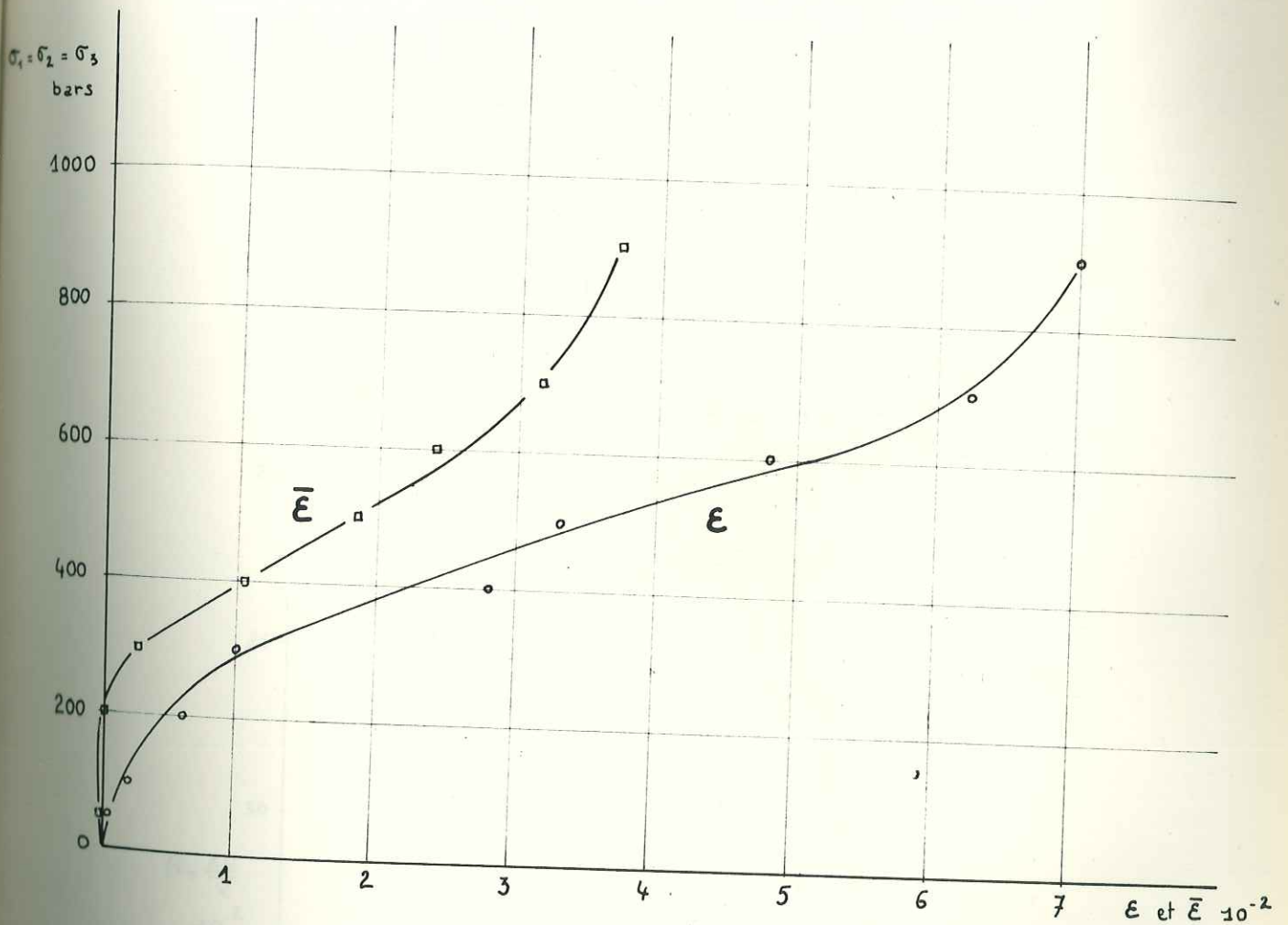
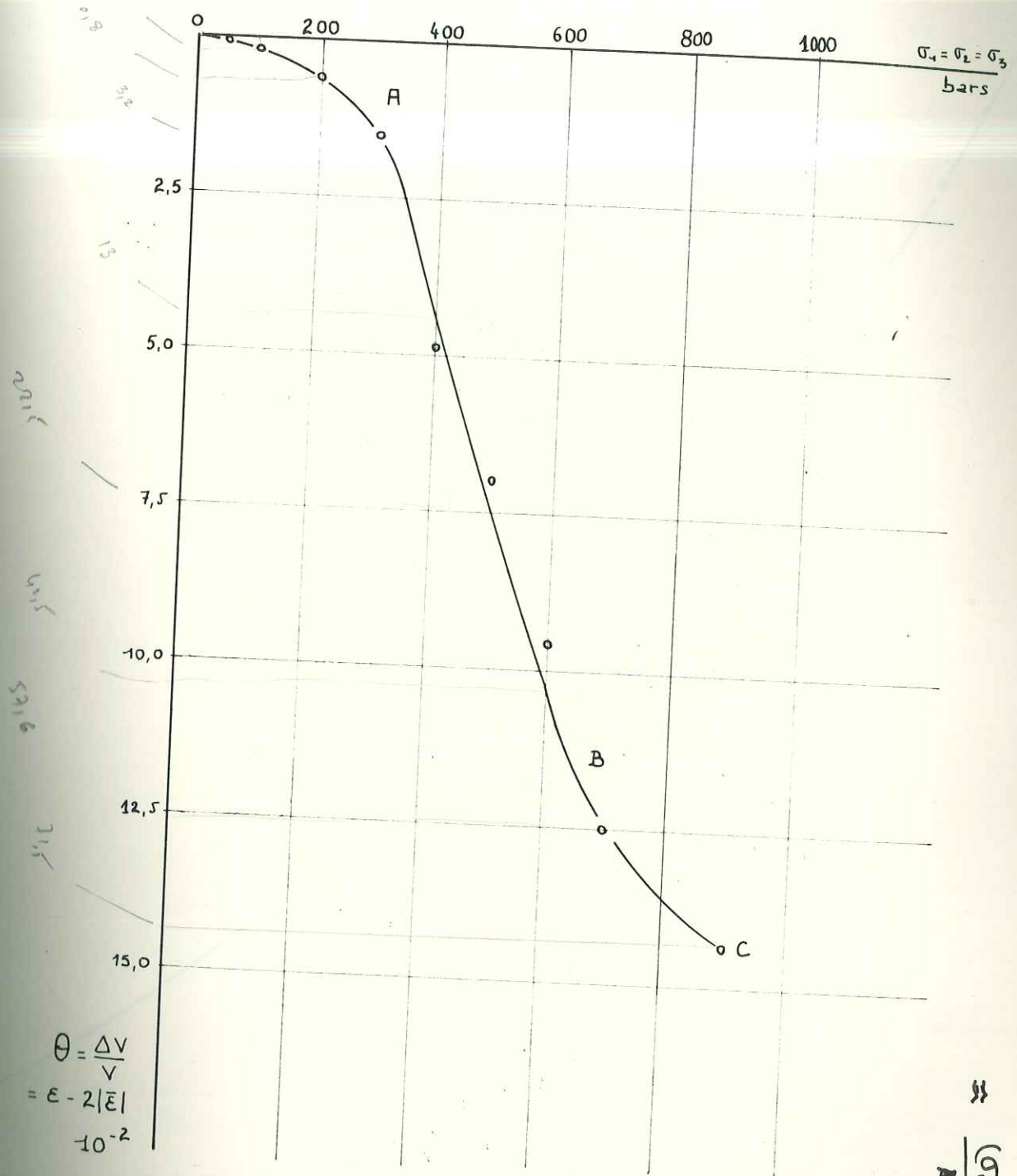


Fig. 6-24. Déformation longitudinale ϵ et transversale $\bar{\epsilon}$ sous contrainte isotrope. craie sèche.

Les différents points ne correspondent pas au même échantillon.

$$\rho_{cm} = \frac{1}{100} \times 100 = 1 \text{ kg/cm}^3$$



$$\theta = \frac{\Delta V}{V}$$

$$= \epsilon - 2|\bar{\epsilon}|$$

$$10^{-2}$$

$$\epsilon_1 = \epsilon_2 = \epsilon_3$$

$$\epsilon_1 = \epsilon_2 = \epsilon_3$$

Fig. 6-25. Variation de volume (diminution)
sous contrainte isotrope,
argile sèche. $\gamma_d = 1,6 \text{ g/cm}^3$

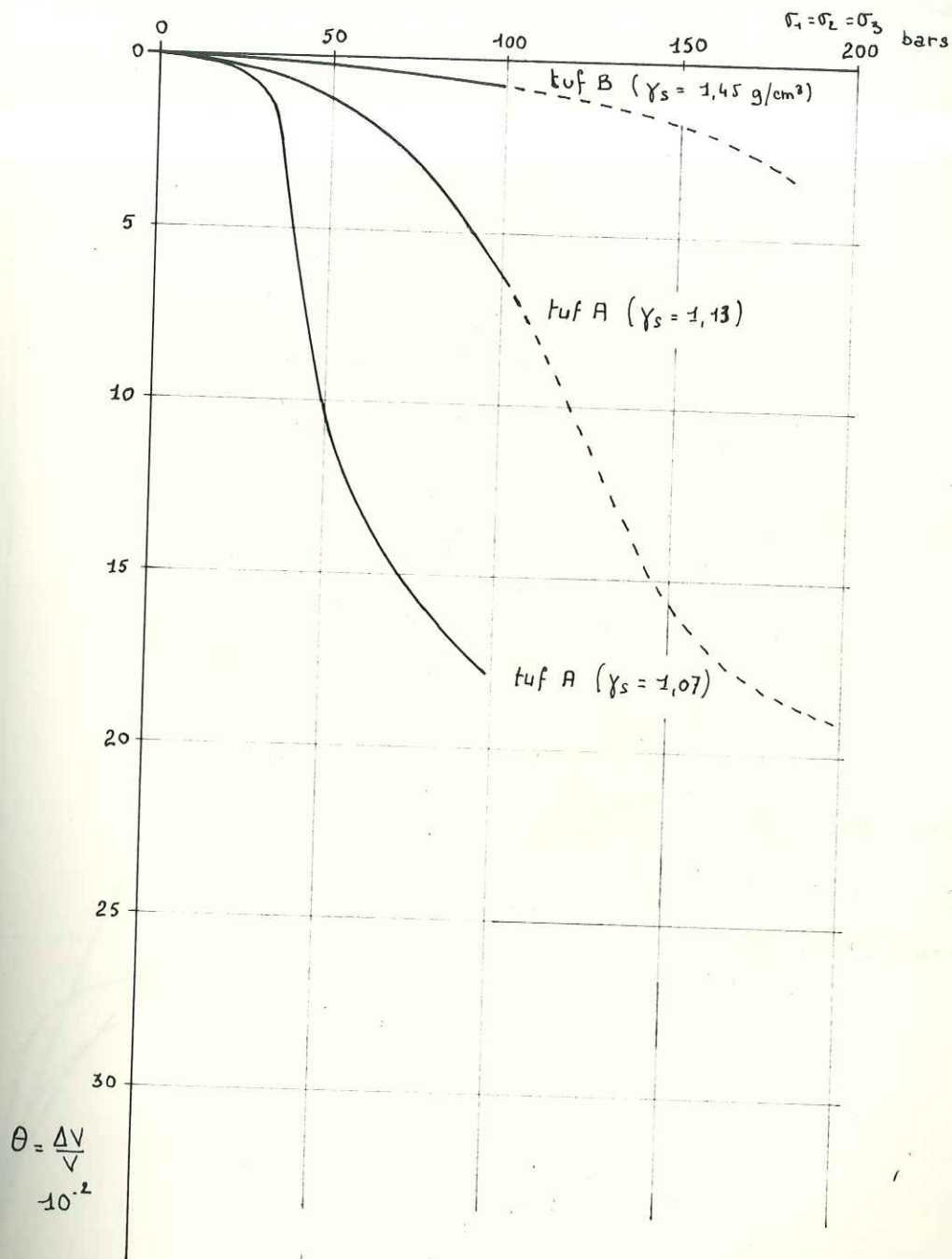


Fig. 6-26. Compressibilité du tufo napolitano
(d'après A. PELLEGRINO)

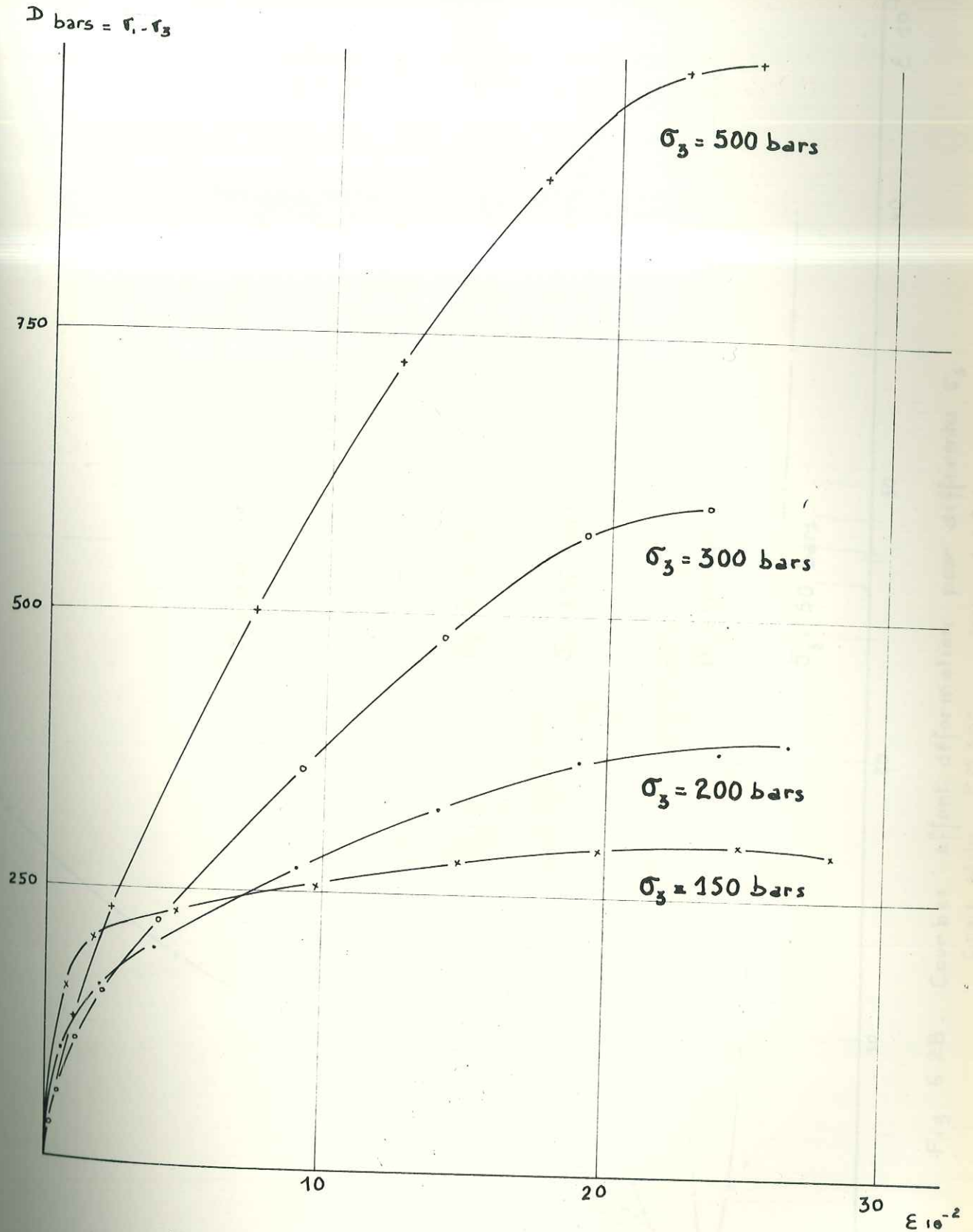


Fig. 6-27. Courbes effort-déformation pour différentes pressions de confinement. Craie sèche - PM 180 - Vitesse 1 à 2 bars/s. Mesure des déformations entre plateaux par comparateurs.

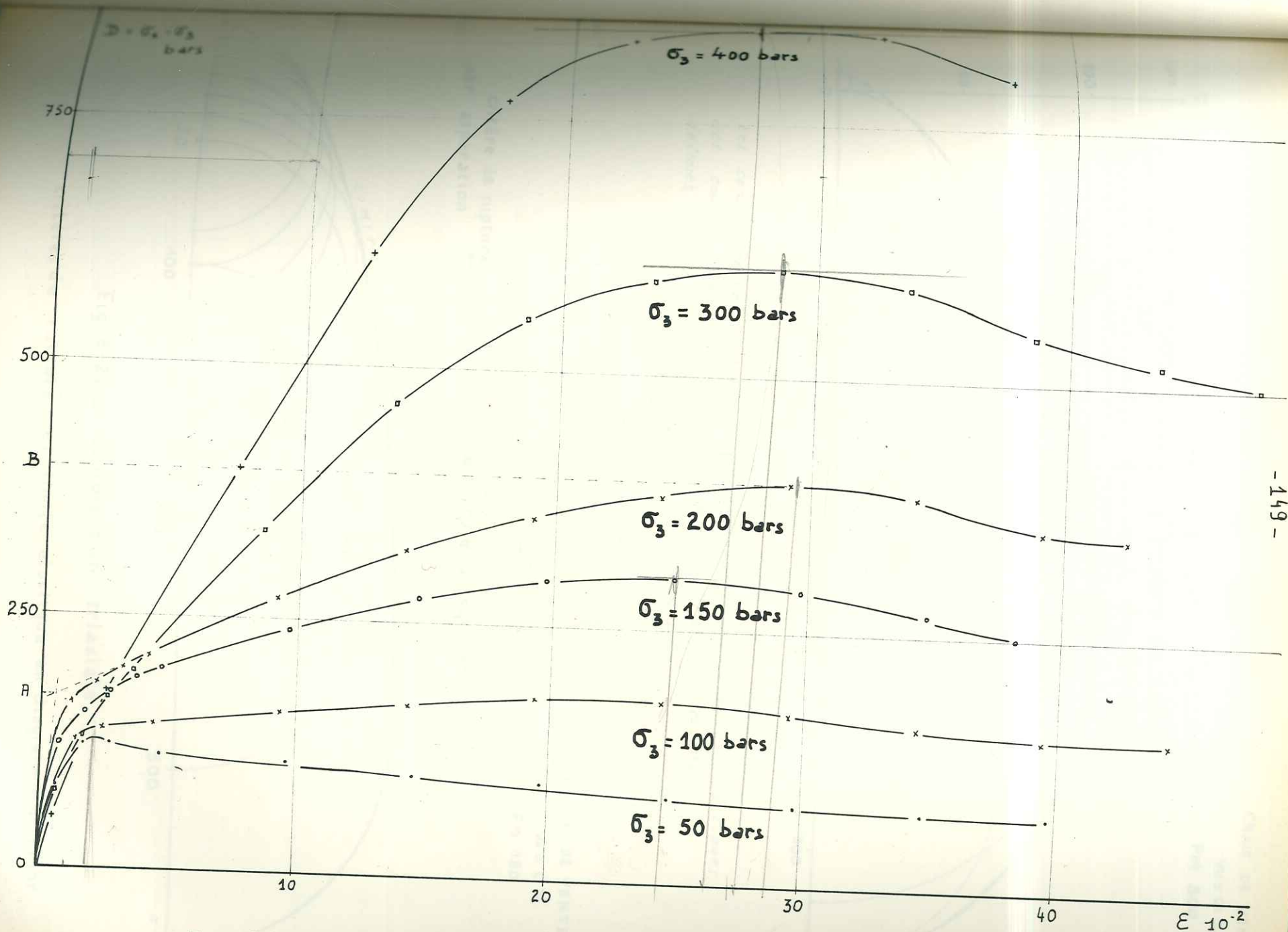
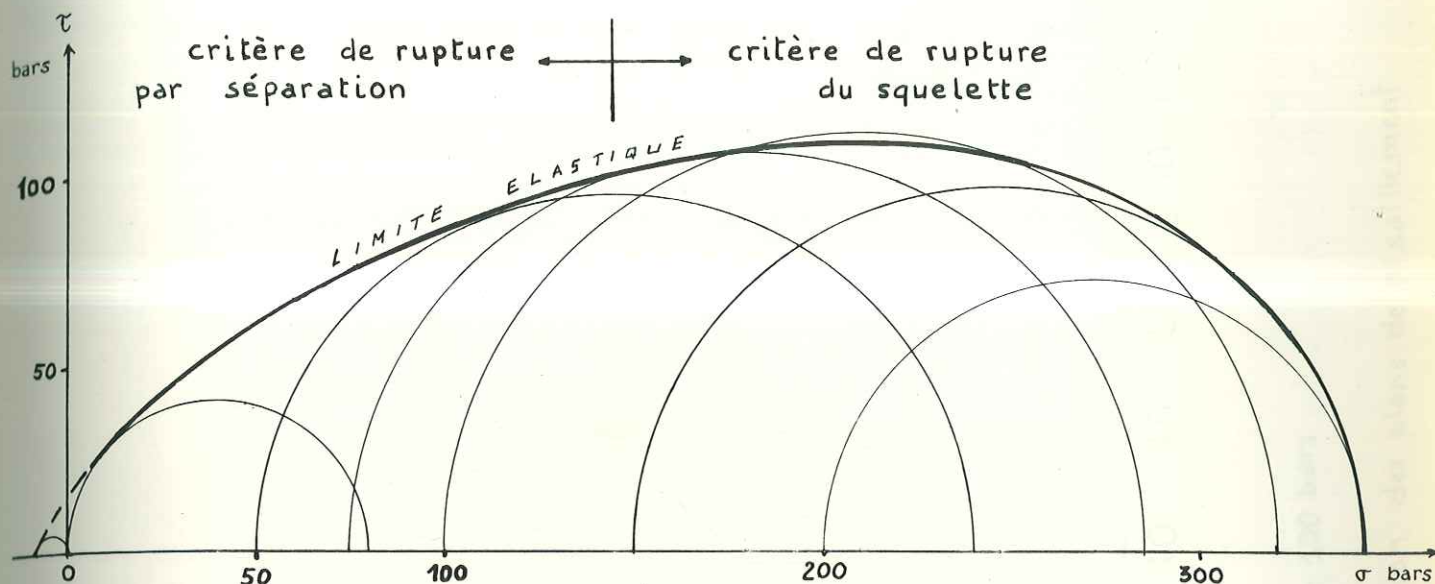


Fig. 6-28. Courbes effort-déformation pour différentes σ_3
Craie sèche - PM 300 - vitesse 1 à 2 bars/s.



Les cercles de ces diagrammes correspondent aux limites élastiques des courbes des figures 6-27 et 6-28 (PM 180 et PM 300) définies comme le point A de la figure 6-28.

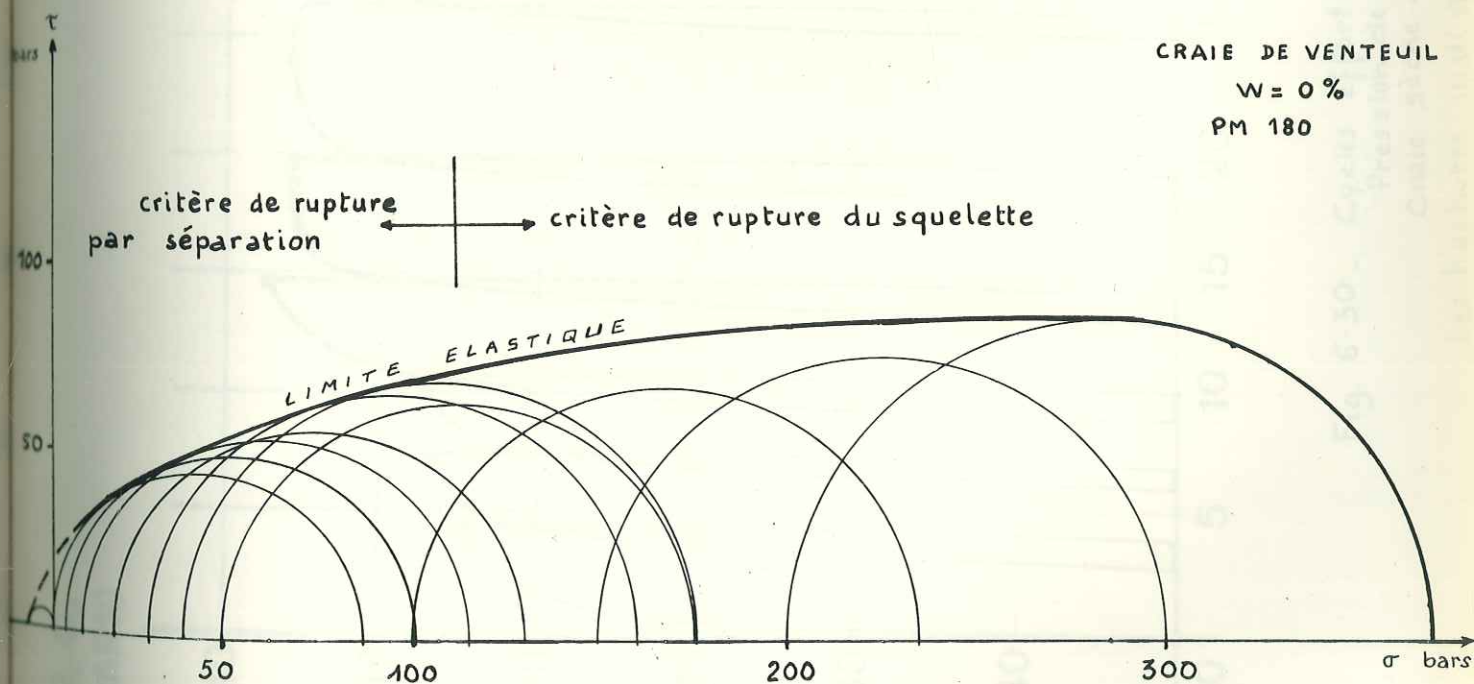


Fig. 6-29 - Compression triaxiale

critères de rupture et limite élastique en diagramme de Mohr

$\sigma_1 - \sigma_3$
(BARS)

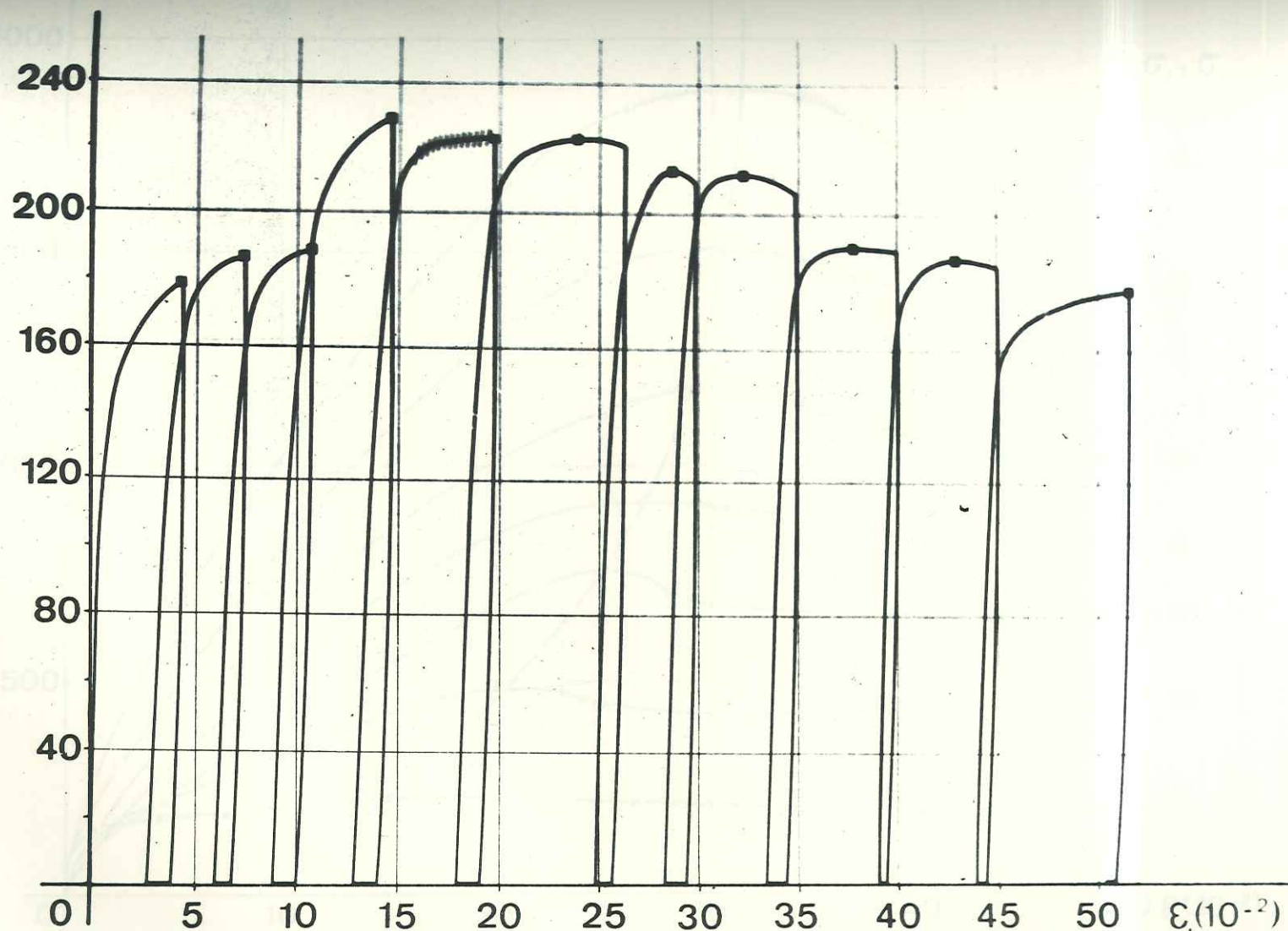


Fig. 6-30 - Cycles effort-déformation.
Pression de confinement $\sigma_3 = 100$ bars
Craie sèche - PM 480 -

Les hachures indiquent l'apparition des plans de cisaillement.

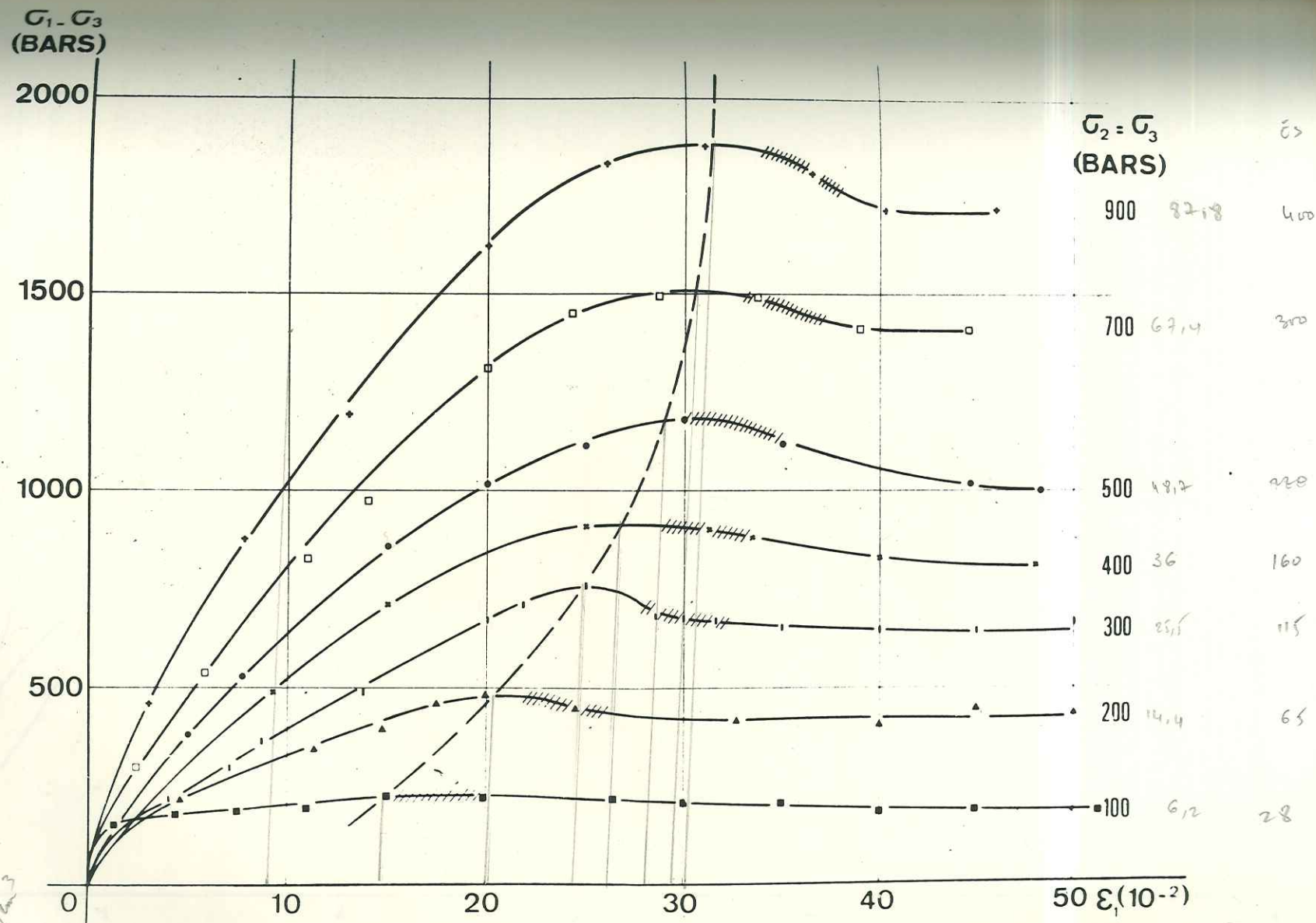


Fig. 6-31. Enveloppes des sommets des cycles effort-déformation
Les hachures indiquent l'apparition des plans de cisaillement
Craie sèche - PM 480.
Mesure des déformations entre plateaux

$10^2 = \frac{3}{100} \times 10^6$
 $= 4,5 \text{ kg/cm}^3$

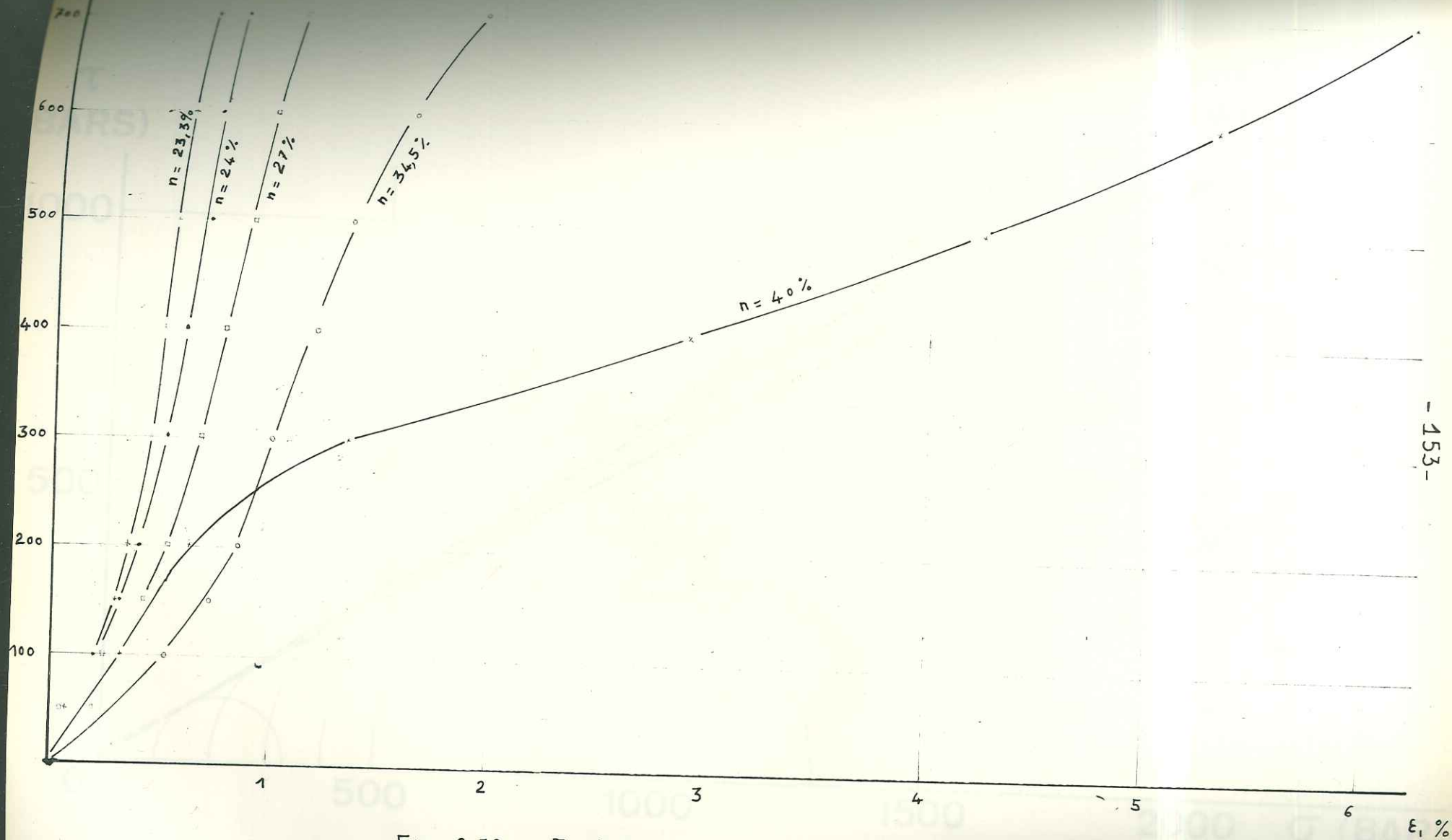


Fig. 6-32. Evolution de la déformation longitudinale
sous contrainte isotrope σ_0
en fonction de la porosité initiale n .
Craie sèche. PM.480.

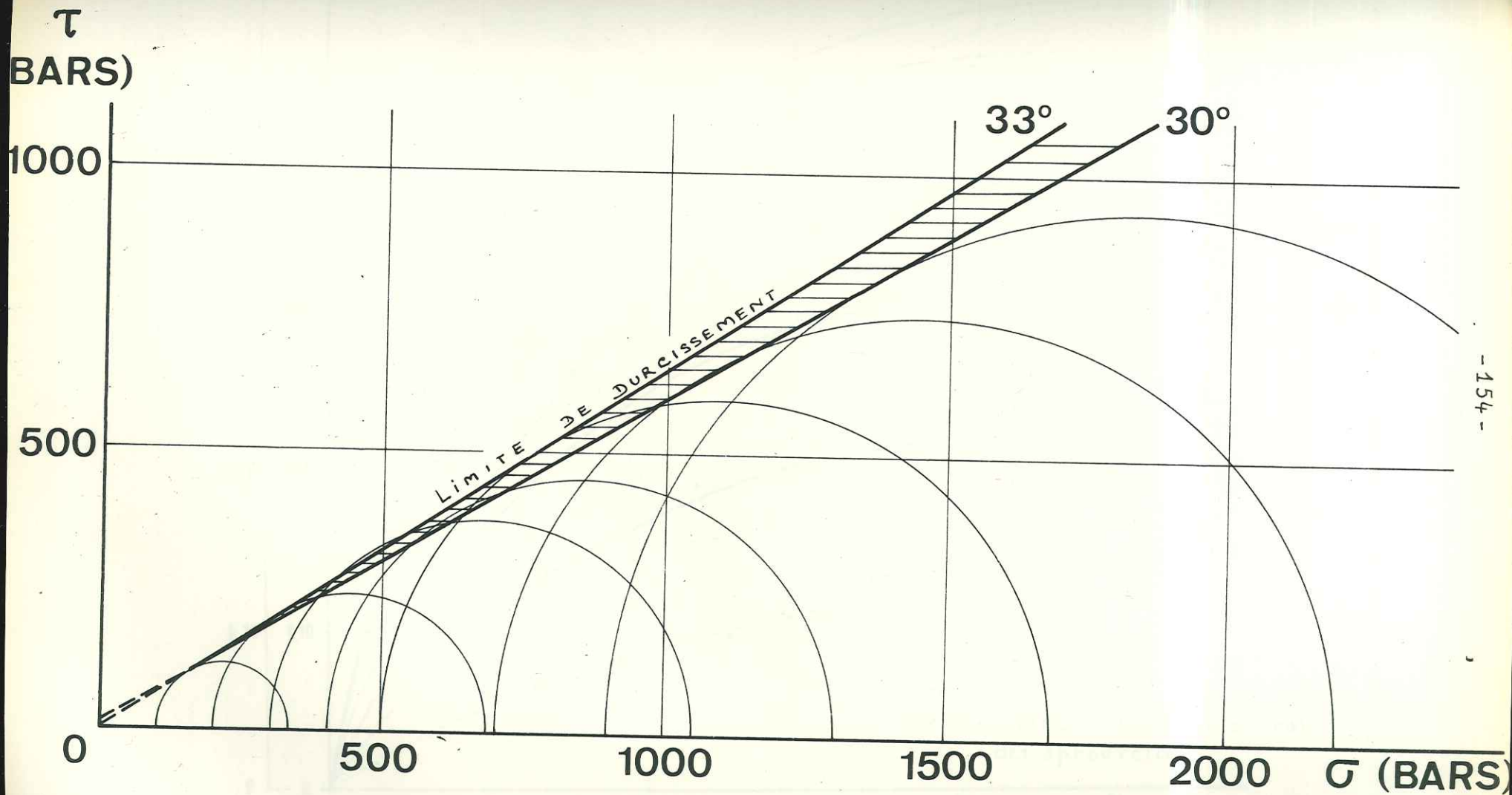


Fig. 6-33. Limite de durcissement ou seuil de pseudo-plasticité.
Les cercles de Mohr correspondent aux pics des courbes
de la figure 6-31.

(La dispersion ne permet pas de définir une droite mais plutôt une zone intrinsèque)

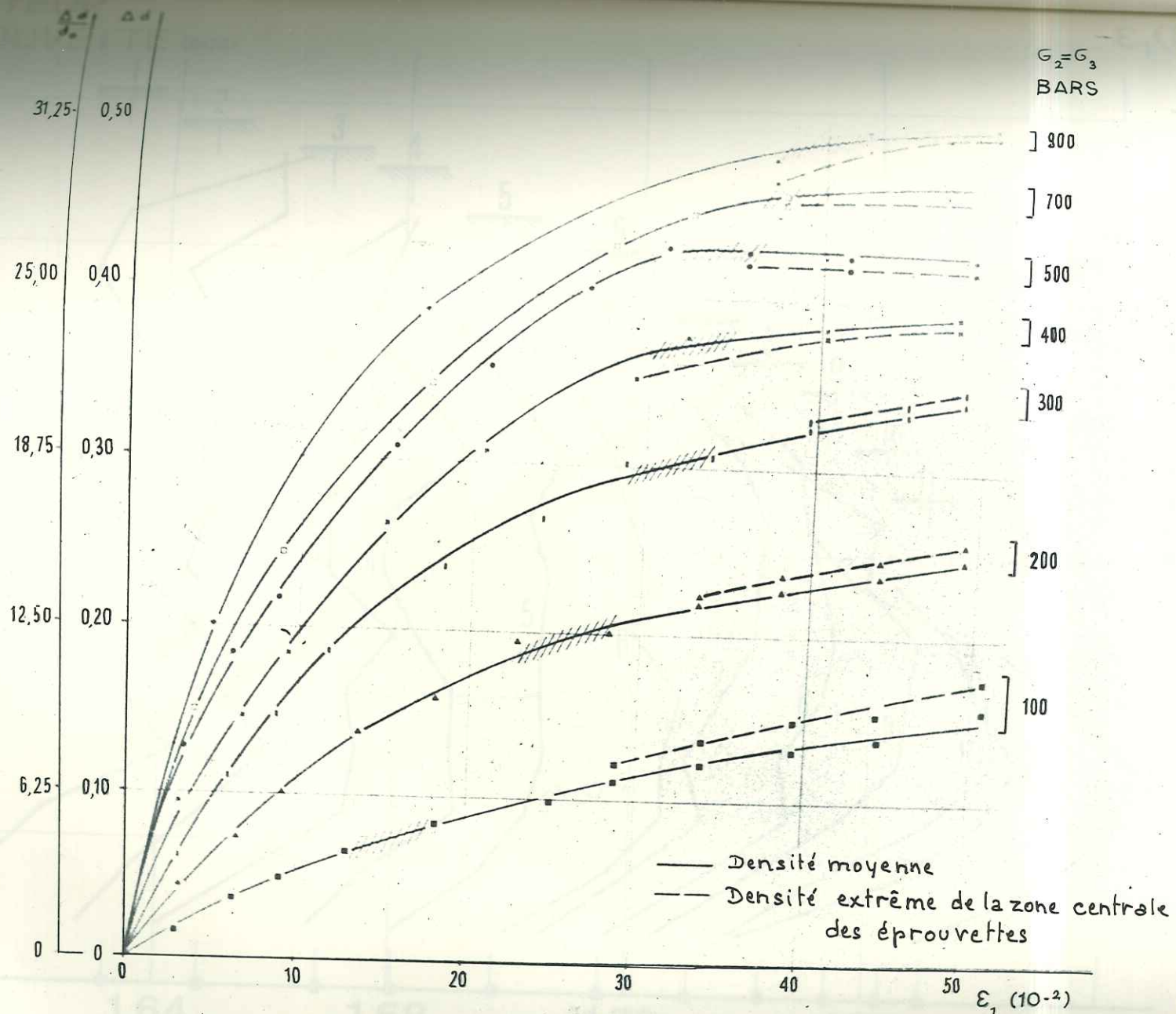


Fig. 6-34. Variation de la densité pendant les déformations triaxiales pour différentes valeurs de σ_3 .
Les hachures indiquent le cisaillement

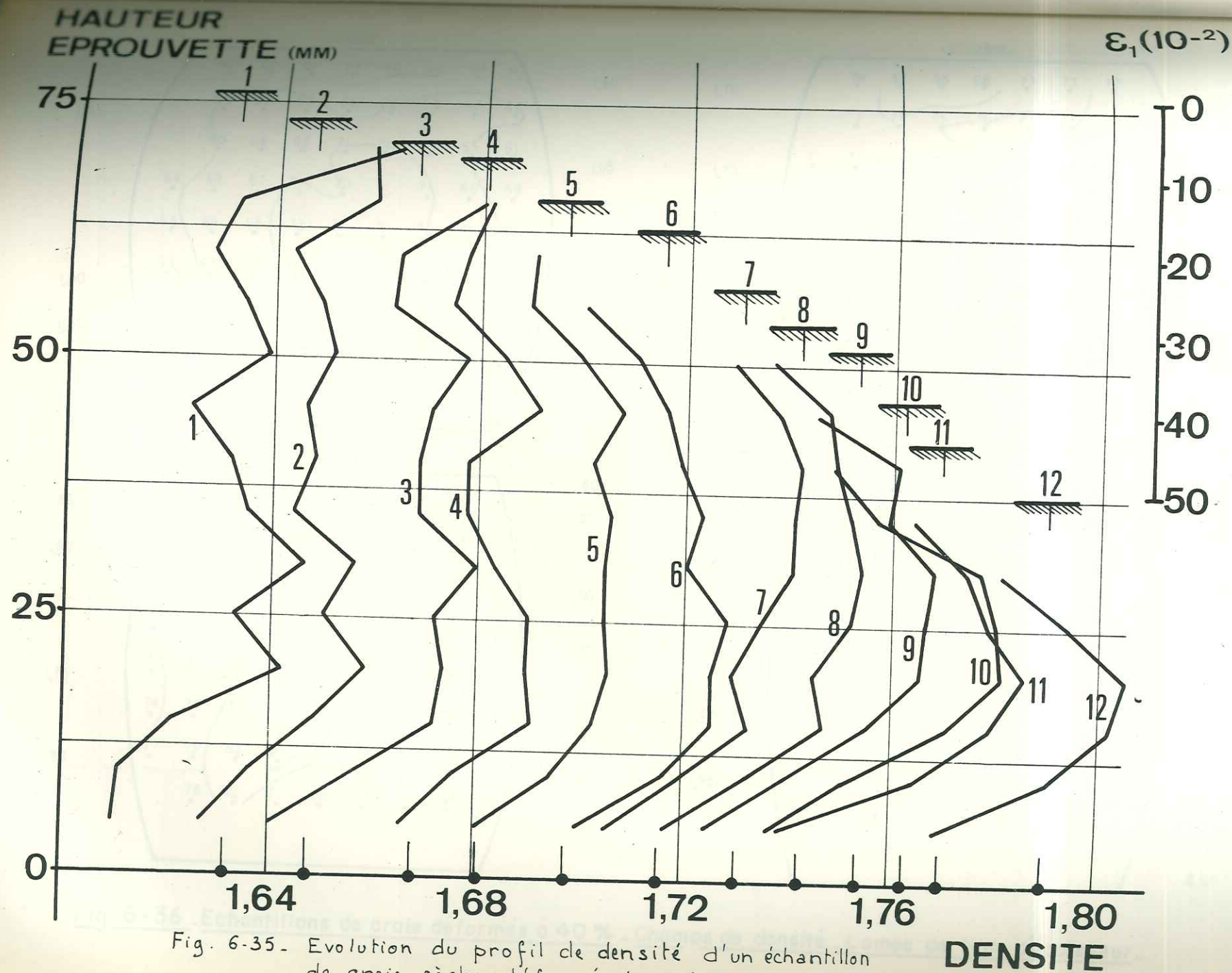


Fig. 6-35. Evolution du profil de densité d'un échantillon de craie sèche déformé de 0 à 50 % sous $\sigma_3 = 100$ bars

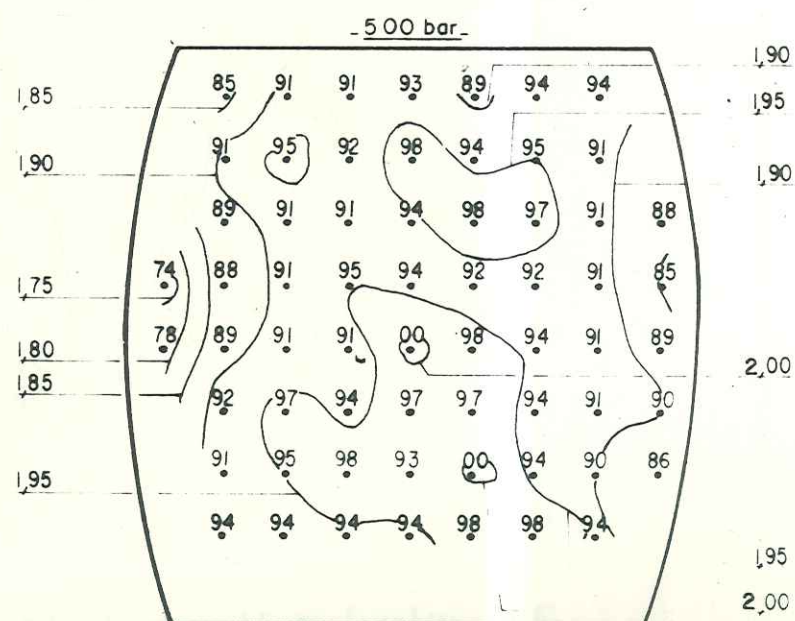
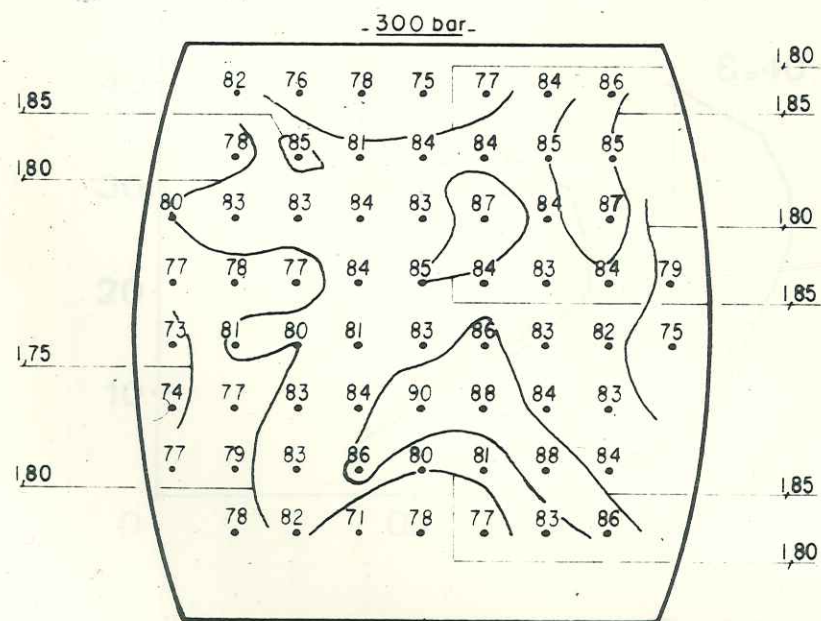
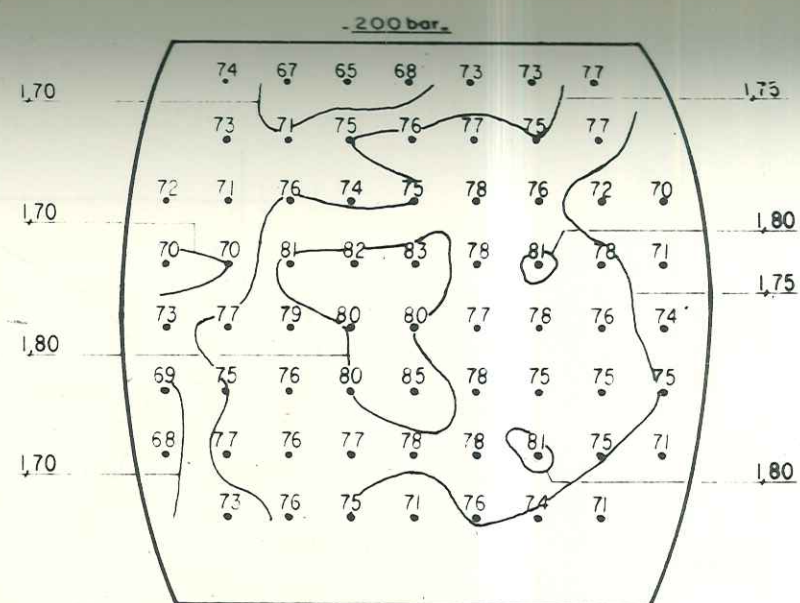
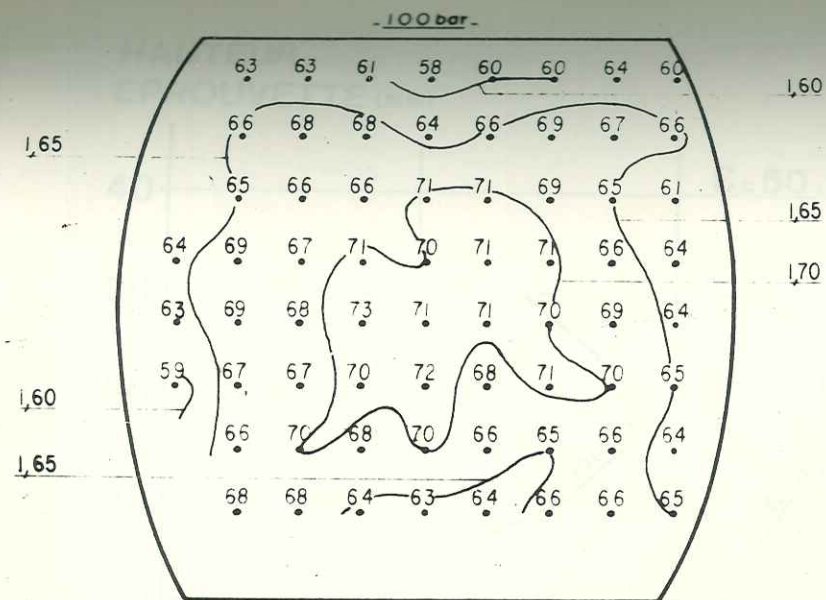


Fig. 6-36 - Echantillons de craie déformés à 40 % - Champs de densité - Lames de 1cm d'épaisseur.

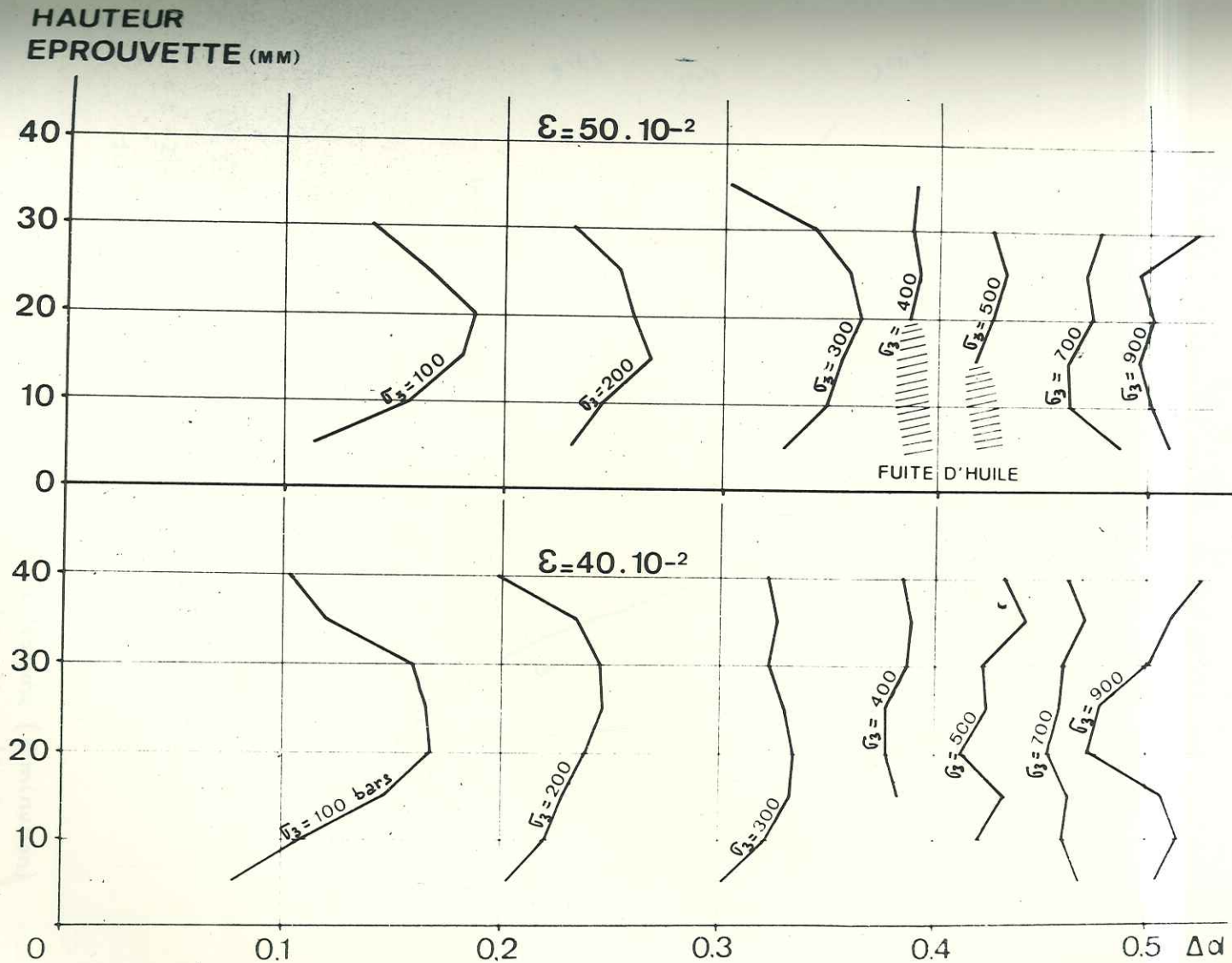


Fig. 6-37. Evolution des profils de densité en fonction de σ_3
pour $\varepsilon_1 = 40 \cdot 10^{-2}$ et $\varepsilon_1 = 50 \cdot 10^{-2}$

-158 bis-

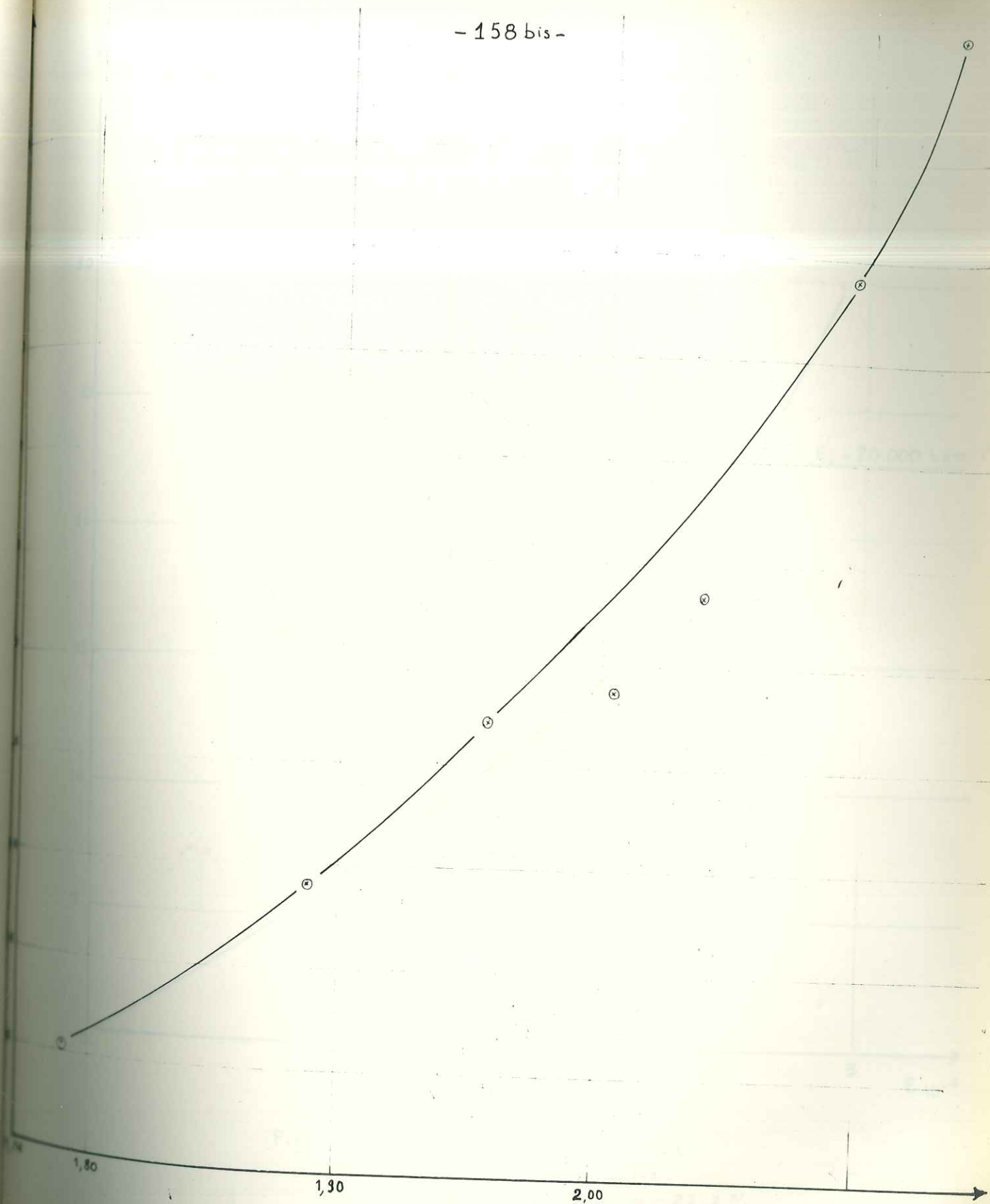


Fig. 6-37 bis. Variation de la résistance en compression simple en fonction de la densité.
Echantillons de craie sèche initialement déformés au triaxial jusqu'à $50 \cdot 10^{-2}$

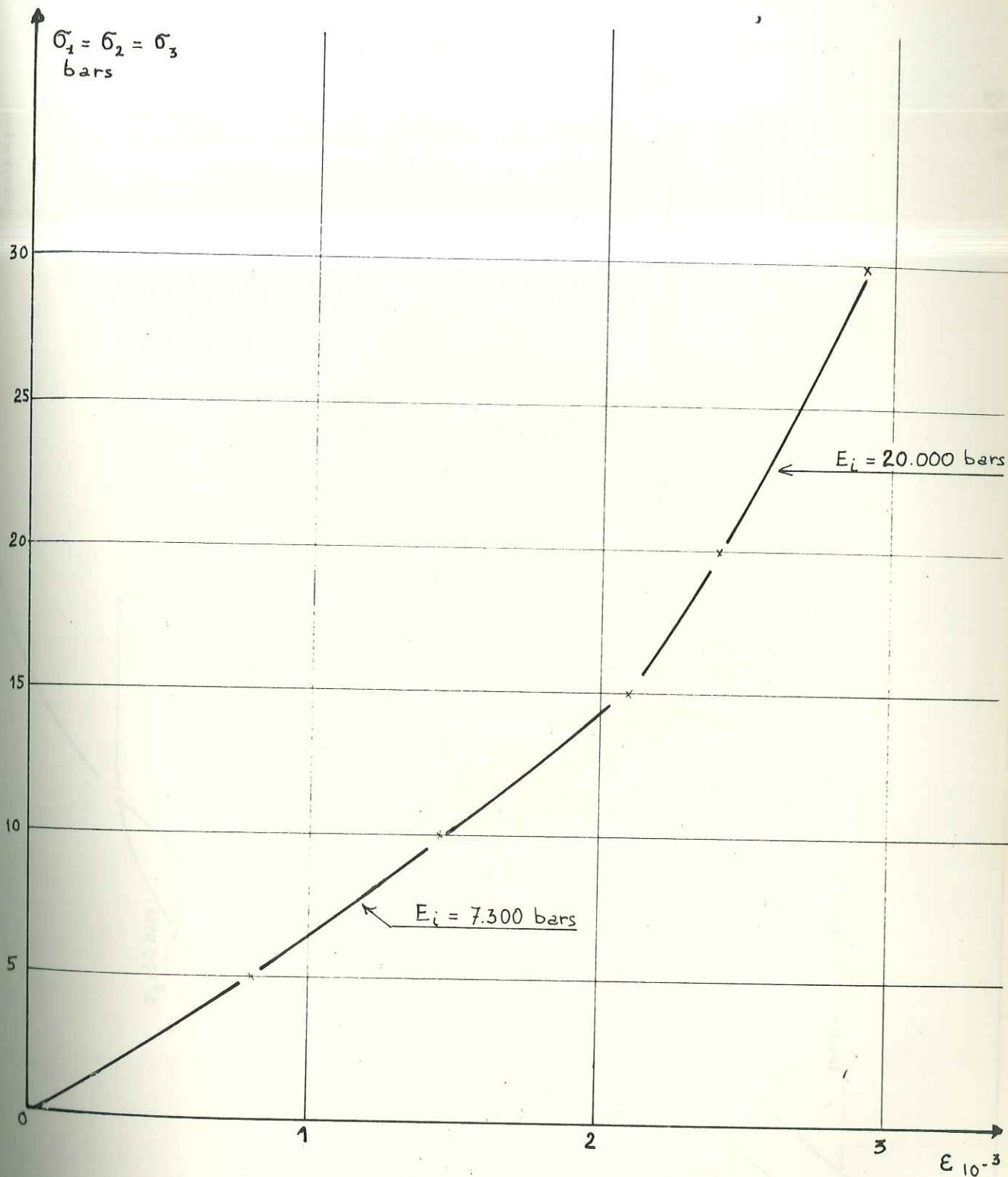


Fig. 6-38. Déformation longitudinale
sous contrainte isotrope.
Craie saturée - $w = 22,2\%$
 $\gamma_d = 1,60$
Vitesse 6 bars/mn.

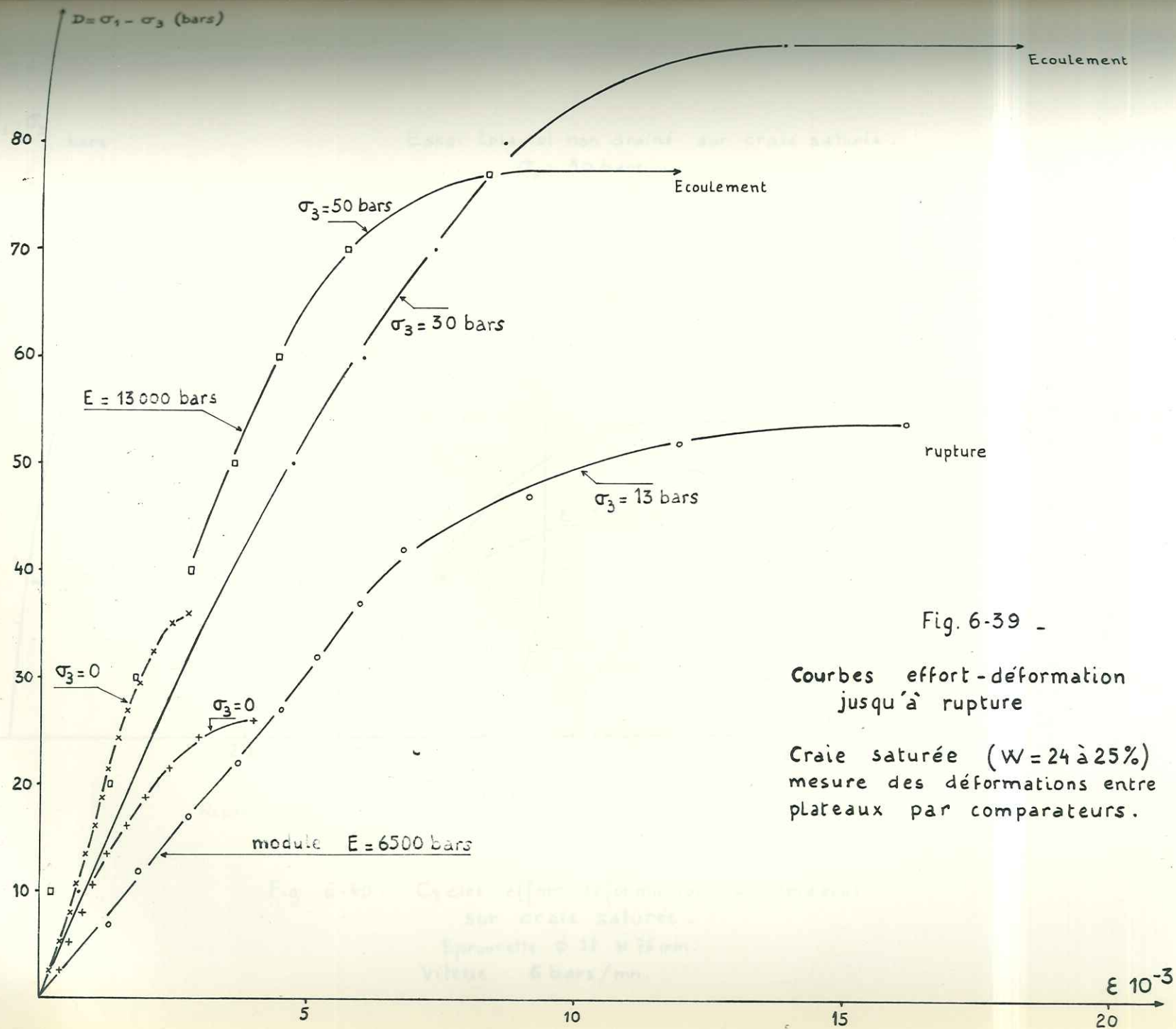


Fig. 6-39 -

Courbes effort-déformation
jusqu'à rupture

Craie saturée ($W = 24$ à 25%)
mesure des déformations entre
plateaux par comparateurs.

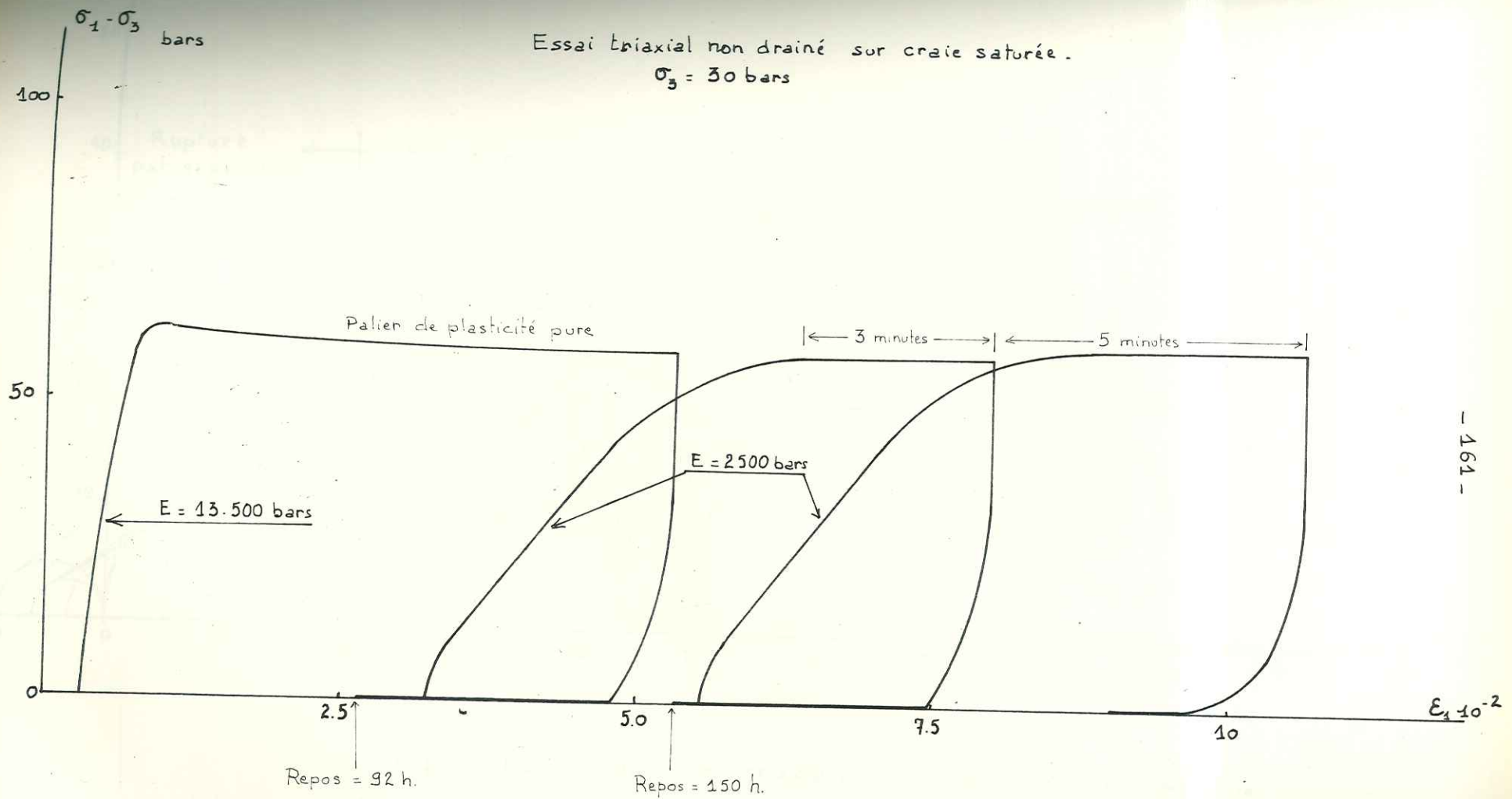


Fig. 6-40. Cycles effort-déformation au triaxial
sur craie saturée.
Eprovette $\phi 38$ H 76 mm.
Vitesse : 6 bars/mn.

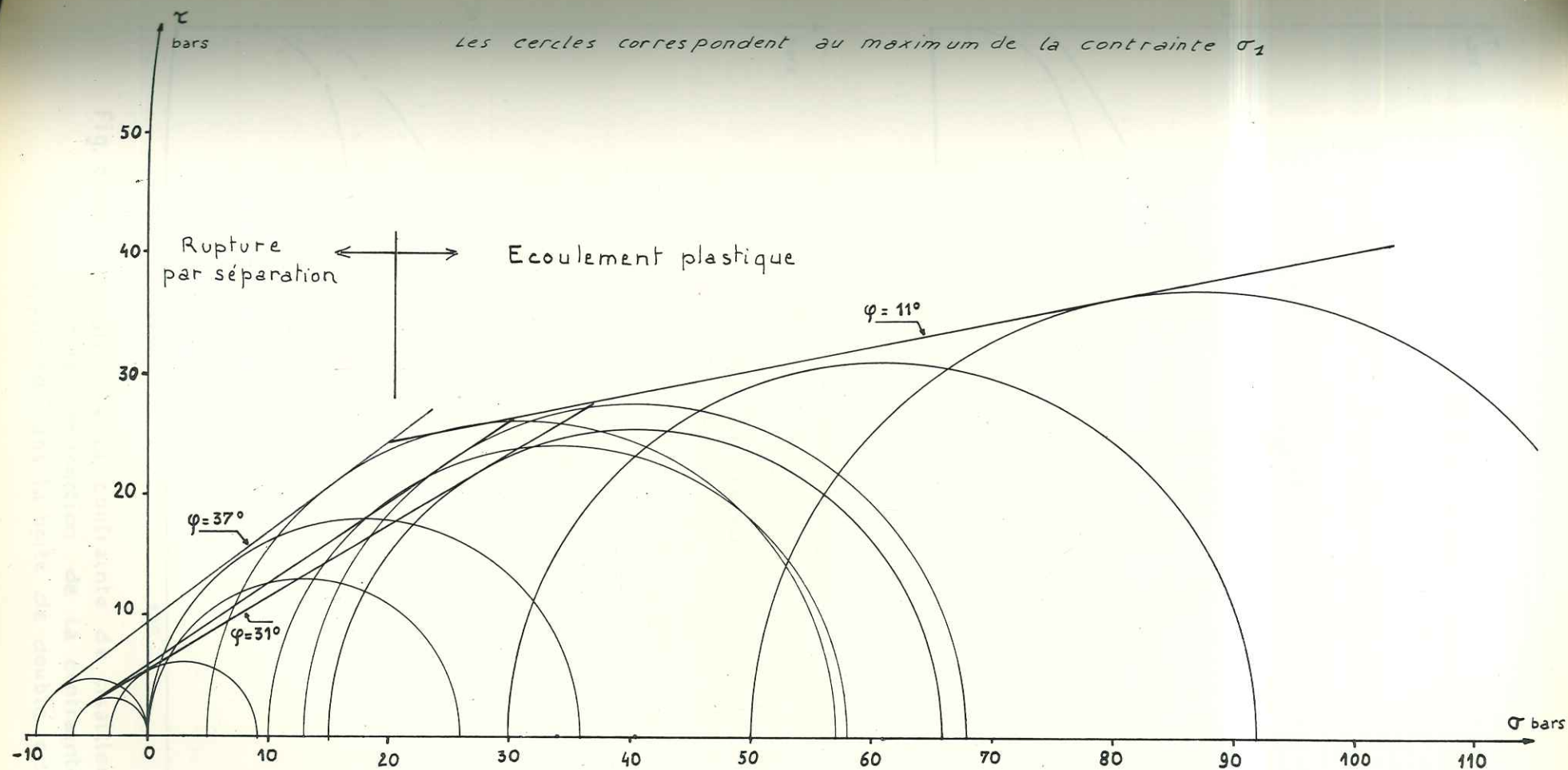


Fig. 6-41 - Compression triaxiale - Craie saturée . $w=25\%$

critères de rupture en diagramme de Mohr

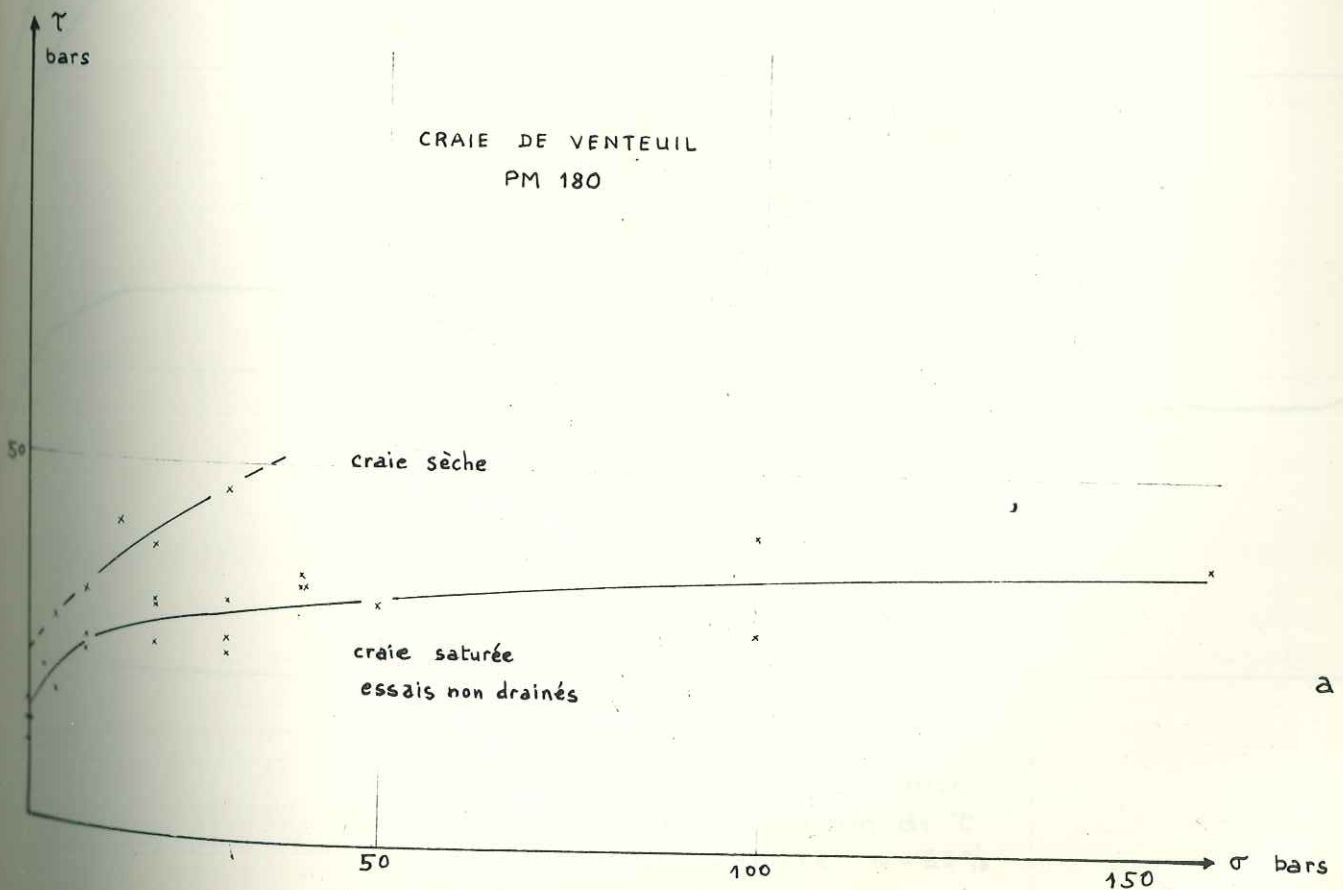
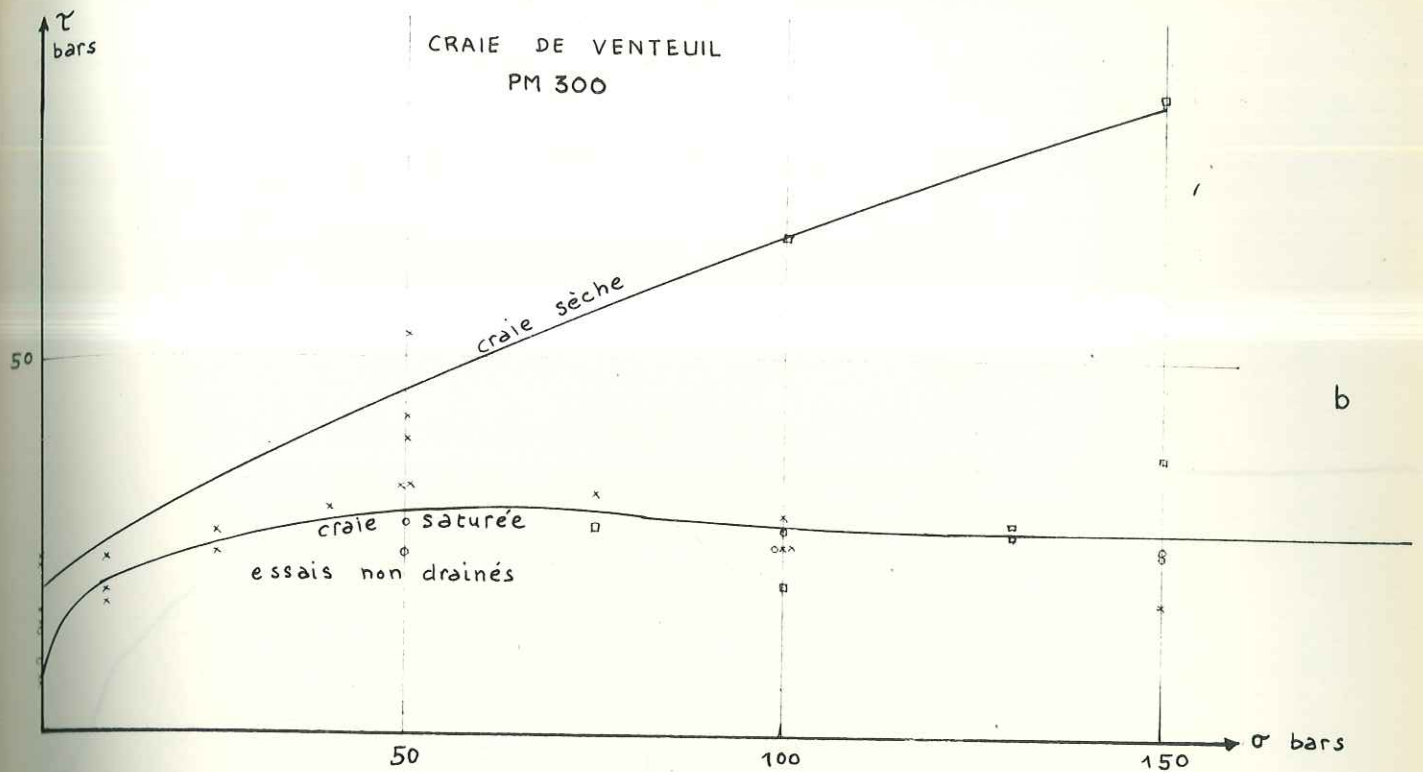


Fig. 6-43 - Variation de la contrainte de cisaillement à la rupture en fonction de la contrainte normale appliquée dans la boîte de double cisaillement LUNDBORG.

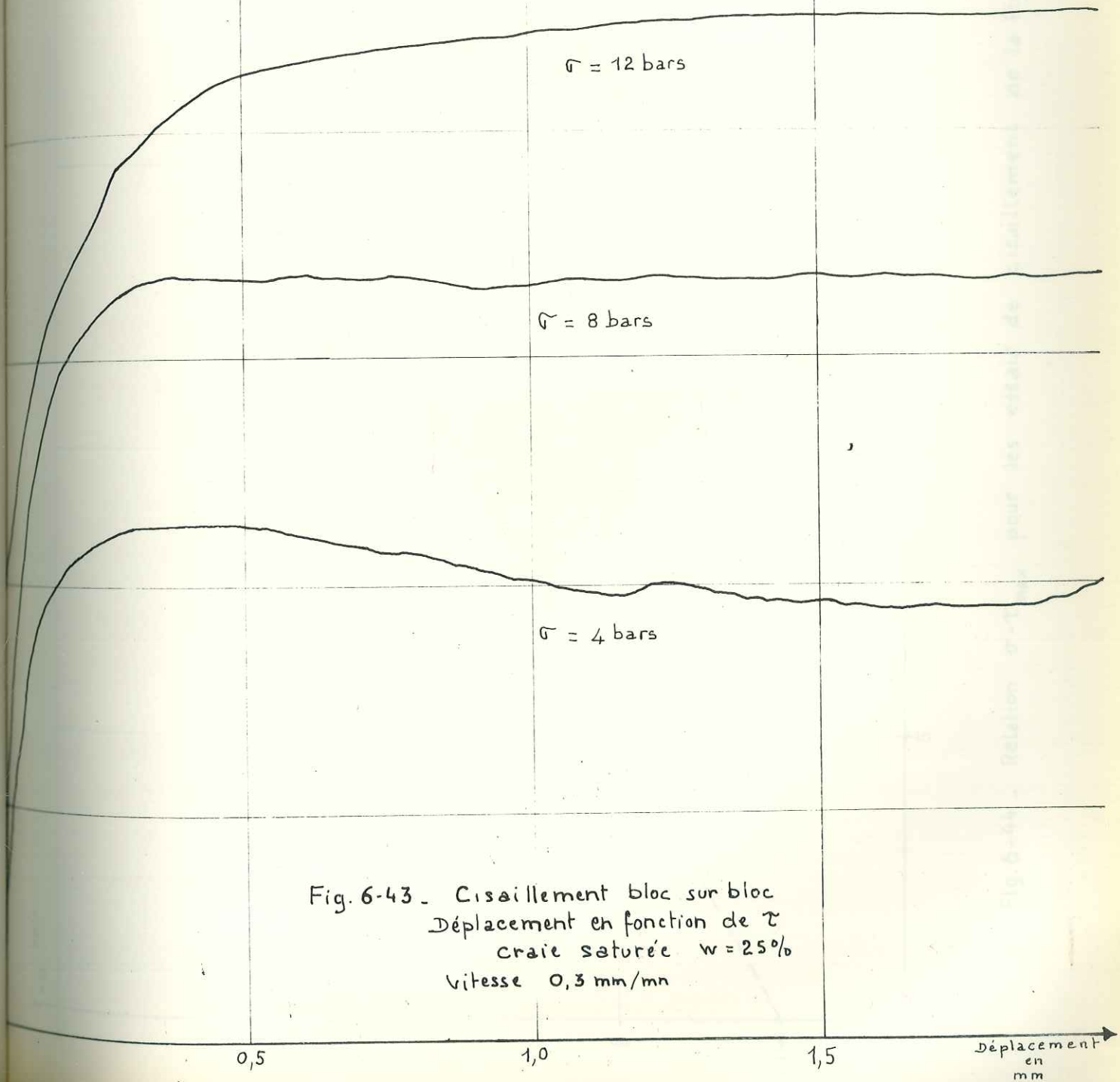
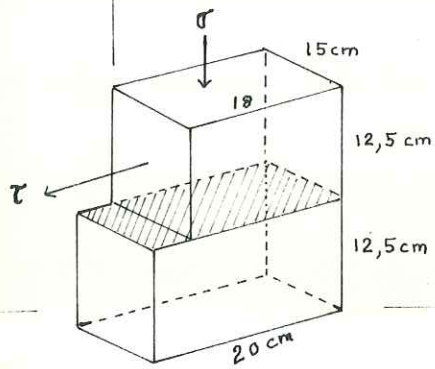


Fig. 6-43 - Cisaillement bloc sur bloc
Déplacement en fonction de τ
craie saturée $w = 25\%$
Vitesse 0,3 mm/mn

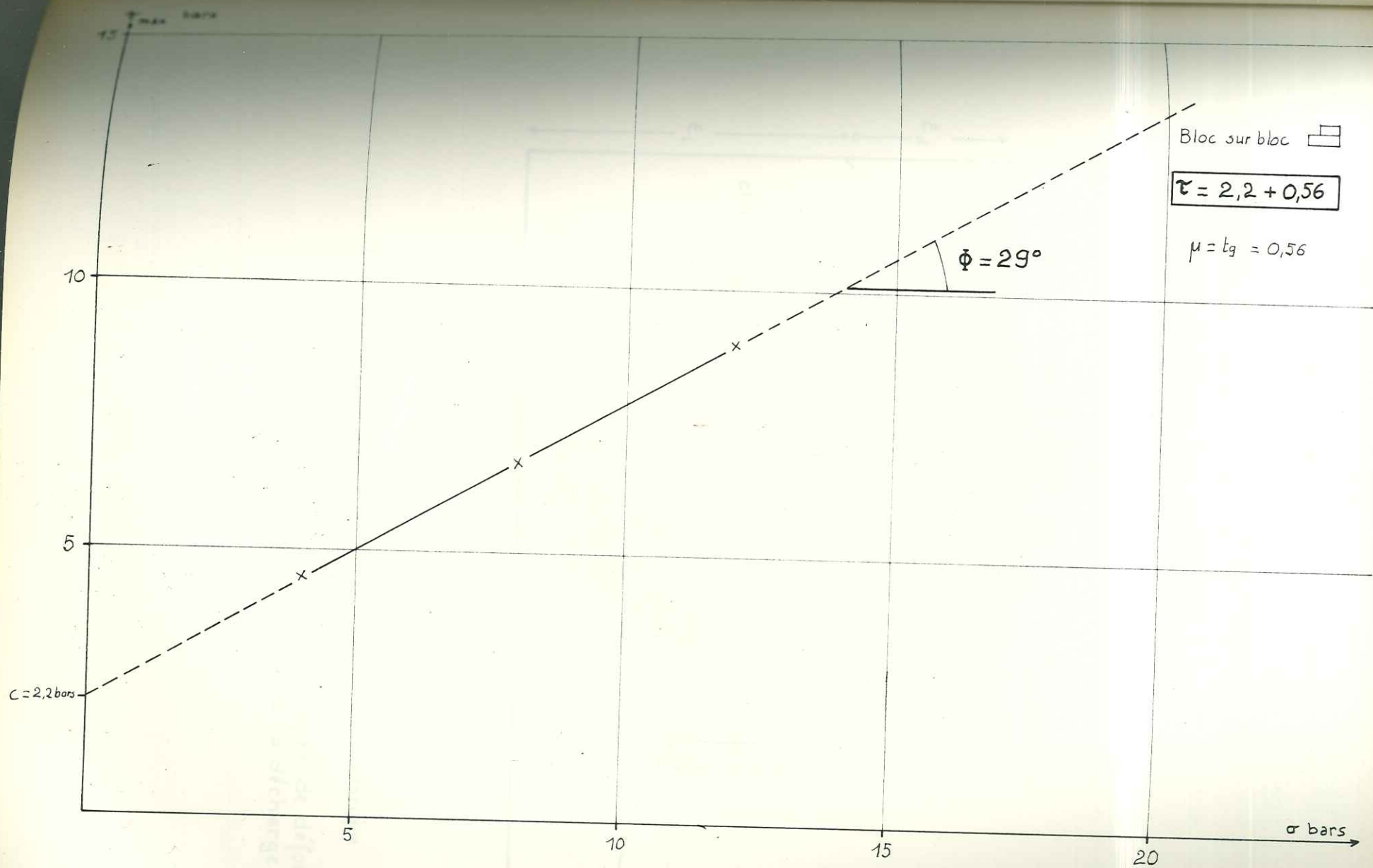


Fig.6-44 - Relation σ - $\tau_{\max}$ pour les essais de cisaillement de la figure 6-43.

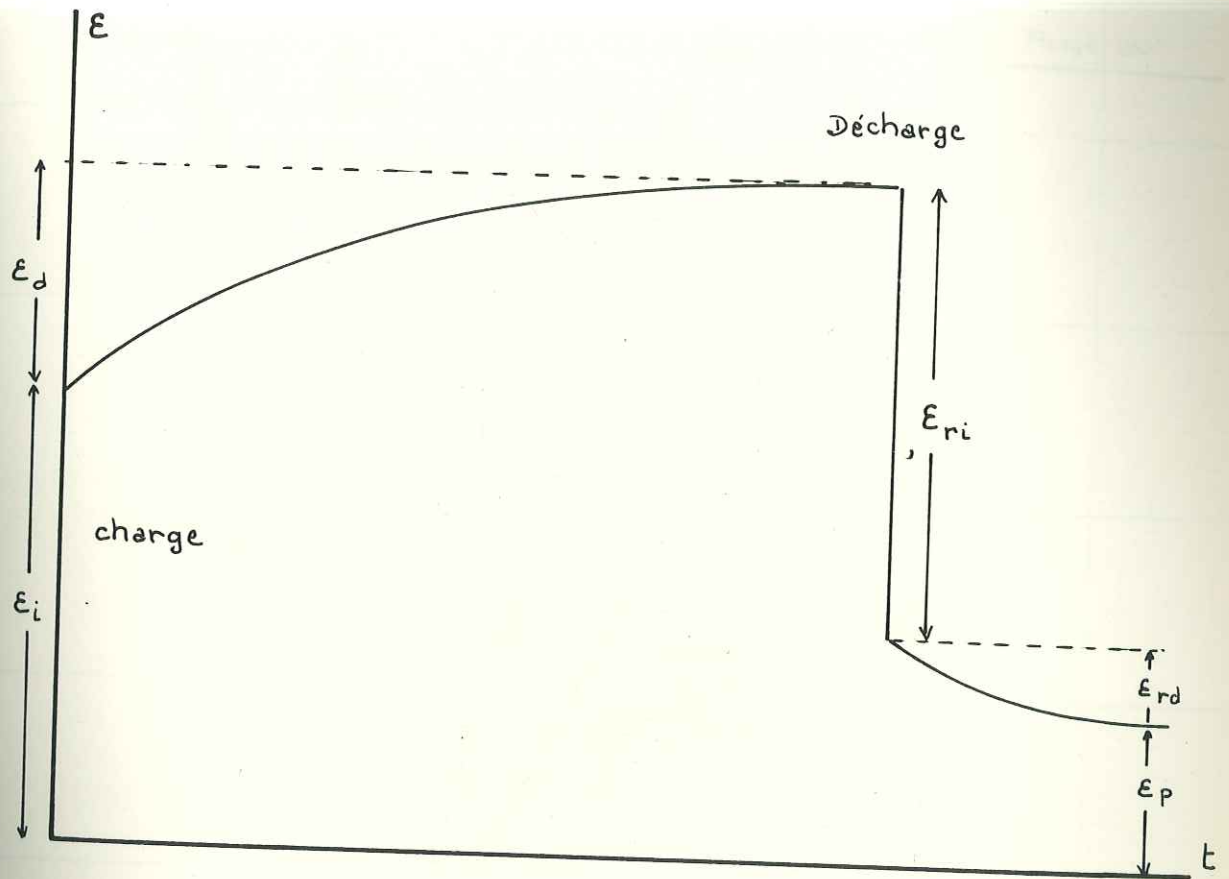


Fig. 6-45. Déformation visco-plastique théorique
sous contrainte constante
Notation des différents types de déformation
à la mise en charge et à la décharge.

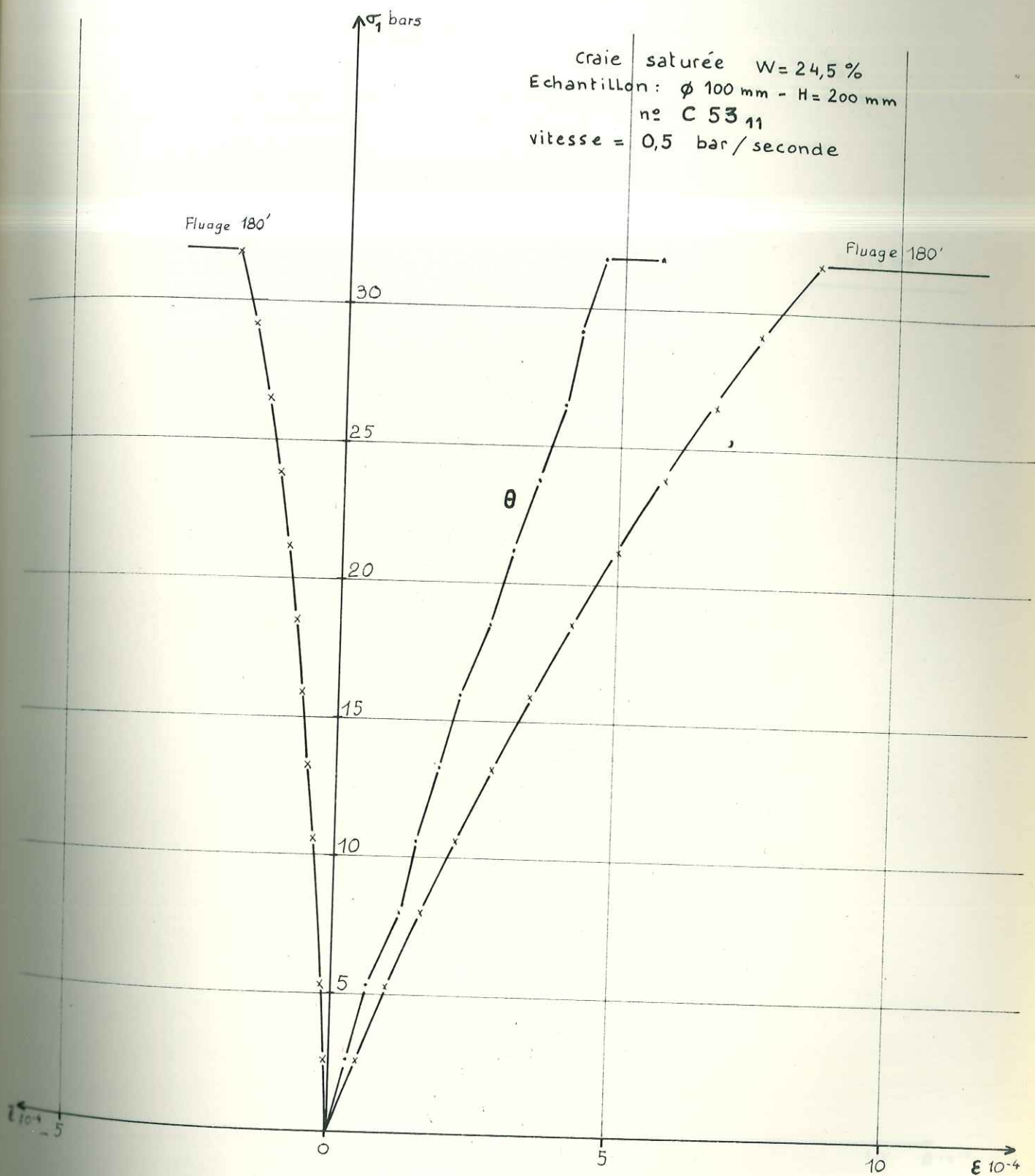


Fig. 6-46 - Courbes effort-déformation pendant la mise en charge avant le fluage.

- Evolution du coefficient de compressibilité θ

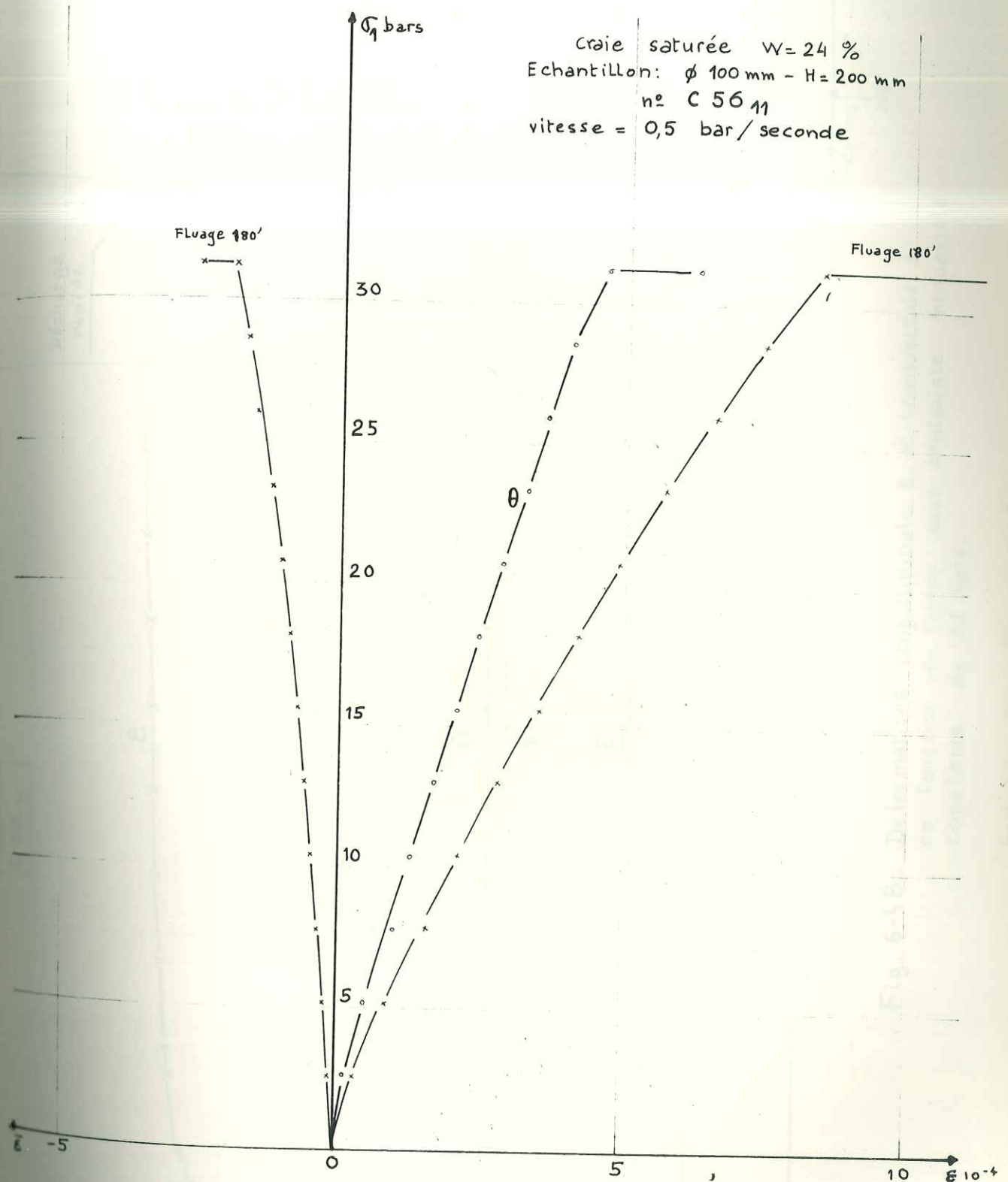


Fig. 6-47 - Courbes effort-déformation pendant la mise en charge avant le fluage
 - Evolution du coefficient de compressibilité θ

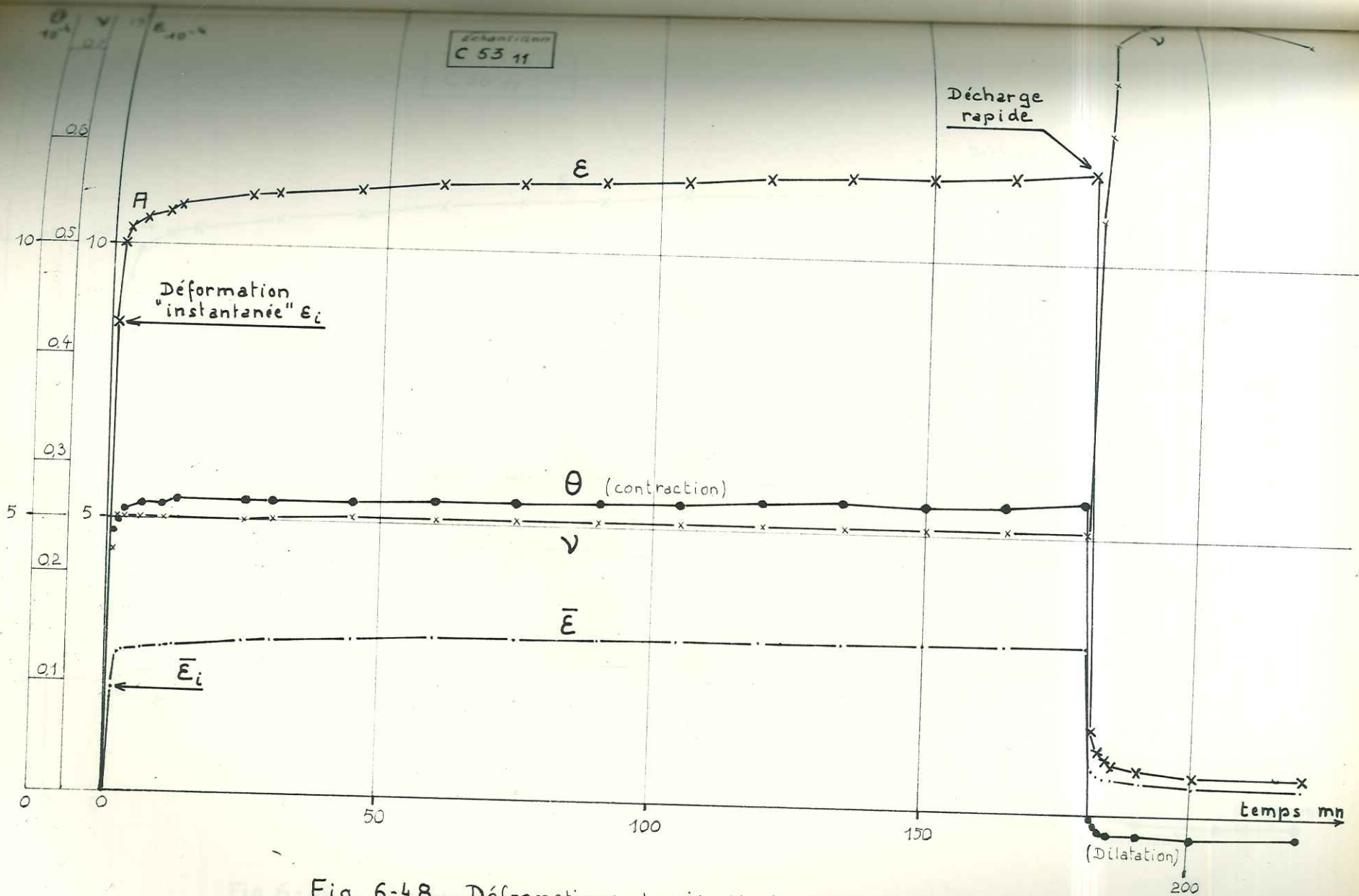


Fig. 6-48. Déformations longitudinale ϵ et transversale $\bar{\epsilon}$ en fonction du temps sous contrainte monoaxiale constante de 32 bars.

- Evolution du coefficient de Poisson ν et du coefficient de compressibilité θ

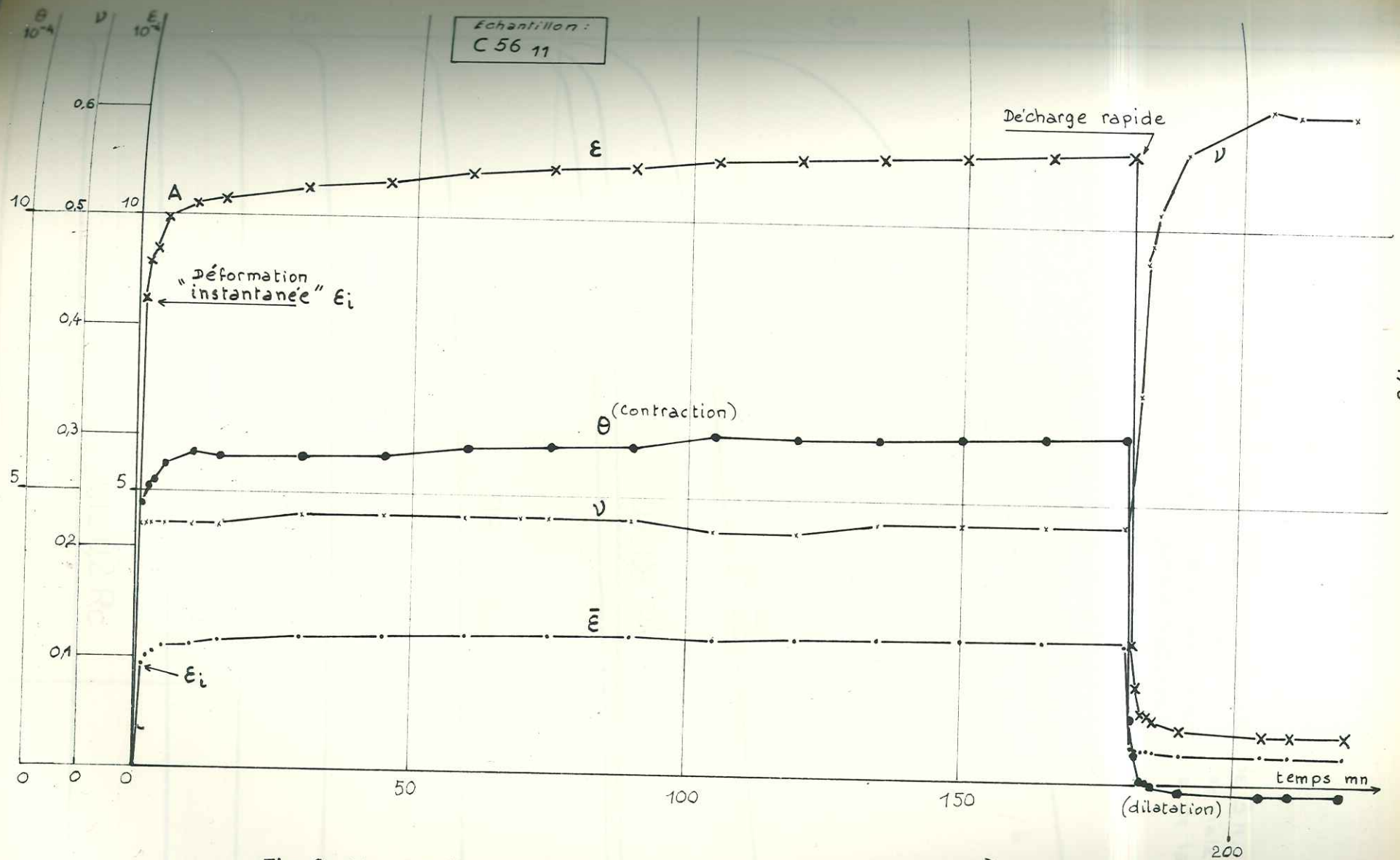
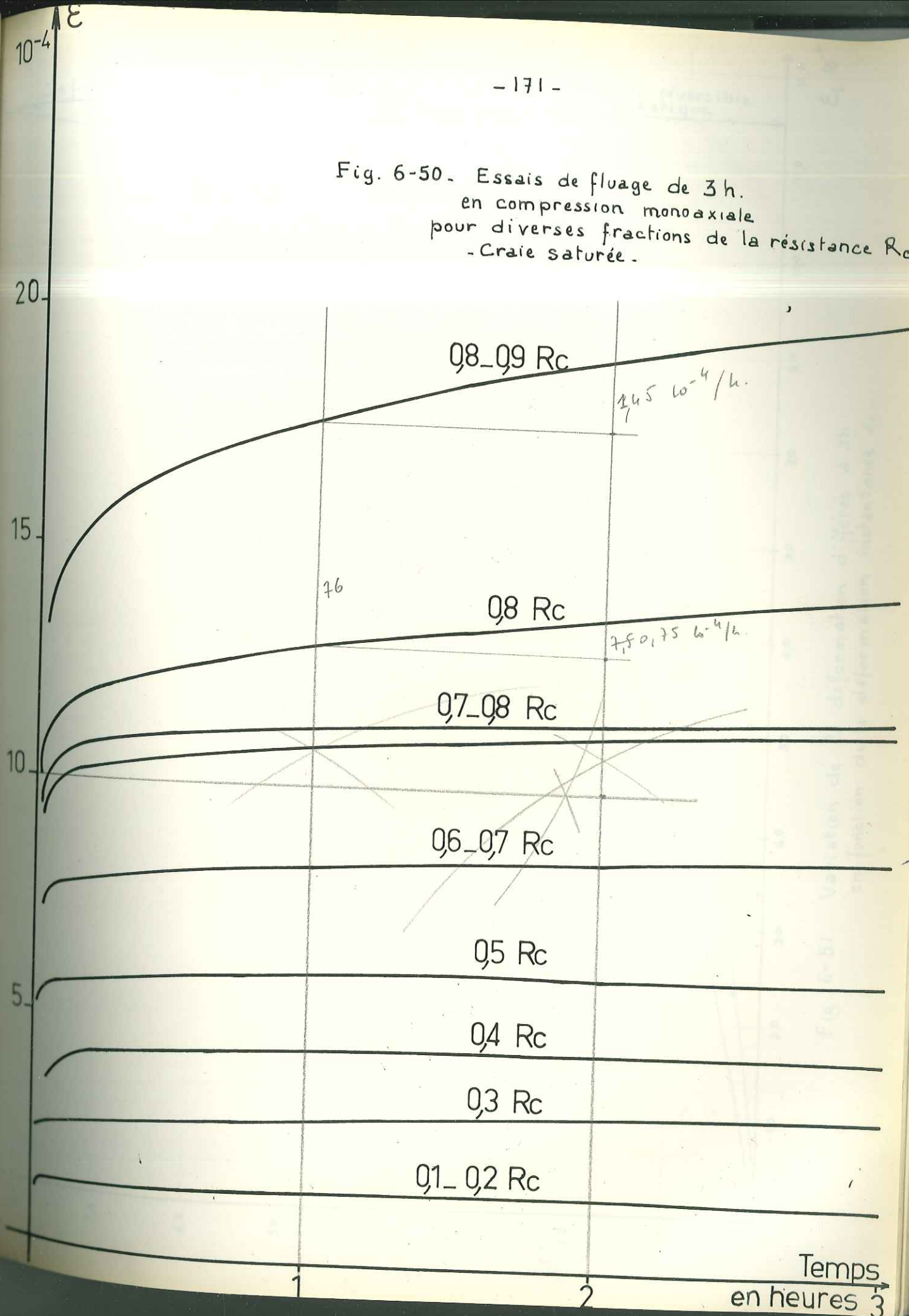


Fig.6-49 — Déformations longitudinale ϵ et transversale $\bar{\epsilon}$ en fonction du temps sous contrainte monoaxiale constante de 32 bars.

— Evolution du coefficient de Poisson ν et du coefficient de compressibilité θ .

Fig. 6-50. Essais de fluage de 3 h.
en compression monoaxiale
pour diverses fractions de la résistance R_c
- Craie saturée.



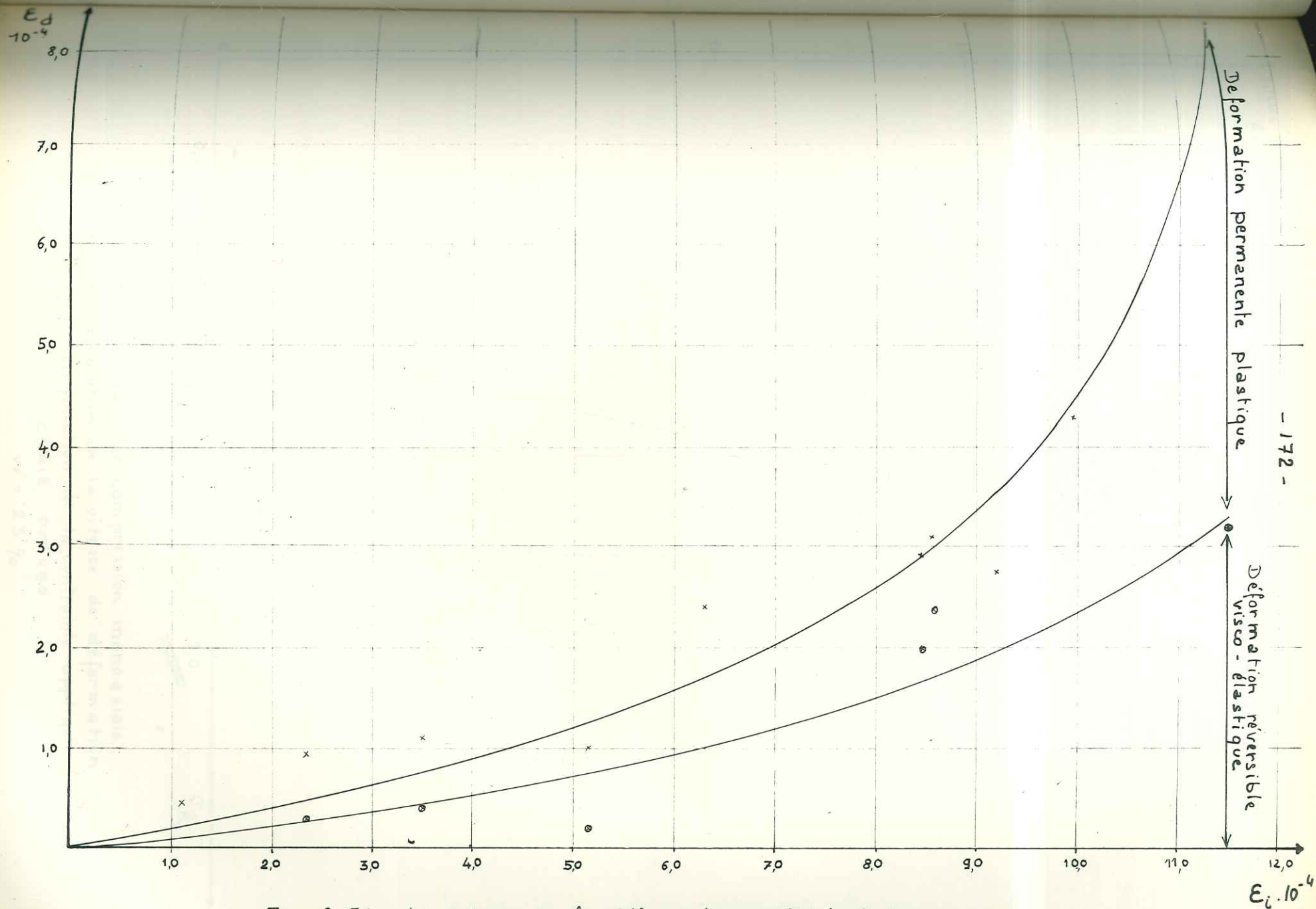


Fig. 6-51. Variation de la déformation différée à 3h en fonction de la déformation instantanée E_i .

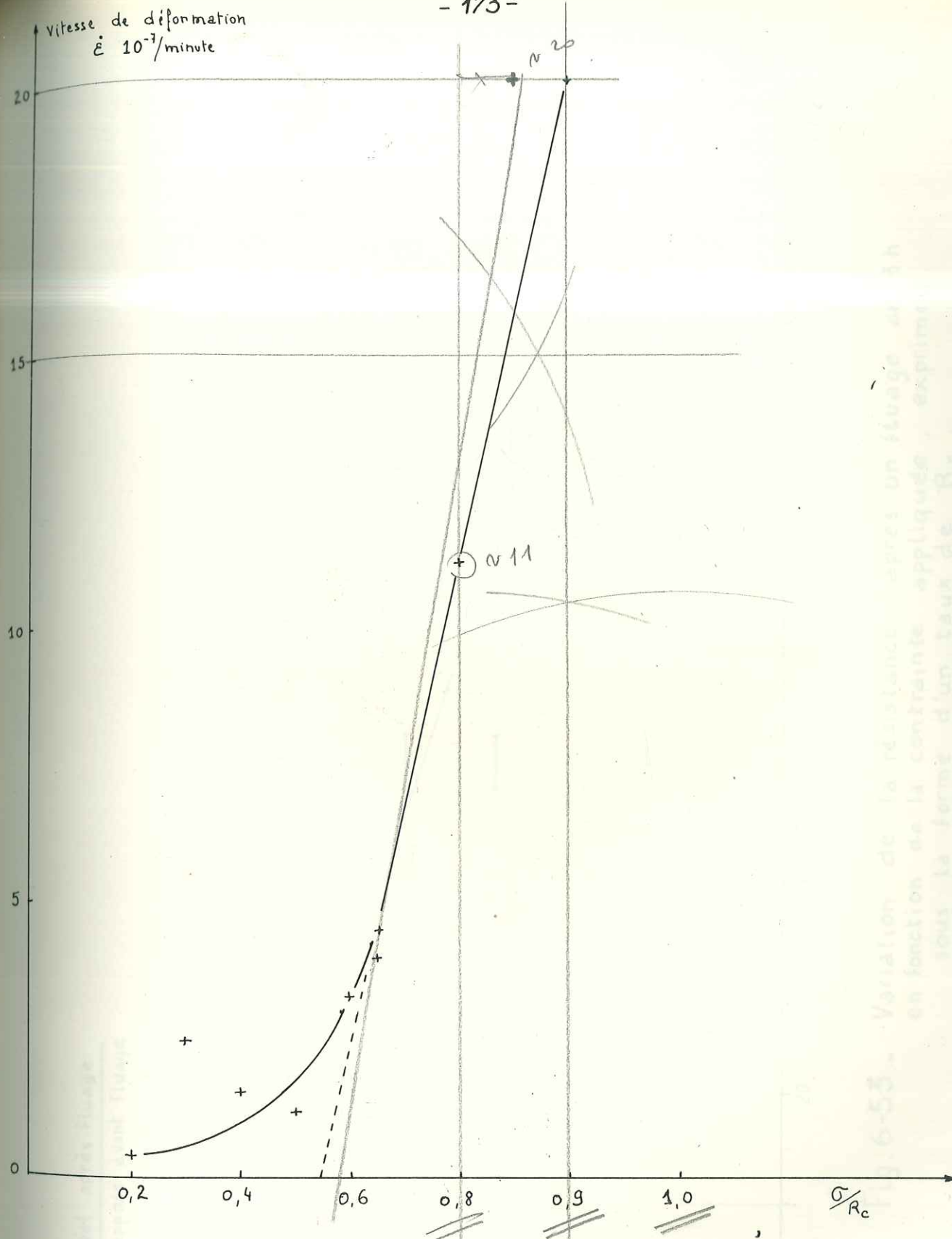


Fig 6-52 - Fluage en compression monoaxiale.
Evolution de la vitesse de déformation
en fonction de la contrainte appliquée.
CRAIE PM 480
 $W = 25 \%$

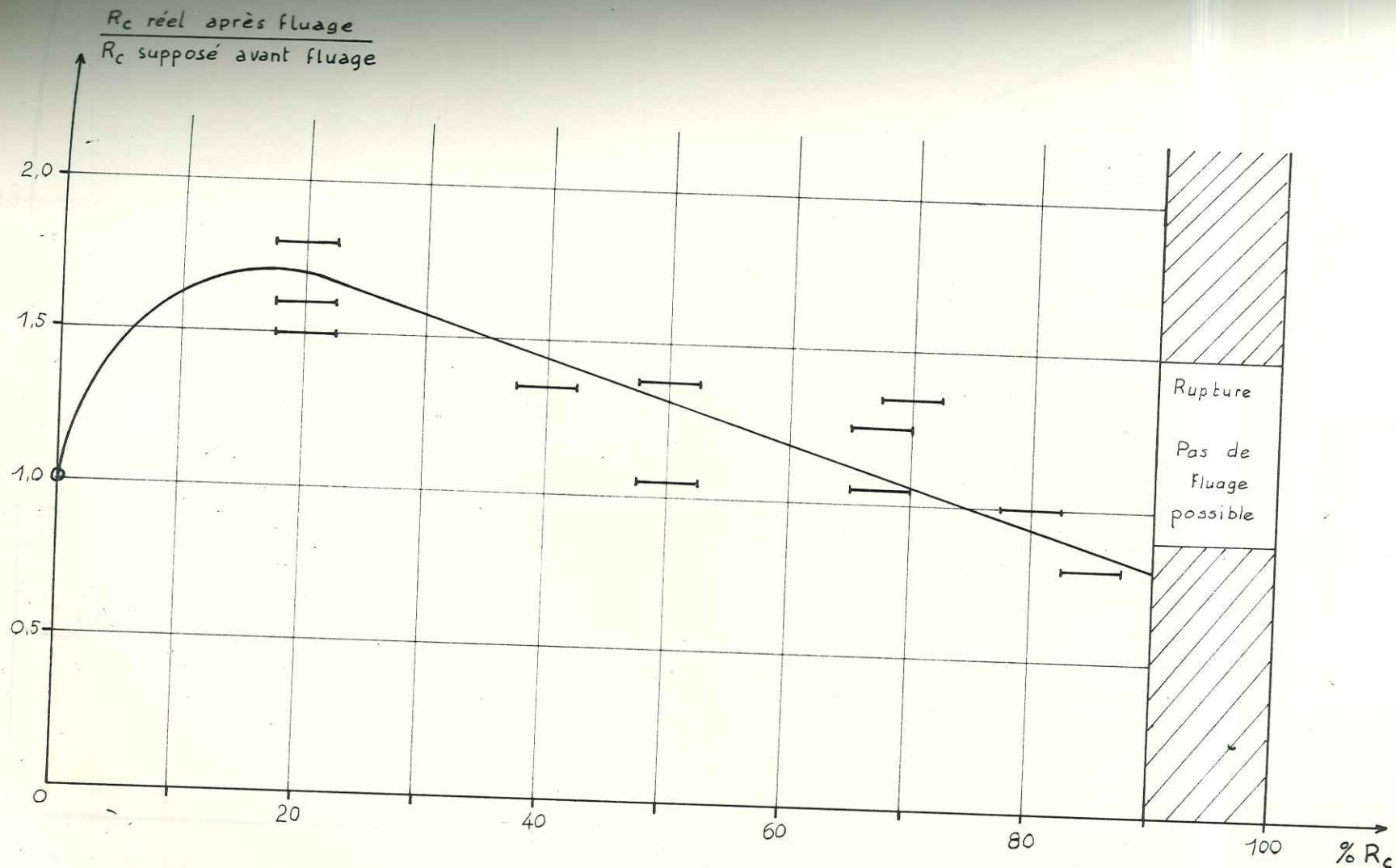


Fig. 6-53 - Variation de la résistance après un fluage de 3 h en fonction de la contrainte appliquée, exprimée sous la forme d'un taux de R_c .

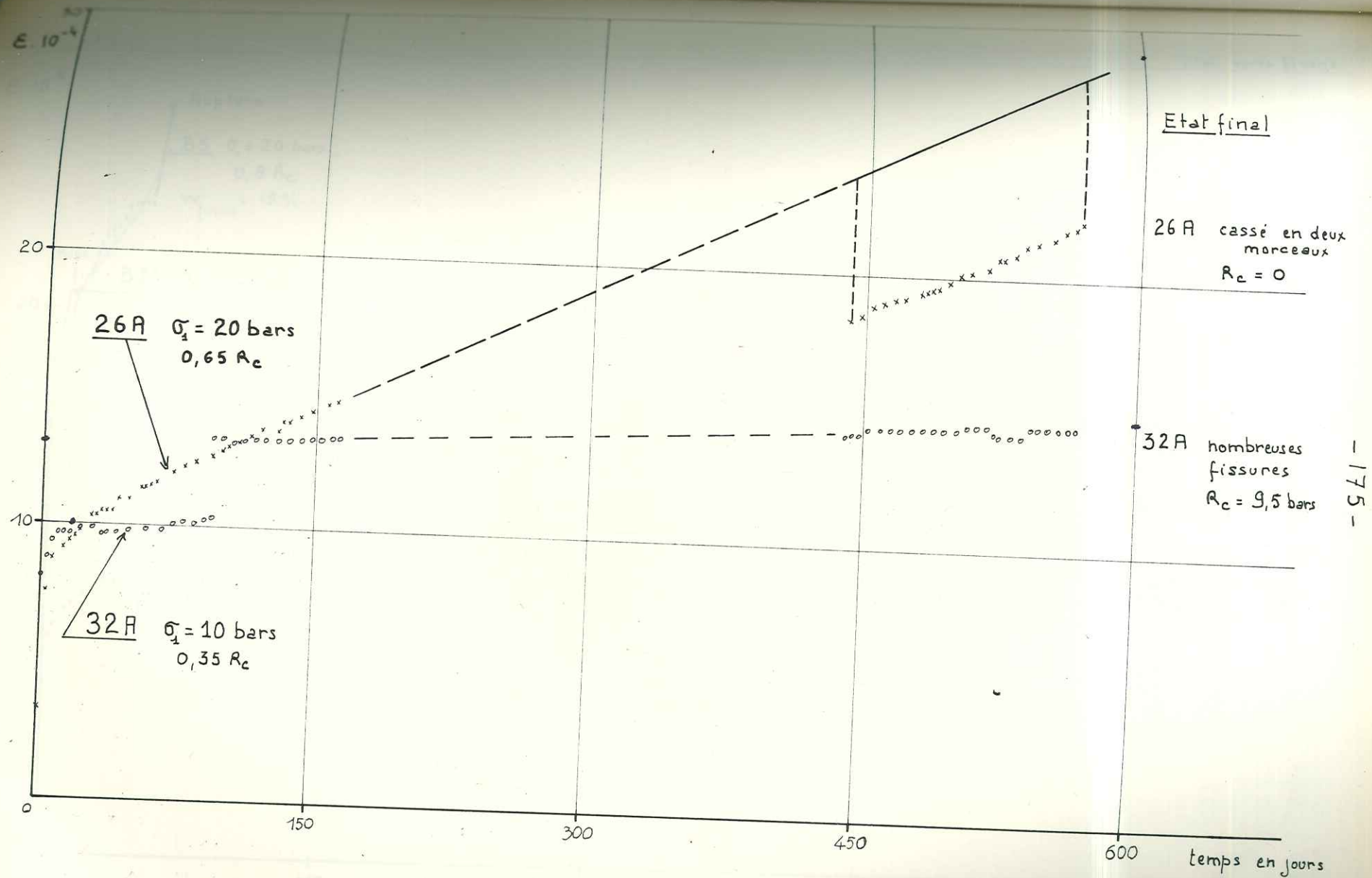


Fig. 6-54. Essais de fluage de longue durée en compression monoaxiale.
 Echantillons $\phi 100 \text{ mm}$ $H 200 \text{ mm}$. teneur en eau initiale $\approx 25\%$
 - Sondages galerie 2 et 3 - teneur en eau finale $\approx 15\%$

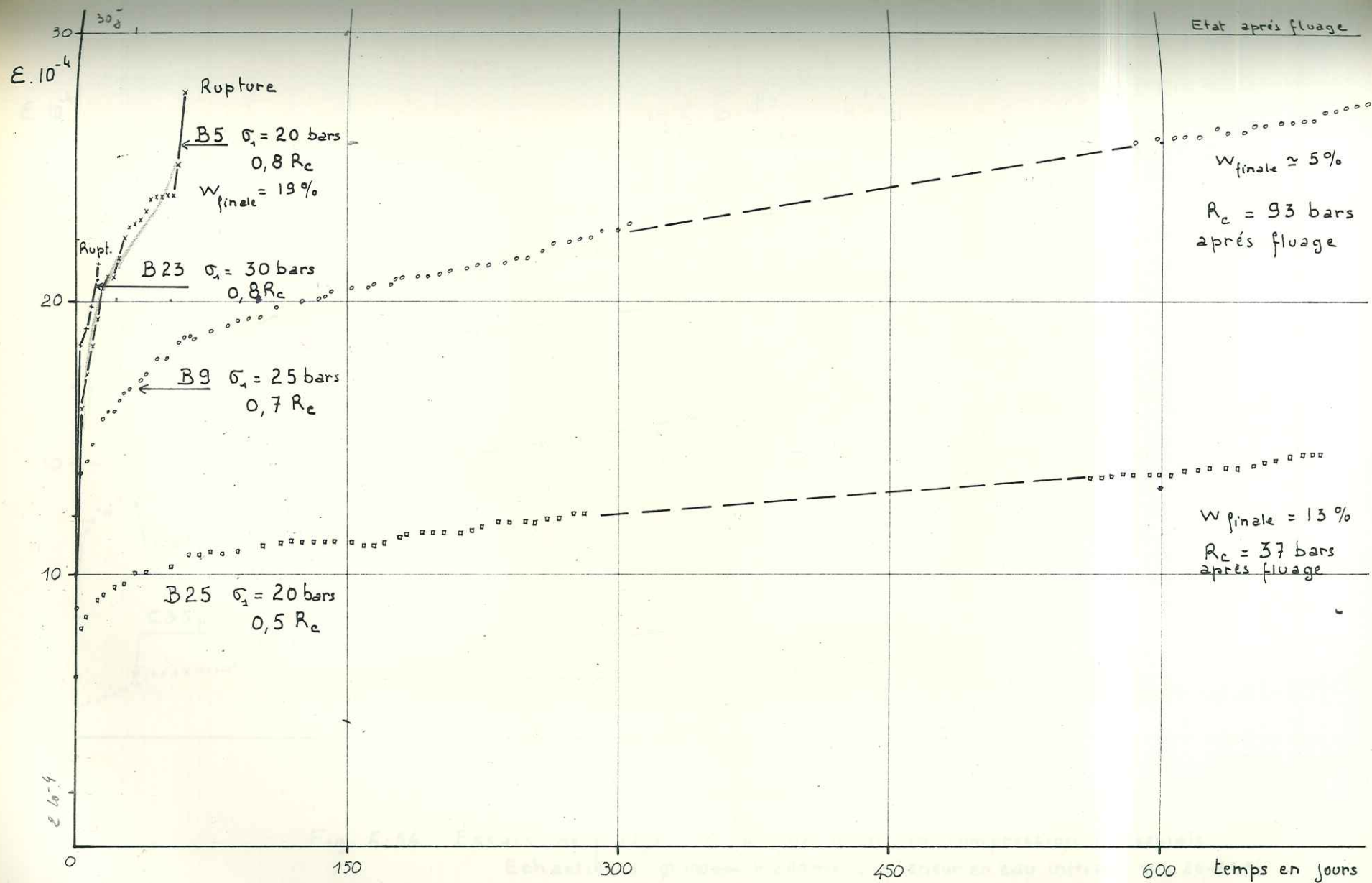


Fig. 6-55. Essais de fluage de longue durée en compression monoaxiale.
Echantillons $\varnothing 100\text{mm} \times 200\text{mm}$. Teneur en eau initiale $w \approx 24-25\%$

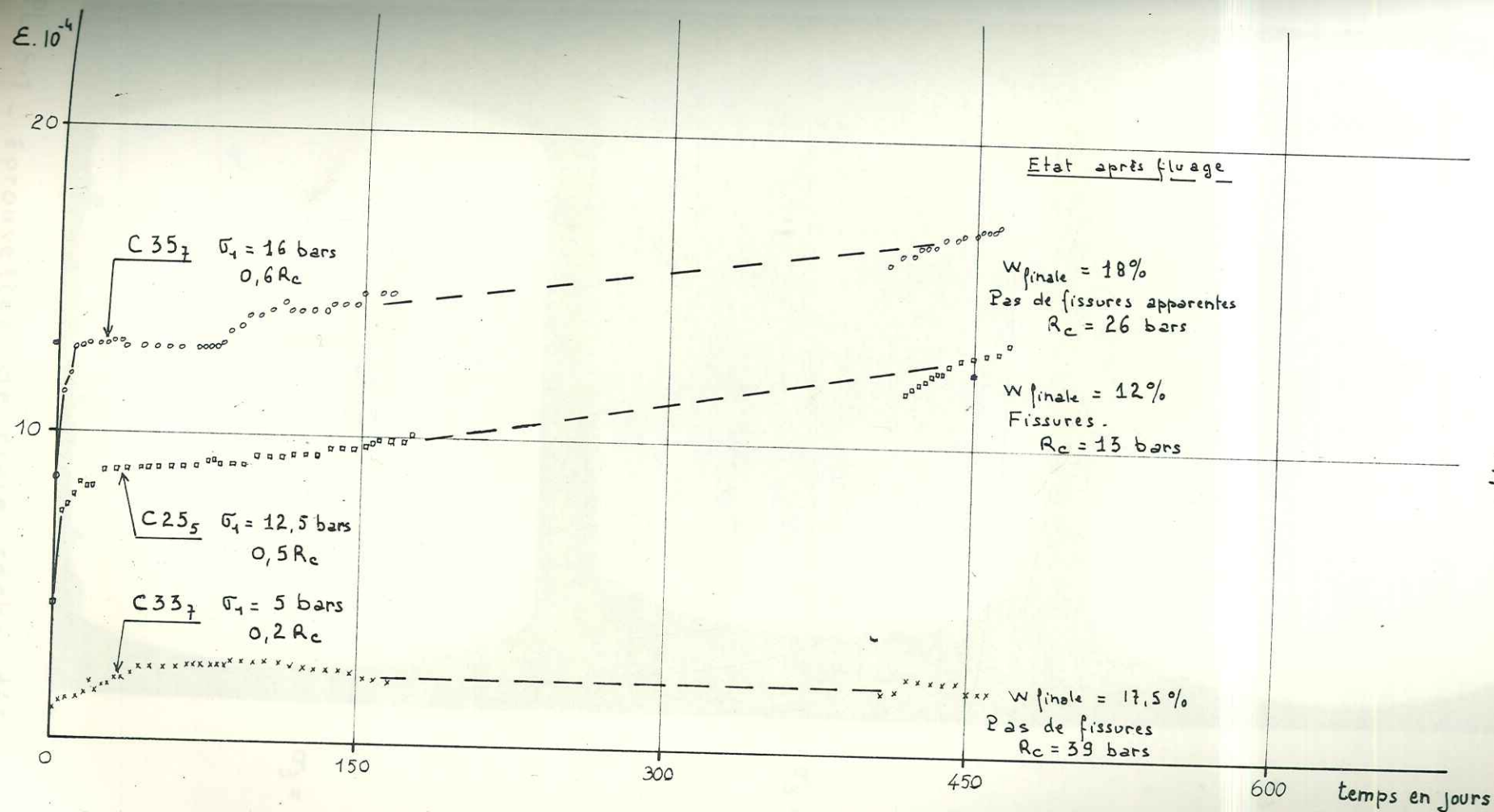
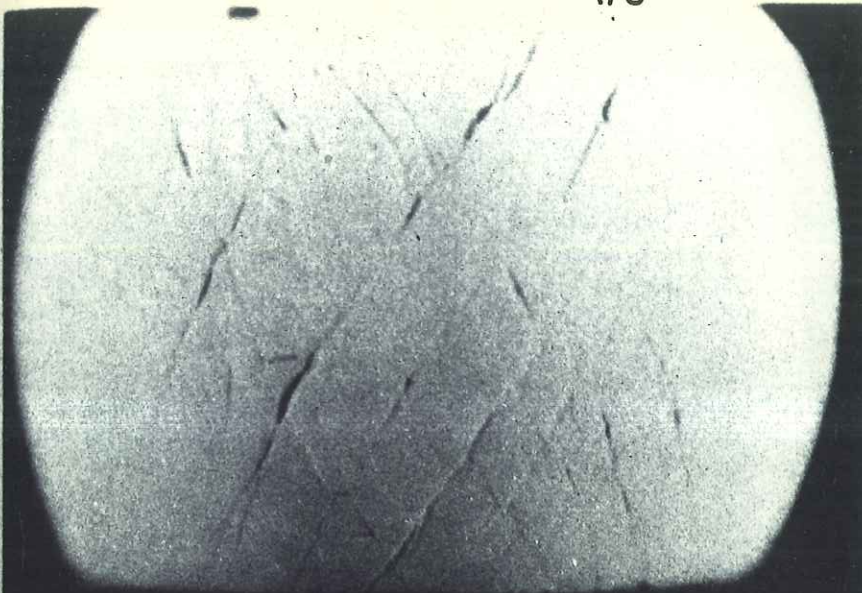
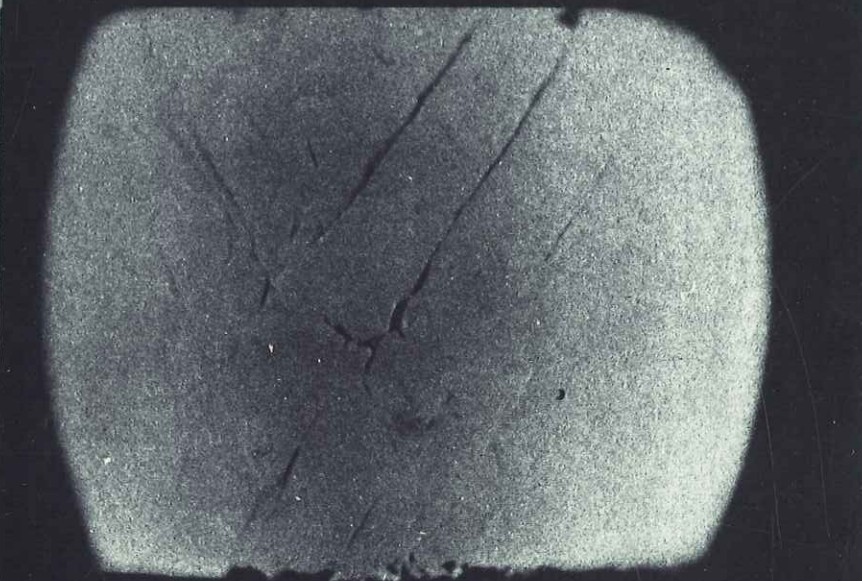


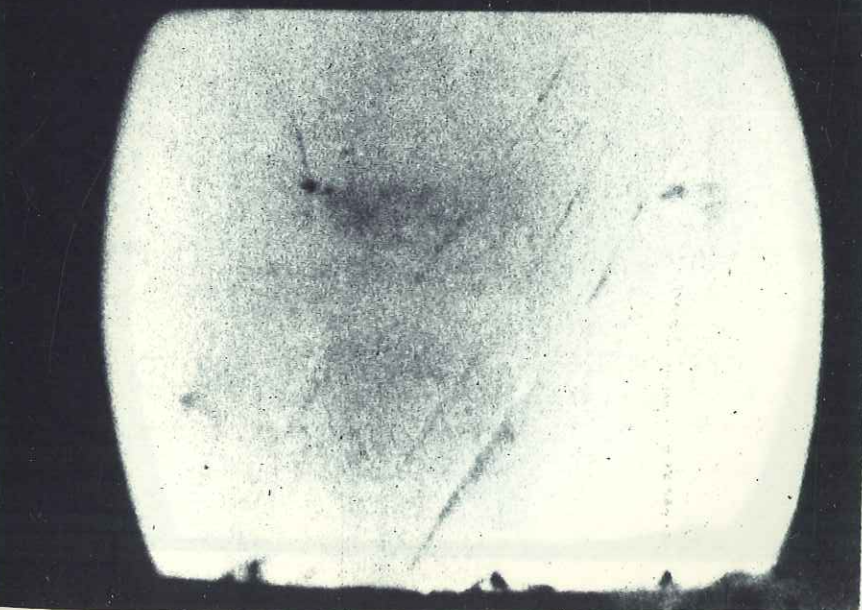
Fig. 6-56. Essais de fluage de longue durée en compression monoaxiale
 Échantillons $\varnothing 100\text{mm}$ $H 200\text{mm}$ - Teneur en eau initiale $w = 24-25\%$
 .PM 480.



$\sigma_3 = 100$ bars

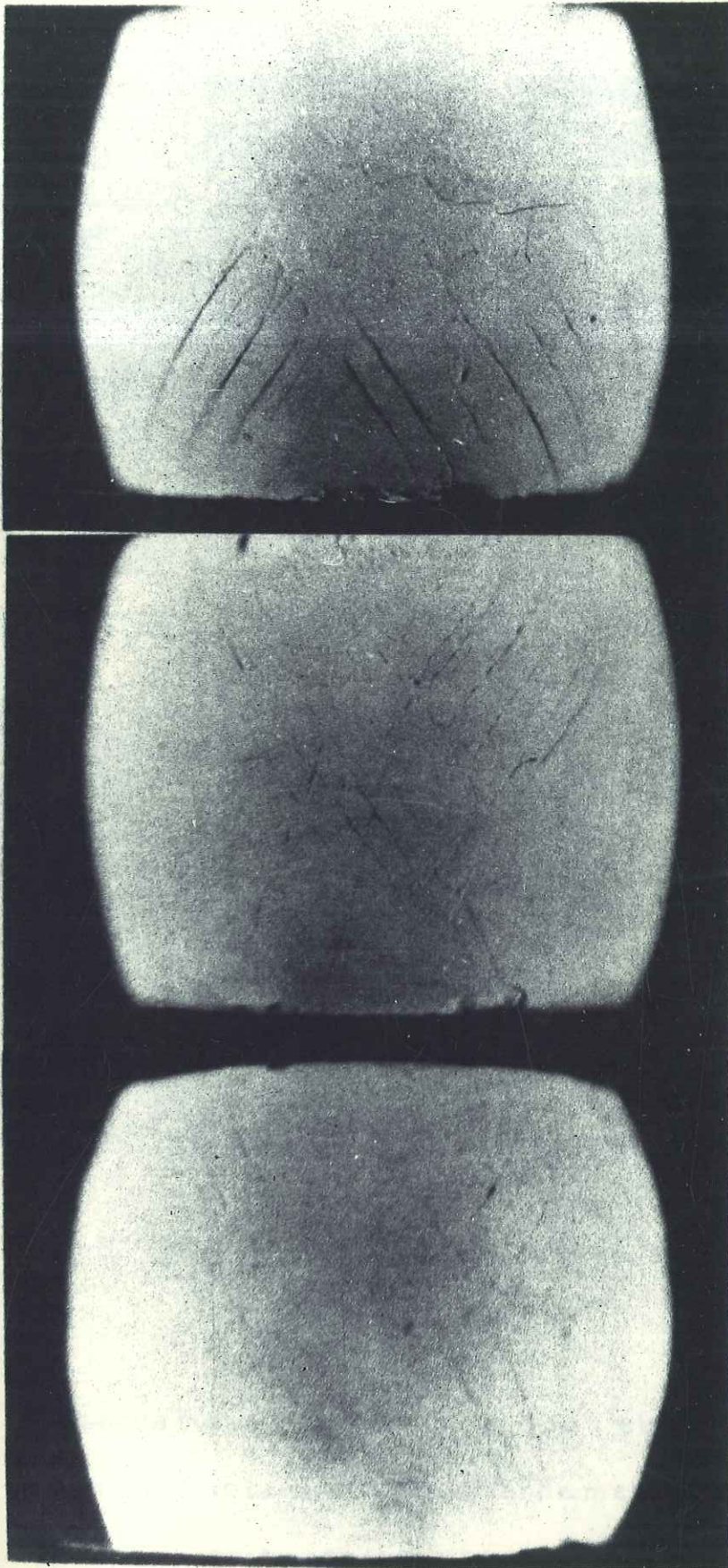


$\sigma_3 = 200$ bars



$\sigma_3 = 300$ bars

PL. 6-1 - Eprouvettes de craie sèche déformées sous différentes pressions latérales σ_3 - $\epsilon_1 = 50 \cdot 10^{-2}$

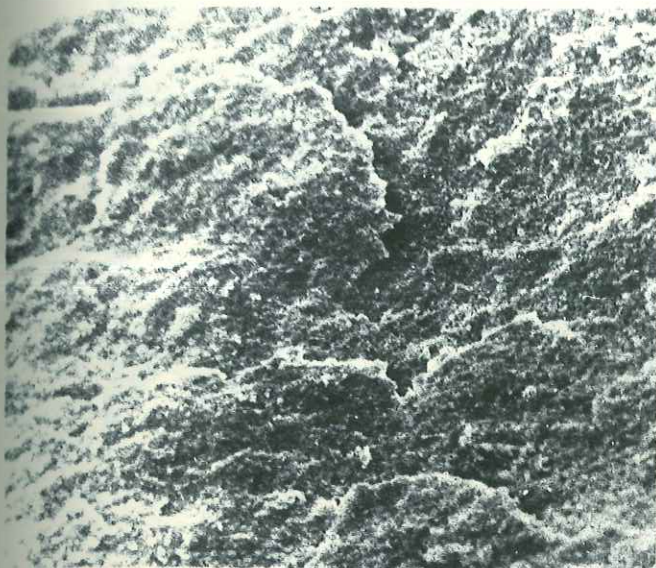


$\sigma_3 = 400$ bars

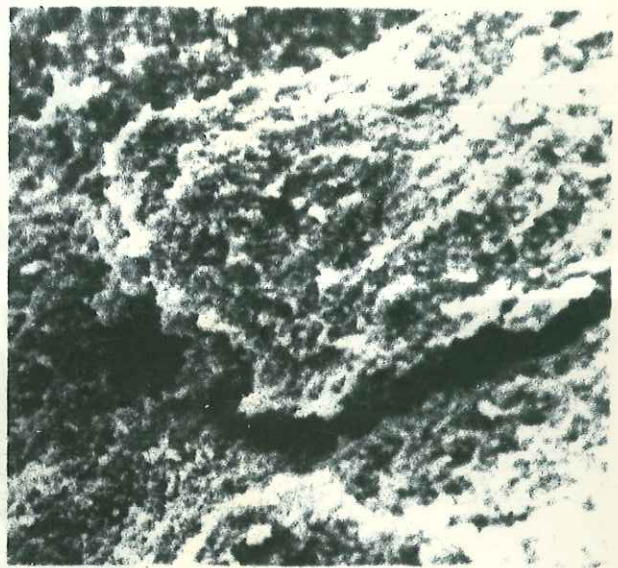
$\sigma_3 = 500$ bars

$\sigma_3 = 900$ bars

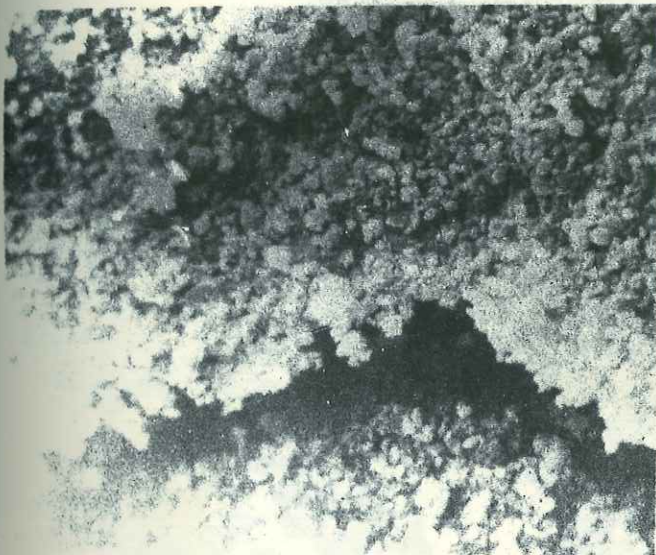
PL. 6-2 - Eprouvettes de craie sèche déformée sous différentes pressions latérales σ_3 - $\epsilon_1 = 50 \cdot 10^{-2}$.



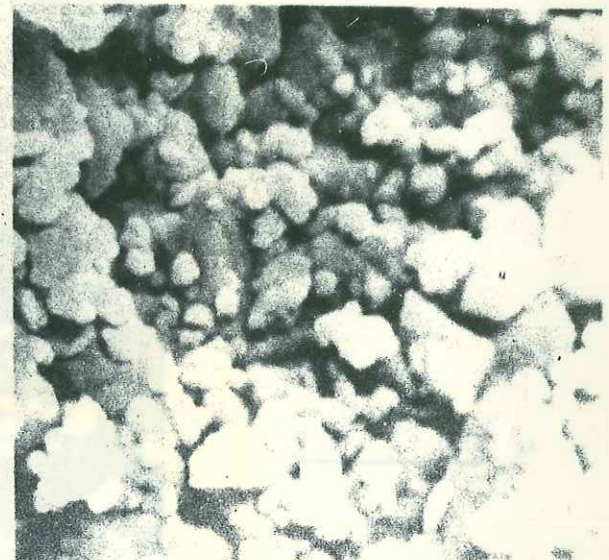
200 μ



50 μ



10 μ



2 μ

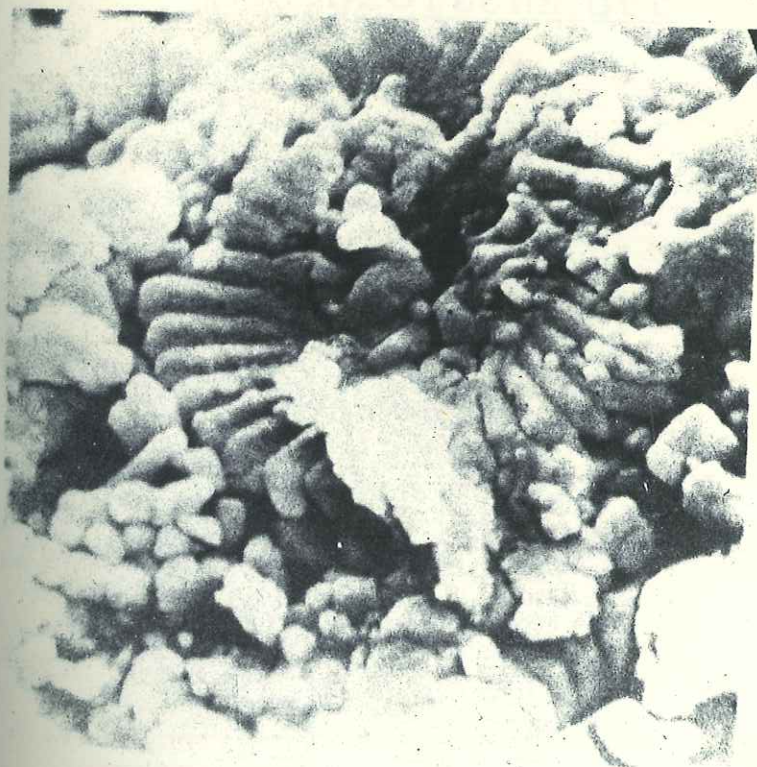
PL. 6-3 -

Observations au microscope électronique à balayage
d'un des plans de cisaillement d'un échantillon sec
déformé sous contrainte triaxiale.

$$(\sigma_3 = 300 \text{ bars} - \epsilon_1 = 43\%)$$



0 2 4 μ



0 1 2 μ

PL.6-4 - Observations au microscope électronique à balayage du cœur d'un échantillon sec déformé sous contraintes triaxiales, avant le cisaillement.
($\sigma_3 = 900$ bars - $\epsilon_1 = 33\%$)

TROISIEME PARTIE

GEOTECHNIQUE

CHAPITRE 7.

LA CRAIE ET LES TRAVAUX SOUTERRAINS.

- 7.1. Introduction
- 7.2. Théorie de la cavité cylindrique
- 7.3. Mesure des contraintes dans le massif de Craie
- 7.4. Propriétés du massif de Venteuil
- 7.5. Modèle réduit de l'usine souterraine
- 7.6. Pratique du chantier
- 7.7. Retour à la théorie.- Théorie du soutènement.

7.1. INTRODUCTION

Au Congrès de Mécanique des Sols de Mexico en 1969, R.B. PECK dans un rapport très important a rappelé que la technique et la pratique des travaux souterrains en terrain de faible résistance étaient loin de constituer un chapitre classique de la Mécanique des Sols et des Roches, et il a, avec succès, tracé les lignes de force de ce chapitre en rassemblant des résultats encore trop peu nombreux et en soulignant les points essentiels souvent négligés ou oubliés.

Ces points essentiels sont au nombre de trois :

- Possibilité d'exécution (en anglais : feasibility)
- Limitation des dégâts aux ouvrages existants
- compatibilité de la durée de vie du tunnel avec son utilisation.

Le premier point est étroitement lié à la nature du terrain et à la présence de l'eau, et parfois au but du projet. La solidité d'un terrain est une notion relative. Elle dépend de l'importance de la couverture et des dimensions de la cavité. L'hétérogénéité du massif peut faire craindre des pertes locales de résistance et le report de l'effort dans un volume restreint.

L'hétérogénéité et les discontinuités du massif posent aussi le problème de l'écoulement de l'eau dans ce massif. LOUIS⁽¹⁾ [1968], a montré qu'il était nécessaire de déterminer la répartition du potentiel hydraulique et que la poussée d'écoulement dépendait beaucoup de l'orientation des fissures par rapport à la cavité.

Le deuxième point ne concerne que les cavités proches de la surface. Il s'agit en effet de tassements provoqués par la perte de sol, c'est-à-dire la différence entre le volume de terrain enlevé et le volume réel de la cavité. Les mouvements

(1) LOUIS (C.), 1968.- Etude des écoulements d'eau dans les roches fissurées et de leur influence sur la stabilité des massifs rocheux. E.D.F., Bull. de la Direction des Etudes et Recherches, Série A, n° 3, pp. 5-132.

de terrain existent toujours mais leur effet sur la surface décroît avec l'augmentation de la profondeur de la cavité (Fig. 7-1a) et avec la nature du terrain (Fig. 7-1b).

Enfin le troisième point aborde le problème du soutènement et du revêtement. Le vide provoqué par l'excavation provoque un déséquilibre de l'état de contrainte. Le terrain, en mobilisant sa résistance, tend alors à se déformer pour retrouver l'équilibre détruit. La forme et les dimensions de la cavité peuvent jouer un rôle important dans le rétablissement de l'équilibre. D'autre part, si le terrain supporte un certain cisaillement, il peut participer à la stabilité du tunnel. Le choix du soutènement et de sa vitesse de mise en place doit donc tenir compte le plus possible du comportement rhéologique du massif.

Nous développerons ~~cés idées~~ plus en détail en examinant le cas de la craie et en tentant de rapprocher son comportement in situ et son comportement au laboratoire, que nous venons de définir dans l'étude rhéologique.

Après un bref rappel de la théorie du tunnel circulaire, nous donnerons quelques résultats de mesures de contrainte effectuées dans diverses excavations souterraines en France. Puis nous aborderons les propriétés du massif de Venteuil (Marne) à l'aide des mesures et des résultats fournis par le Service géologique et géotechnique d'Electricité de France.

C'est également grâce à ce service que nous pourrions examiner le comportement d'un modèle réduit in situ du projet de cavité.

Enfin, après quelques remarques sur la pratique du chantier faites au cours de l'exécution de la galerie de recherche, nous terminerons par la théorie du soutènement (d'après PECK, [1969] et son application au cas de Venteuil.

7.2. Théorie de la cavité cylindrique.

Il est commode de remplacer les forces de volume dues à la pesanteur par des forces extérieures agissant sur un contour

fictif loin des cavités à étudier (milieu infini), et cette hypothèse est acceptable dès que la profondeur d'un ouvrage souterrain est assez grande par rapport à sa hauteur pour qu'on puisse négliger la variation de couverture sur la hauteur de l'ouvrage.

Dans ces conditions, le problème du tunnel circulaire de rayon a en milieu continu, homogène, isotrope et élastique a été résolu par KIRSCH [1898] dans le cas bidimensionnel :

$$\sigma_r = \frac{p}{2} \left(1 - \frac{a^2}{r^2} \right) + \frac{p}{2} \left(1 + \frac{3a^4}{r^4} - \frac{4a^2}{r^2} \right) \cos 2\theta$$

$$\sigma_\theta = \frac{p}{2} \left(1 + \frac{a^2}{r^2} \right) - \frac{p}{2} \left(1 + \frac{3a^4}{r^4} \right) \cos 2\theta$$

$$\tau_{r\theta} = -\frac{p}{2} \left(1 - \frac{3a^4}{r^4} + \frac{2a^2}{r^2} \right) \sin 2\theta$$

Où σ_r , σ_θ et $\tau_{r\theta}$ sont respectivement les contraintes radiale, tangentielle et de cisaillement.

La figure 7-2 montre la répartition des contraintes radiale et tangentielle en fonction de la distance $r = f(a)$ du centre de la cavité et de l'angle θ , dans le cas d'une contrainte monoaxiale p .

Les contraintes à la paroi sont :

$$\sigma_r = 0$$

$$\sigma_\theta = p (1 - 2 \cos 2\theta)$$

$$\tau_{r\theta} = 0$$

Les valeurs remarquables de la contrainte tangentielle à la paroi sont :

θ	0	$\pi/6$	$\pi/4$	$\pi/3$	$\pi/2$
σ_{θ}	$-\rho$	0	ρ	2ρ	3ρ

Dans le cas biaxial, l'état de contrainte est représenté par ces deux composantes principales verticale p et horizontale q .

Le principe de superposition de deux états monoaxiaux fournit la solution à la paroi :

θ	0	$\pi/6$	$\pi/4$	$\pi/3$	$\pi/2$
σ_{θ}	$3q-p$	$2q$	$p+q$	$2p$	$3p-q$

Enfin, dans le cas hydrostatique, les deux états sont égaux, $p = q$ et la solution à la paroi est indépendante de θ :

$$\sigma_{\theta} = 2p = 2q$$

La figure 7-3 représente schématiquement les 3 états que nous venons d'envisager.

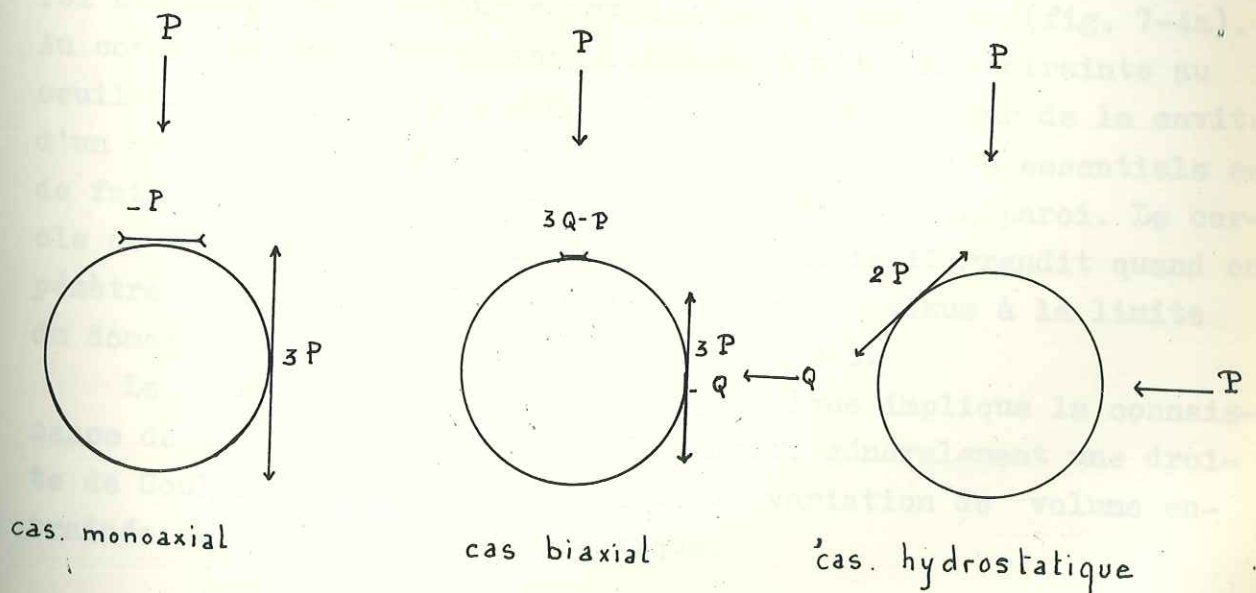


Fig 7-3

Examinons maintenant plus en détail le cas hydrostatique qui, nous le verrons dans la suite, s'applique au site de Venteuil. La figure 7-4a montre la variation des contraintes radiale σ_r et tangentielle σ_θ et du déplacement radial en fonction de la distance à la paroi. La différence $|\sigma - p|$ décroît en $1/a^2$ et devient négligeable à partir de $3a$.

Au contraire le déplacement radial ou variation de rayon

$$\Delta a = pa(1 + \nu)/E$$

ne décroît que comme $1/a$ c'est-à-dire beaucoup moins vite que la contrainte tangentielle.

On notera que les contraintes ne dépendent pas de a et que les déplacements sont proportionnels à a . Ceci signifie qu'il n'y a pas de différence de contrainte à la paroi d'un trou de 10 mm ou à celle d'une cavité de 10 m. La seule différence réside dans la zone intéressée par les déplacements, quelques centimètres dans le premier cas, plusieurs dizaines de mètres dans le deuxième cas.

Si le domaine élastique est limité par la rupture fragile, la stabilité n'est assurée que tant que le cercle de Mohr à la paroi n'atteint pas la courbe intrinsèque du matériau (fig. 7-4a). Au contraire une déformation plastique limite la contrainte au seuil de plasticité et provoque la formation, autour de la cavité, d'un anneau plastique (fig. 7-4b) dont un des rôles essentiels est de faire décroître la contrainte tangentielle à la paroi. Le cercle de Mohr à la paroi est alors minimum mais il grandit quand on pénètre dans l'anneau plastique et devient maximum à la limite du domaine plastique et du domaine élastique.

Le calcul du rayon de la zone plastique implique la connaissance de la courbe intrinsèque du massif, généralement une droite de Coulomb, et une hypothèse sur la variation de volume entraînée par la déformation plastique.

Si le contour de la cavité n'est pas circulaire, des solutions analogues existent pour les contours elliptiques. Mais l'élançement de l'ellipse, s'il est perpendiculaire à la composante majeure du champ de contraintes, provoque un excès de compression aux piédroits et un excès de traction en calotte. Si au contraire ellipse et contraintes principales ont le même élançement, la cavité bénéficie de conditions aussi favorables que le cercle en champ hydrostatique (fig. 7-5).

Mais l'ellipse ne permet pas seulement de s'adapter au tenseur contrainte, elle permet également de s'adapter au tenseur déformation si celui-ci est anisotrope.

Il serait absurde, évidemment, de projeter des cavités parfaitement elliptiques. Si la profondeur est suffisante, les angles, pourvu qu'ils ne soient pas trop vifs, et les détails du contour ont, selon DUFFAUT [1970], moins d'importance que la forme globale et surtout l'élançement.

7-3. Mesure des contraintes dans le massif de Craie.

Nous disposons de quelques mesures de contraintes effectuées sur des piliers de carrière de craie ou de réservoir souterrain.

HABIB [1958] a montré que les contraintes dans les piliers d'une carrière de craie à Louveciennes n'étaient pas homogènes : elles sont deux à trois fois plus élevées à l'intérieur qu'à la surface, soit 10 à 15 bars au lieu de 5 bars pour une hauteur de recouvrement d'environ 50 m.

On peut également remarquer que les contraintes mesurées ne sont proches des contraintes théoriques qu'à l'intérieur des piliers. Enfin, la résistance décroît de la surface à l'intérieur.

HABIB en conclut que :

a - la déformation a surtout affecté les parois du pilier, rapprochant l'état de la craie de l'état de rupture ;

b - cette déformation a reporté les contraintes à l'intérieur du pilier ;

c - le coefficient de sécurité doit être calculé non pas

sur la section entière du pilier mais sur une section interne restreinte.

Nous ajouterons qu'à l'intérieur d'un pilier, la contrainte mesurée vaut 16 bars et la résistance 33 bars. Le rapport contrainte/résistance, égal à 0,5, place le pilier en condition critique de fluage, selon les conclusions du chapitre 6. Une légère augmentation de la contrainte, par exemple par dépilage, provoquera un rapide accroissement de la vitesse de déformation (selon la fig. 6-52).

Un autre exemple de mesures de contraintes est fourni par Electricité de France⁽¹⁾, sur un pilier de réservoir souterrain pour le stockage du propane à Rouen.

Sur trois faces, la contrainte mesurée est inférieure à la contrainte théorique, 30 bars au lieu de 48 bars. Sur la quatrième face, au contraire, la contrainte vaut 86 bars. Ceci prouve une sollicitation dissymétrique du pilier. Mais nous remarquons que la contrainte moyenne (moyenne des 4 faces) s'établit à 45 bars, très proche de la contrainte théorique.

A Venteuil, les mesures effectuées tant dans la zone du PM 300 avec une couverture de 70 m qu'au PM 480 avec une couverture de 95 m ont montré que la contrainte parallèle à l'axe du tunnel était égale à la pression de la couverture, et que la contrainte tangentielle verticale sur l'extrémité d'un diamètre horizontal était double de cette pression. Ces conditions correspondent bien à l'hypothèse d'un tunnel circulaire percé dans un champ hydrostatique.

7-4. Propriétés du massif de Venteuil.

La galerie de reconnaissance (voir préambule de la 2e partie) a permis de constater l'absence de diaclases et de joints de str-

(1) Rapport interne E.D.F.

tification apparents, donnant au massif de craie un aspect beaucoup plus continu qu'il est coutume de rencontrer.

L'entrée de la galerie à 10,5 m au-dessus du niveau moyen de la Marne est dans une craie sèche. A partir de 190 m d'avancement la galerie pénètre dans la craie saturée en permanence. Malgré l'existence de cette nappe phréatique, le débit total drainé par la galerie s'établira au maximum à 0,5 l/s.

Les propriétés mécaniques du massif ont été mesurées par différents procédés, mesures sismiques, essais à la plaque, dilatomètre E.D.F. Médératéc et vérin plat.

La vitesse du son mesurée aux PM 290, 520 et 612 a permis d'obtenir le module sismique et le coefficient de Poisson dynamique.

Le tableau 7-1 donne ces résultats :

	Moyenne	Ecart-Type
Vitesse longitudinale : 2090 à 2620 m/s	2310 m/s	110
Vitesse transversale : 1020 à 1270 m/s	1120 m/s	70
Coefficient de Poisson : 0,34		
Module de Young : 66 000 bars		

Tableau 7-1 - Mesures dynamiques.

On a pu observer que les valeurs de la vitesse du son devaient significativement plus fortes au delà du PM 720, les valeurs moyennes devenant :

$$V_L = 2600 \text{ m/s}$$

$$V_T = 1250 \text{ m/s}$$

$$\text{module} = 80\,000 \text{ bars}$$

Il semble que cette augmentation de la vitesse reflète l'augmentation de la contrainte verticale due à l'accroissement de la couverture. Ce sens de variation, général pour les roches, permet de distinguer le centre du massif de sa peau décomprimée, sans que cela se traduise pour la craie par une variation sensible de l'état de fissuration.

Nous ferons deux remarques concernant la comparaison avec des

mesures de vitesse au laboratoire. La première concerne le remarquable accord avec les vitesses in situ :

Vitesse longitudinale

Echantillon $\varnothing$ 100 mm H 200 mm

W = 25 %

- Verticalement.....	2 330 m/s
- Horizontalement.....	2 220 m/s

La deuxième remarque concerne le sens de variation. Les essais en laboratoire [DAGNAUX et co-auteurs, 1970] ont montré que la vitesse longitudinale à travers une éprouvette soumise à une contrainte monoaxiale croissait avec cette contrainte (fig. 7-6) confirmant ainsi les mesures in situ. La figure 7-7 compare les modules dynamiques mesurés au laboratoire et in situ.

Les valeurs des modules statiques obtenus par différentes méthodes sont reportées sur le tableau 7-2.

Il est remarquable que ces modules mesurés sur échantillons à l'échelle du décimètre au laboratoire aient été vérifiés sur le terrain. Seul l'essai à la plaque donne des valeurs par défaut. Les autres méthodes fournissent des modules du même ordre de grandeur, que le module de "laboratoire."

Parmi tous les sites d'essais sur le terrain réalisés par E.D.F., c'est le seul pour lequel un tel accord a été ^{trouvé} entre les diverses méthodes. L'interprétation aisée des résultats et une dispersion beaucoup plus limitée qu'ailleurs sont des avantages que l'on peut attribuer à la continuité du massif de craie.

Le fluage systématique de 10 minutes au sommet des cycles des essais à la plaque reste modéré. Il est maximum en calotte où il atteint 50 μ pour 100 bars de contrainte. Le fluage de 24 heures sous 80 bars est logarithmique (fig. 7-8) ce qui le différencie des fluages observés au laboratoire (Chapitre 6) mais peut s'expliquer par le niveau de contrainte appliquée beaucoup plus élevé. Le fluage se manifeste aussi dans l'essai au vérin plat.

Type d'essai et de mesure	Direction	Domaine de contrainte	Modules (en bars)
Laboratoire craie sèche	?	0 - 50 bars	70 000
Laboratoire craie saturée	verticale... horizontale	0 - 30 bars	60 000 40 000
Essai à la plaque	verticale... (calotte) horizontale	 0 - 60 bars	32 500 22,500
Dilatomètre en sondage	verticale horizontale	0 - 40 bars	40 000 50 000
Enfoncement de la paroi autour de la plaque	verticale... (calotte) horizontale	 ?	70 000 60 000
Vérin plat	verticale	20 - 40 bars	90 000
Sismique réfraction	horizontale	0	66 000

TABLEAU 7-2.- Module d'élasticité de la craie
pour différents types de mesure in situ
ou au laboratoire.

Il faut noter au sujet du fluage que la déformation permanente a pour effet de limiter la contrainte à la paroi à une valeur admissible en reportant l'effort à l'intérieur du massif. C'est aussi ce qui se produit dans un pilier. Mais si le volume rocheux est grand, cas d'un tunnel dans un massif infini, le report des contraintes à l'intérieur du massif est sans danger, ce qui n'est pas le cas pour un pilier isolé. L'exemple de la galerie de Venteuil n'a en effet permis de constater aucune rupture différée dans les tronçons qui n'ont pas été le siège de ruptures instantanées.

Enfin la capacité portante mesurée par l'essai à la plaque montre un début de plasticité pour 120 bars et en calotte la rupture est atteinte pour 135 bars^(Fig. 7-9). Le même phénomène se manifeste dans les courbes du Médératec, au-dessus de 100 bars en général, mais la rupture ne se produit pas^(Fig. 7-10). Il doit y avoir "écoulement plastique" autour du forage. Au vérin plat, au contraire, on obtient aisément la rupture.

Des phénomènes de rupture autour de la galerie sous la seule pression du terrain ont été observés pour la même valeur de la contrainte qu'au laboratoire. Cette affirmation résulte, en réalité, d'une hypothèse sur le champ de contrainte. Les mesures de contrainte (paragraphe 7-3) ont montré que ce champ pouvait être considéré comme hydrostatique. Nous avons vu que dans ces conditions la contrainte tangentielle verticale à la paroi d'un tunnel est le double de la contrainte hydrostatique.

Connaissant les contraintes en fonction de la couverture, le profil du terrain au-dessus de la galerie, et la résistance en compression monoaxiale, on s'attendait à des difficultés de soutènement vers le PM 750. En effet, en ce point la couverture atteint 125 m, ce qui avec un poids spécifique de 2 g/cm^3 (craie saturée et terrains sus-jacents) donnait une contrainte hydrostatique égale à 25 bars et une contrainte tangentielle à la paroi de $25 \times 2 = 50$ bars. Or c'est très exactement à l'endroit prévu que les difficultés sont apparues sous la forme d'un écaillage de la paroi. Ce phénomène est à rapprocher des observations faites dans le granite pendant le creusement du tunnel sous le Mont Blanc ou dans les quartzites des mines profondes d'Afrique du Sud. Mais le caractère moins fragile de la craie donne une forme moins violente au phénomène. Il n'y a pas détachement explosif des écailles, ni projection des morceaux, mais simplement formation de grandes plaques très minces (1 cm x 50 cm x 100 cm) se détachant facilement de la paroi.

Ces caractères font de la craie une roche privilégiée, la seule peut-être dont le comportement élastique fragile est le

même dans le massif et au laboratoire, grâce à l'absence totale de fissuration.

7.5. Modèle réduit du projet de cavité de Venteuil.

La craie étant beaucoup plus déformable que le béton, on a voulu faire des mesures de déformation sur une cavité en cours de creusement. En effet, l'usage veut qu'on bétonne la voûte avant d'approfondir, et il est des exemples de fissuration du béton (Australie).

C'est pourquoi Electricité de France entreprit l'excavation d'un modèle réduit reproduisant les phases de travail. Malheureusement la décision fut prise trop tard pour qu'on puisse envisager toutes les mesures souhaitables.

La figure 7-11 montre l'implantation de la cavité modèle par rapport à la galerie et la figure 7-12 indique les phases d'abattage numérotées de 1 à 9. La couverture est de 90 mètres.

Les mesures ont porté :

- sur les variations de largeur de la cavité à l'aide de 6 rubans installés dans la partie supérieure à partir de la phase 4, et de 2 rubans à mi-hauteur à partir de la phase 7 (fig. 7-13 et 7-14) ;

- sur les variations de contrainte au niveau de l'ancrage des rubans, à l'aide de vérins plats (fig. 7-13 et 7-14).

On a également observé de nombreux forages à l'endoscope mais sans déceler de fissures.

Les variations de largeur réagissent immédiatement aux phases successives des travaux d'excavation. Les variations thermiques journalières ne dépassent pas 50 μ . Les rapprochements des deux parois de la cavité sont indiqués en microns dans le tableau ci-dessous. On distingue les rapprochements totaux atteints à la fin de la phase 6 et à la fin de la phase 9.

Les couples de rubans 7 et 8 (à mi-hauteur) donnent un rapprochement total (fin phase 9) de 1200 μ . Il est normal que le rapprochement soit plus grand à mi-hauteur.

Ruban n°	Profondeur scellement	Fin phase 6	Fin phase 9
1	1 m	600	-
6	1 m	500	800
2	0,5 m	550	1100
5	0,5 m	500	900
3	0,25 m	600	950
4	0,25 m	650	-

L'ensemble des phases 4 à 6 a duré 13 jours et l'ensemble des phases 7 à 9 a duré 10 jours. Après les travaux, les mesures de largeur furent poursuivies pendant 4 mois et on ne put observer de fluage notable.

Mais les rubans scellés peu profonds indiquent un changement de signe traduisant un écartement des parois de 50 à 100 μ . Le ruban 6 au contraire, scellé plus profondément, continue à montrer un rapprochement de 100 μ .

Ceci correspond à une contraction de la peau (zone superficielle du massif) de l'ordre de 2.10^{-4} que l'on peut associer à l'extension verticale traduite par la baisse des contraintes mesurées à la paroi.

La valeur absolue totale du rapprochement des parois, de l'ordre de 1 mm, est à comparer au résultat du calcul élastique par éléments finis (pour les deux mêmes stades de creusement) qui donne 3 mm avec le module mesuré sur échantillon.

Le sens de cette variation indique une contraction volumétrique de la craie.

Les variations de contrainte, que seuls les vérins installés à mi-hauteur des parois ont permis de mesurer (fuite d'huile dans les vérins supérieurs), ont montré une diminution. Les contraintes tangentiellees verticales initialement de 25 et 30 bars à droite et à gauche de la cavité (au début de la phase 7) sont tombées respectivement à 15 et 22 bars à la fin de la phase 9.

Ces contraintes ont encore évolué après la fin des travaux pour atteindre au bout de 4 mois respectivement 10 et 20 bars.

7.6. La pratique du chantier.

Il est peu d'exemples de travaux souterrains importants dans la craie. On peut citer les galeries de reconnaissance du tunnel sous la Manche, excavées en 1881-1882 dans le Cénomanién.

Situées sous la mer, aussi bien du côté anglais que du côté français (Sangatte), elles ont été exécutées avec la machine du colonel Beaumont. L'outil d'attaque est composé de dents réparties sur un diamètre rotatif mu à l'air comprimé.

La galerie, cylindrique, fut abandonnée sans soutènement et dénoyée à Sangatte en 1959. 77 ans d'existence, pleine d'eau, l'ont laissée en parfait état.

Plus proches de nous, citons les travaux du réservoir souterrain de stockage du propane liquéfié à Rouen en 1965. Le réservoir se trouve entièrement dans la craie du Turonien (craie très régulière, sans silex). L'excavation fut exécutée à partir d'un puits de 150 m de profondeur foré à la boue en 55' puis tubé en 42' (soit 1,07 m) par la méthode des chambres et piliers. L'abattage se fit à l'explosif et le chargement avec un engin sur chenille. La cavité finale de 32 500 m³ constituée de galeries de 4 m de largeur et 6 m de hauteur est soutenue par des piliers carrés (16 m x 16 m) (taux de dépilage : 20 %).

La pratique du chantier de la galerie de reconnaissance de Venteuil a mis en évidence quelques problèmes.

L'exhaure, bien que portant sur un débit modeste, a été difficile d'abord à cause de la pente descendante qui a imposé plusieurs reprises successives, et surtout à cause de la craie entraînée sous forme de boue. Pour limiter les destructions et permettre le fonctionnement convenable des pompes, il a fallu ajouter de l'eau afin de diluer la boue. Ainsi le débit naturel de l'ordre de 0,5 l/s a-t-il été multiplié par 4.

La circulation sur le radier fut sans doute le problème le plus difficile à résoudre. La pente du tunnel, 0,035, s'opposait à l'emploi de matériel sur rails. Les matériels sur chenilles ou sur pneus s'enfonçaient profondément dans le radier, le transformant en boue jusqu'à interruption totale de la circulation. Après l'essai de divers palliatifs (traverses, ballast) il a fallu finalement recourir au bétonnage hebdomadaire d'un radier complet.

L'abattage de la craie a été effectué à l'explosif sur plus de la moitié de la longueur du tunnel. La perforation des trous de 42 mm de diamètre, impossible avec des taillants à carbure de tungstène sur tiges lisses, a été réalisée avec de simples mèches torsadées à queue forgée.

Le soutènement a été indispensable dans la zone remaniée superficielle, sur 140 m de longueur, puis dans la zone profonde où se manifestaient les ruptures par décompression. Ce sont d'ailleurs les mêmes zones où l'usage de l'explosif a été évité. On a employé des cadres d'acier profilé supportant un blindage partiel en tôles perforées.

L'étude des moyens de soutènement pour les ouvrages définitifs a conduit à faire des essais de boulonnage et de gunitage ; le collage des tiges métalliques a permis d'obtenir des résistances du même ordre que la résistance à la traction de la tige. Des efforts de 16 à 16 tonnes ont pu être exercés sans arrachement.

Des essais de gunitage ont montré dans une section à 200 m de l'entrée que le béton projeté en deux couches de 2 à 3 cm pouvait très bien, deux mois après la perforation, remplacer les cintres métalliques. Au PM 895, en pleine zone de décompression, le béton fut projeté à l'avancement en couche de 15 cm. L'essai fut satisfaisant malgré quelques décollements.

Revenons rapidement à la perforation. L'usinage aisé et l'abrasivité nulle de la craie doivent favoriser le travail des engins du type taupe. Il est évident que la présence abondante de silex, fréquente dans la craie, nuirait beaucoup au rendement de ces appareils, mais les trois exemples cités ci-dessus bénéficiaient justement de l'absence de silex.

Nous avons noté, au moins dans le Sénonien de Venteuil, la pénétration aisée des outils, en particulier des marteaux-piqueurs. Cette propriété de la craie est favorable à l'emploi de troussees coupantes avançant sous une poussée hydraulique. La mise en place du soutènement et du revêtement définitif pourrait alors se faire dans le massif avant l'abattage. Le transport à l'arrière se ferait sous la forme d'une bouillie de craie pompée.

C'est le procédé imaginé pour le tunnel sous la Manche.

Par la méthode classique du tir à l'explosif, ce tunnel avait été prévu avec un avancement de 540 m/mois mais, depuis ce projet, la fiabilité des taupes rend capable de faire mieux.

7.7. Retour à la théorie. Théorie du soutènement.

Avant de conclure sur le creusement et le soutènement dans le massif de craie, il est nécessaire de comprendre la véritable fonction du soutènement.

PECK [1969] et DUFFAUT [1970] ont particulièrement bien mis en évidence l'interaction massif-soutènement. La figure 7-15a indique la variation de rayon ΔR de la paroi d'un tunnel circulaire en fonction de la contrainte d'arc p' . A l'ouverture de l'excavation p' est égale à la contrainte hydrostatique p régnant dans le massif (hypothèse valable dans de nombreux massifs de craie). La

contrainte p' va décroître dans le temps, tandis que le contour de la cavité se resserre (augmentation de ΔR). Après la phase élastique AB, la phase BC concave représente la déformation plastique jusqu'au point C de l'équilibre plastique sans soutènement. Une dégradation du massif remplace BC par B'C' et même par AC" si cette dégradation débute dès l'ouverture de la cavité.

La figure 7-15b représente dans les mêmes axes la déformation de divers types de soutènement en fonction de la pression qu'ils exercent.

La superposition des deux figures 7-15a et 7-15b, en tenant compte du décalage de temps nécessaire à la pose des différents types de soutènement, montre que pour un même état du massif, la contrainte supportée est d'autant plus grande que le soutènement est plus rigide, et que la dégradation est d'autant plus importante que le temps de mise en place du soutènement est plus long.

La fonction du soutènement n'est donc pas de supporter le massif, mais d'empêcher la dégradation du massif (perte de cohésion, diminution de l'angle de frottement).

D'après DUFFAUT [1970], il faut donc intervenir le plus tôt possible et, corollaire de cette proposition, agir au contact du massif sur tout le périmètre.

Le projet du site de Venteuil, abandonné pour un site plus classique, nous montre, avec le recul du temps, combien le comportement de la craie, si surprenant, est en définitive plus favorable qu'il ne paraissait au moment des travaux.

En effet, le régime hydrostatique des contraintes, l'adaptation plastique du pourtour de la cavité avec diminution de volume, l'apparition non immédiate de la rupture (cette rupture dépend d'ailleurs du diamètre de la cavité. Elle ne se produit pas pour des diamètres inférieurs à 2 m) permettent d'envisager de nouvelles méthodes d'exécution en jouant sur le facteur temps et en aidant le volume à diminuer.

Le facteur temps consiste à empêcher la dégradation par soutènement immédiat de la galerie, mais soutènement souple autori-

sant l'adaptation et la participation du massif.

Pour une grande excavation de courte longueur, il doit être possible, selon DUFFAUT [1970], d'agrandir lentement la cavité, en laissant la diminution naturelle du volume du massif écouler l'excès de compression à la paroi (rupture fragile).

La diminution de volume au voisinage de la paroi peut être provoquée par saignées, de façon à adapter la longueur du contour de la cavité à la déformation. Une telle méthode a déjà été utilisée en Tasmanie et à l'île de la Réunion.

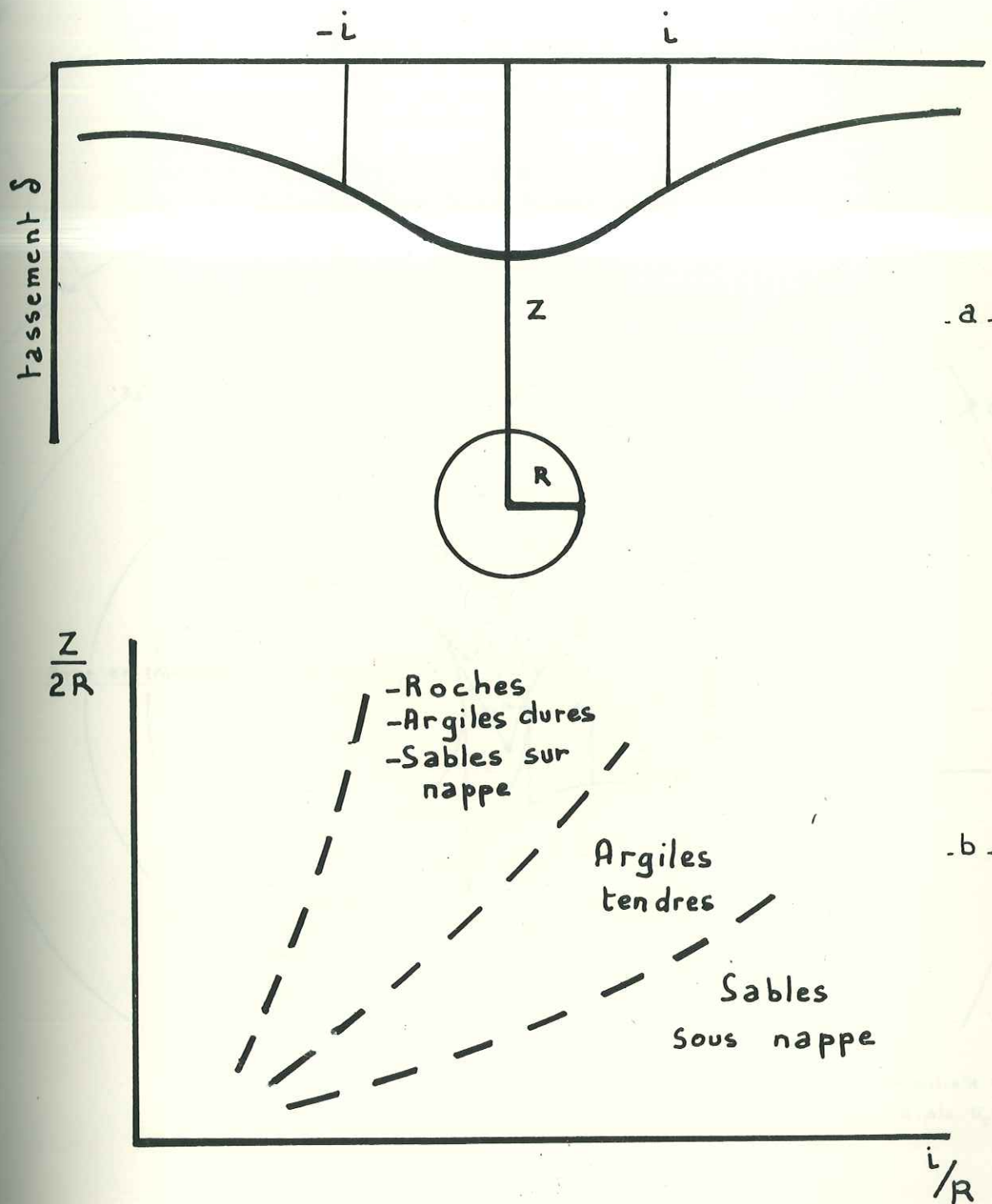


Fig. 7-1. a. La largeur de la fosse de tassement est défini par le paramètre i (point d'inflexion)

b. Relation entre la largeur de la fosse de tassement et la profondeur du tunnel. pour différents types de matériaux. (d'après R.B. PECK)

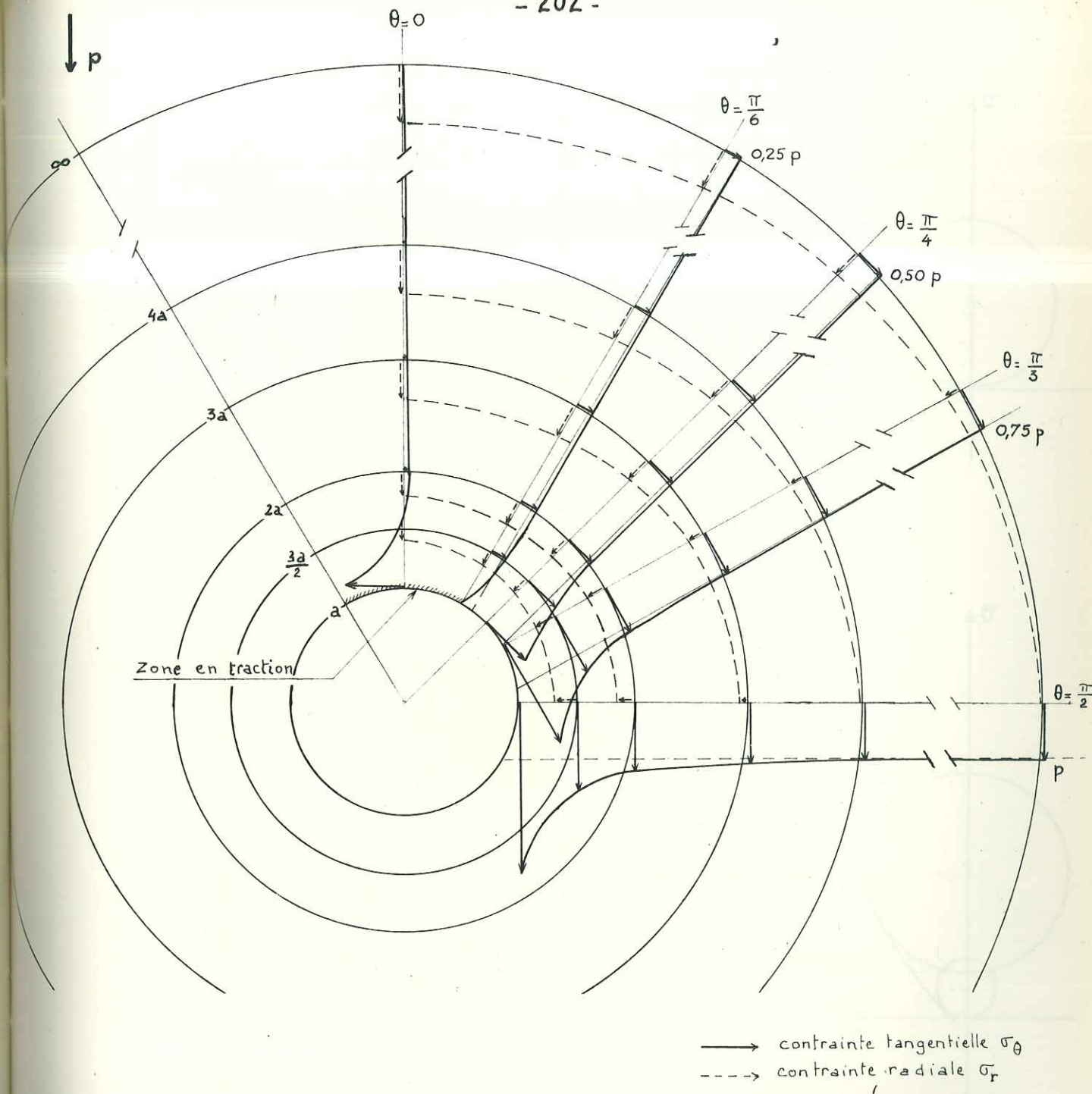


Fig. 7-2. Répartition des contraintes tangentielles σ_θ et radiales σ_r autour d'une cavité cylindrique de rayon a dans un massif infini, soumis à un champ de contraintes monoaxiales p .

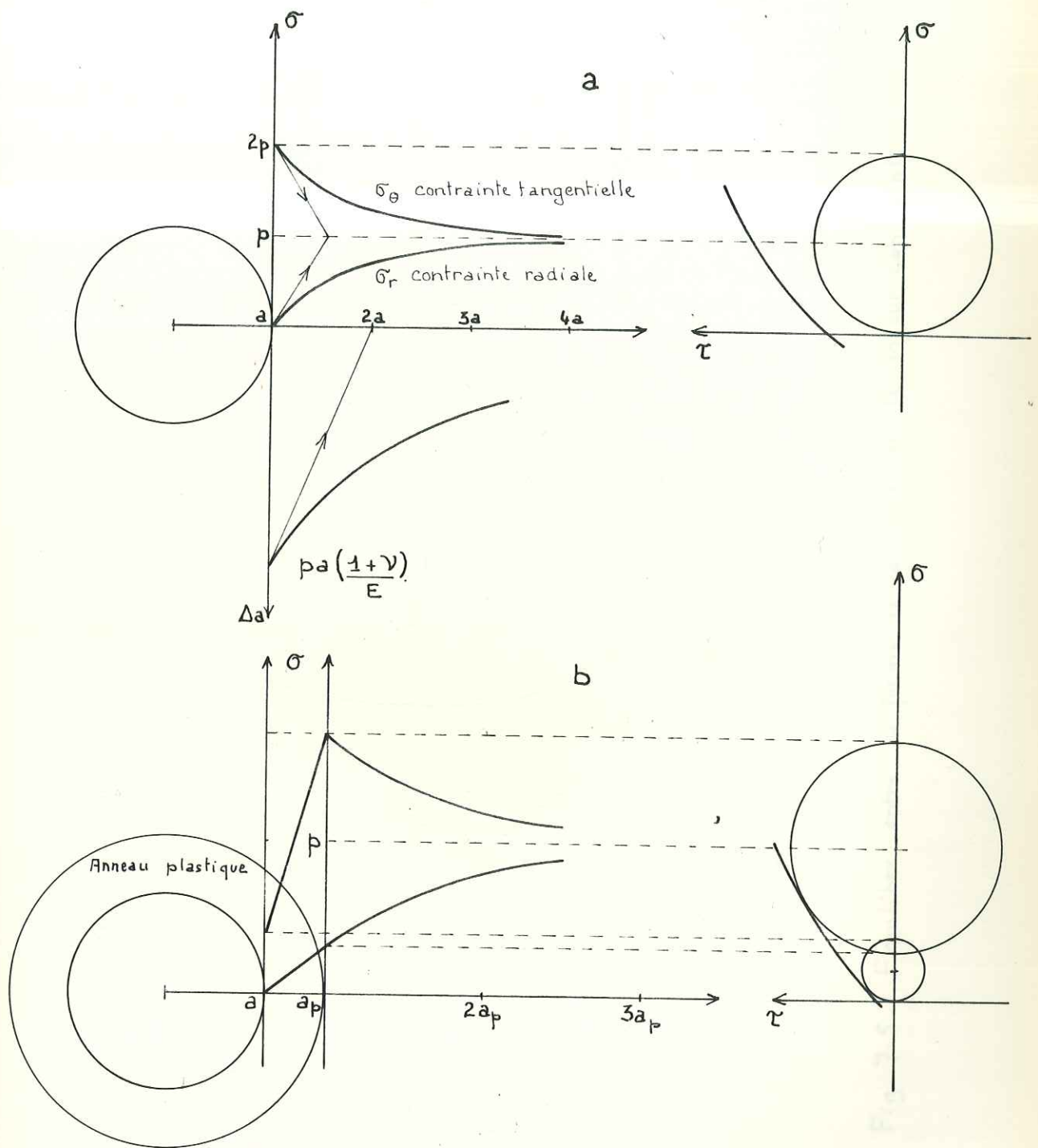
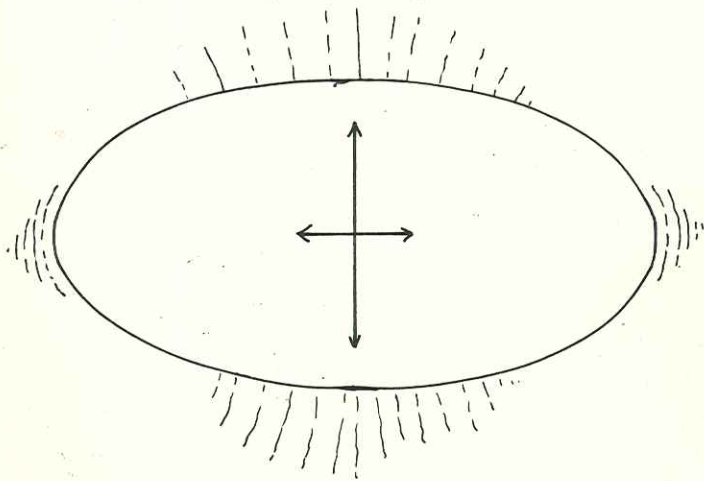


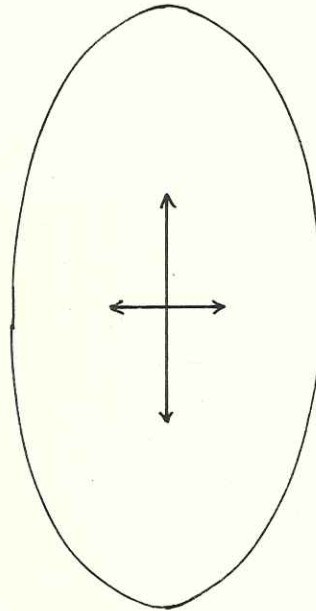
Fig. 7-4. Equilibre d'un tunnel circulaire dans un milieu isotrope soumis à une contrainte initiale hydrostatique.
a - équilibre élastique.
b - équilibre plastique.

Le tenseur contrainte est schématiquement représenté
par ses deux composantes principales.

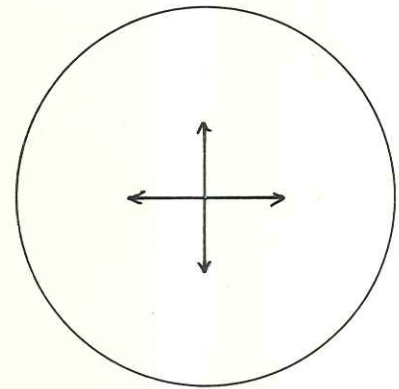
- Rupture par flexion -



Cavité elliptique non en équilibre
avec le tenseur contrainte.



ellipse en équilibre
avec un tenseur de
même élanement.



équilibre du cercle
et du tenseur hydrostatique.

Fig. 7-5. Equilibre entre la forme de la cavité et le tenseur contrainte.

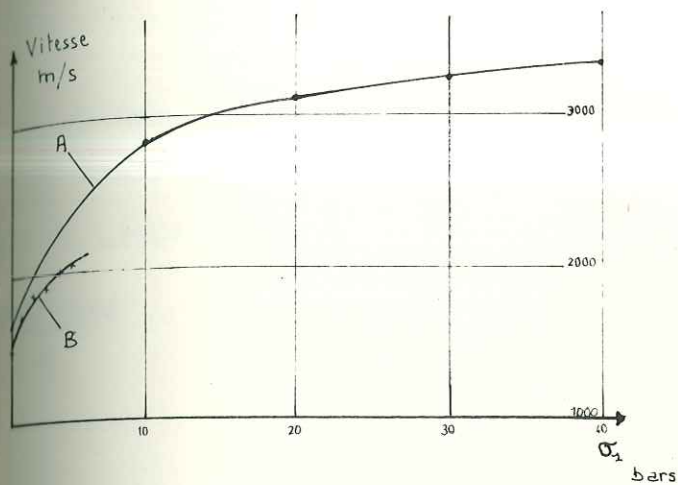


Fig. 7-6. Variation de la vitesse du son longitudinale en fonction de la contrainte monoaxiale σ_1 appliquée à l'échantillon.

A - Craie sèche.

B - Craie saturée.

(d'après J-P DAGNAUX et al.)

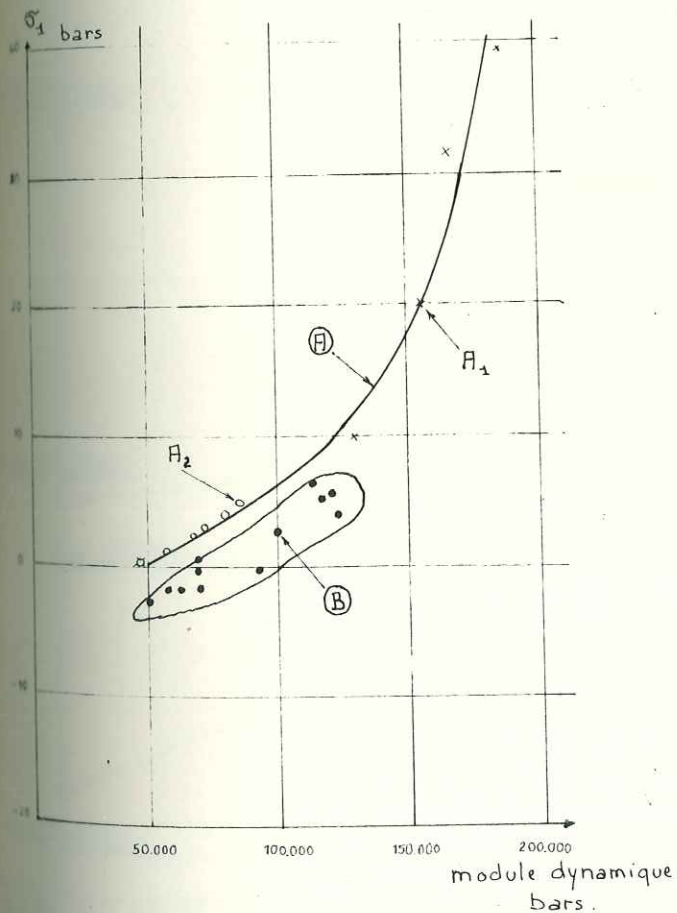


Fig. 7-7. Comparaison des modules dynamiques mesurés au laboratoire A (A₁ craie sèche - A₂ craie saturée) et in-situ B.

(d'après J-P DAGNAUX et al.)

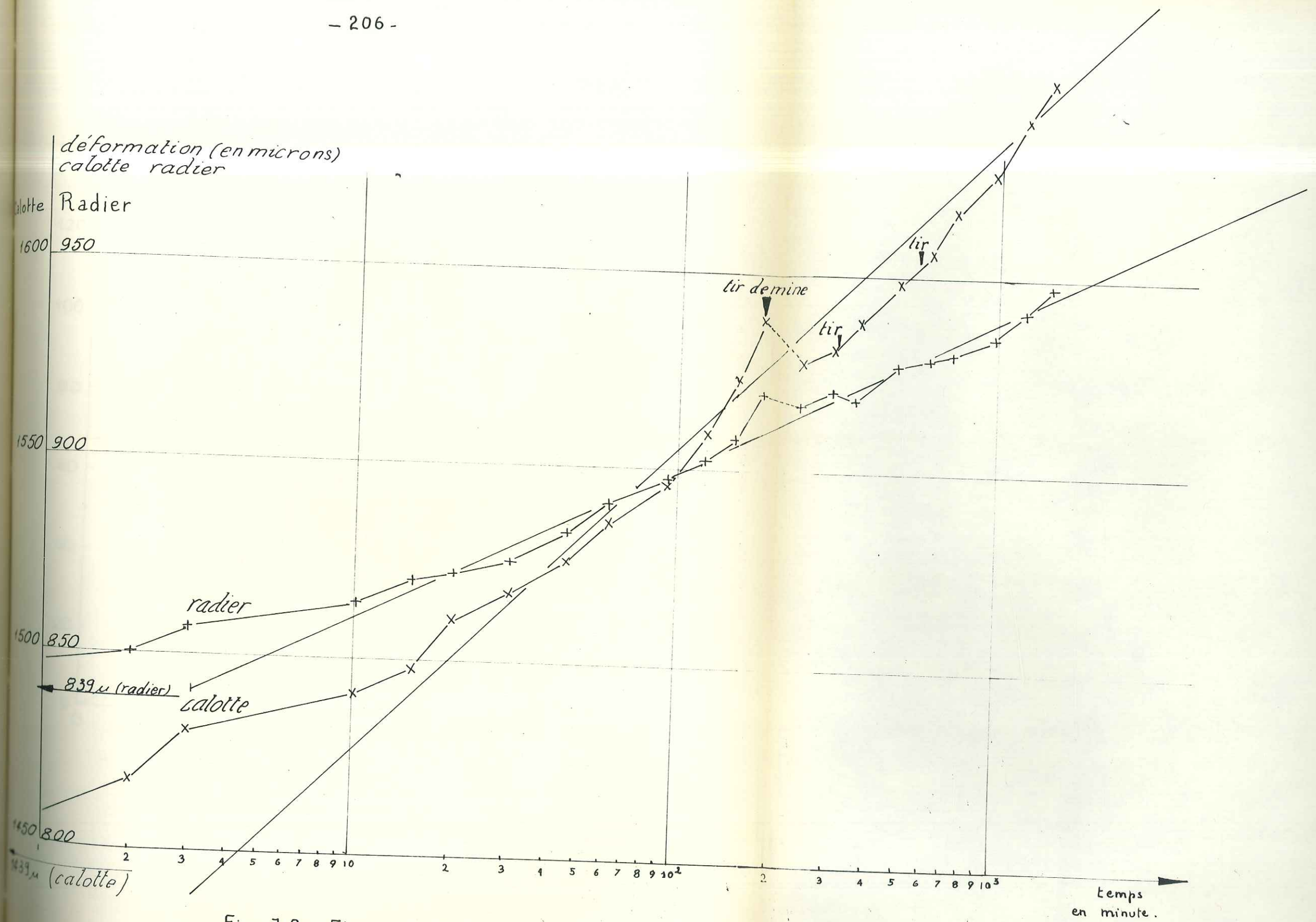


Fig. 7-8. Fluage de 24 heures provoqué par vérin à plaques. (station verticale)
Pression constante 80 bars.
Zone d'essai n° 1. PM 180.

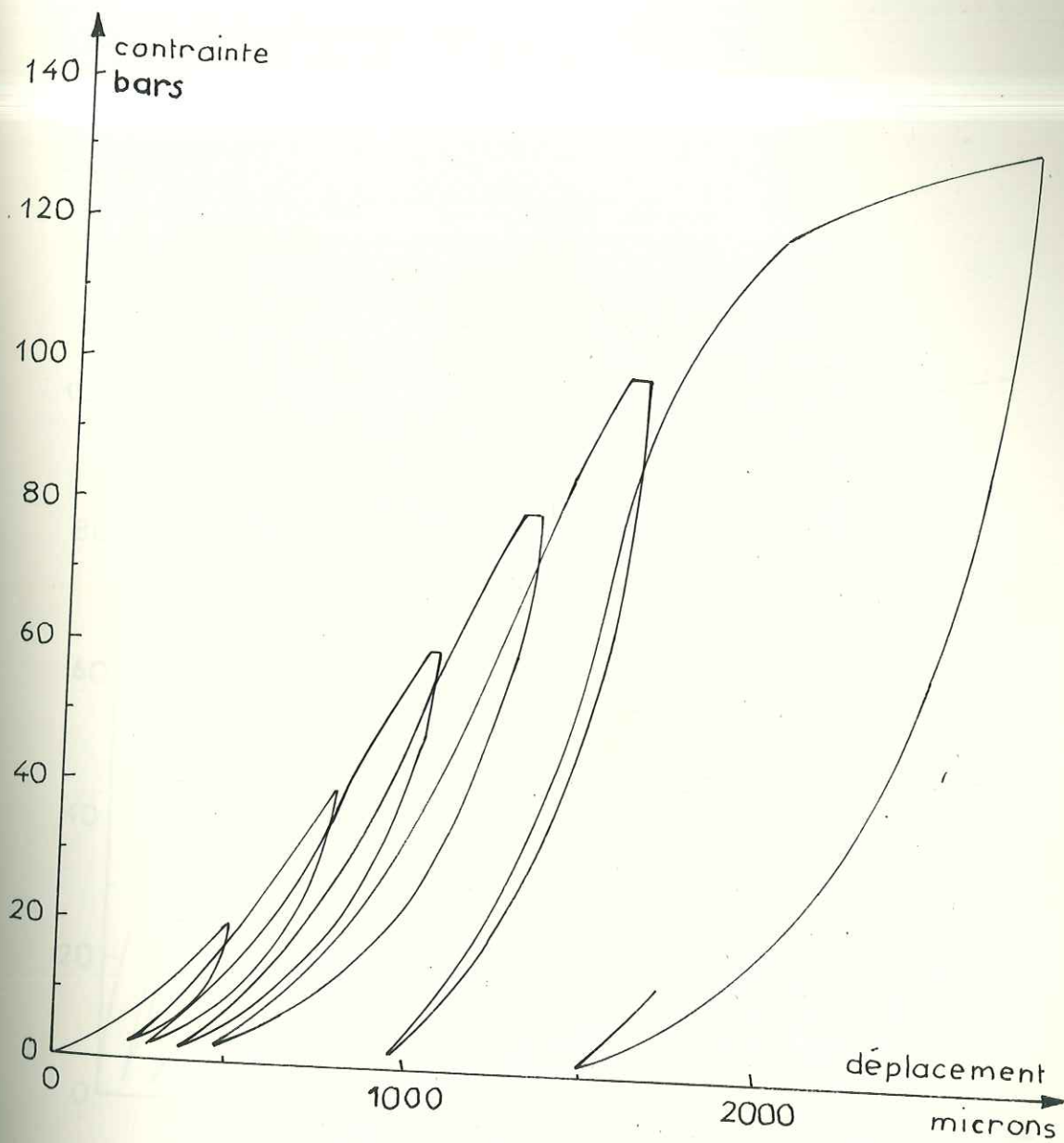


Fig. 7-9. Essai à la plaque poursuivi jusqu'au poinçonnement.
Contrainte moyenne en fonction de l'enfoncement moyen
de la plaque -

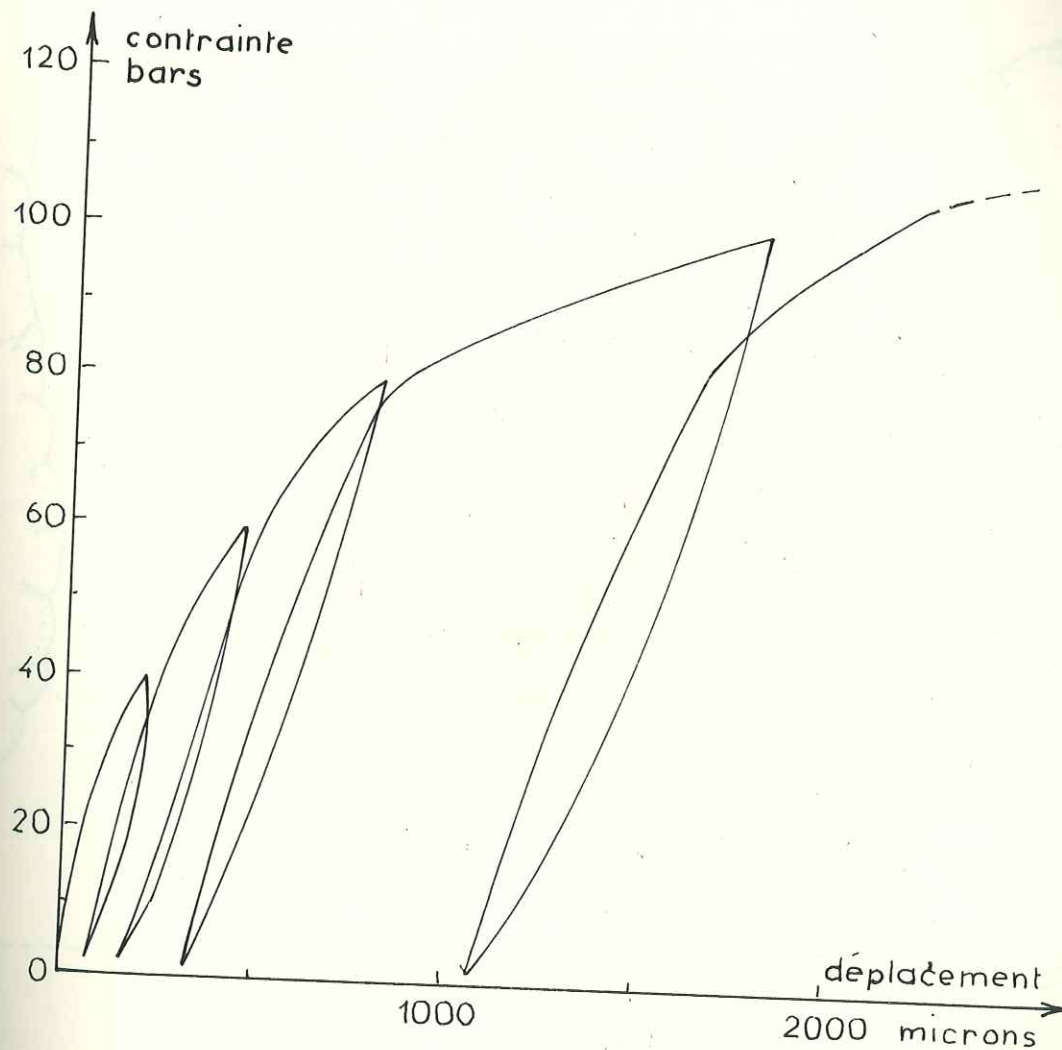


Fig. 7-10. Essai en sondage avec le vérin cylindrique MEDERATEC. Contrainte moyenne en fonction de l'allongement diamétral moyen. Le diamètre du MEDERATEC (165 mm.) est tel que les pentes de ce graphique traduisent les mêmes modules que celles de la figure 7-9.

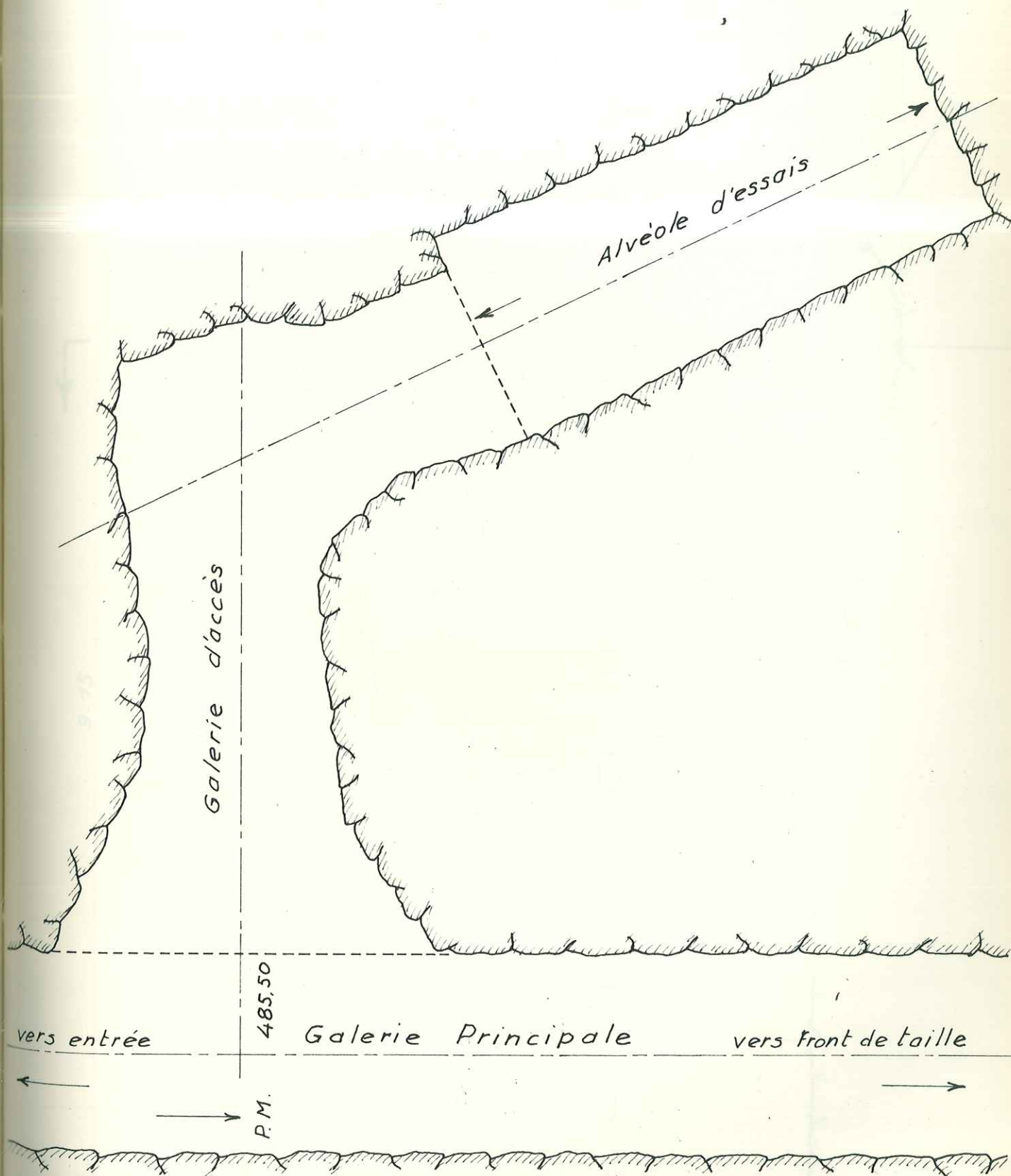


Fig. 7-11. Schema de l'implantation du modèle réduit du projet d'usine souterraine.

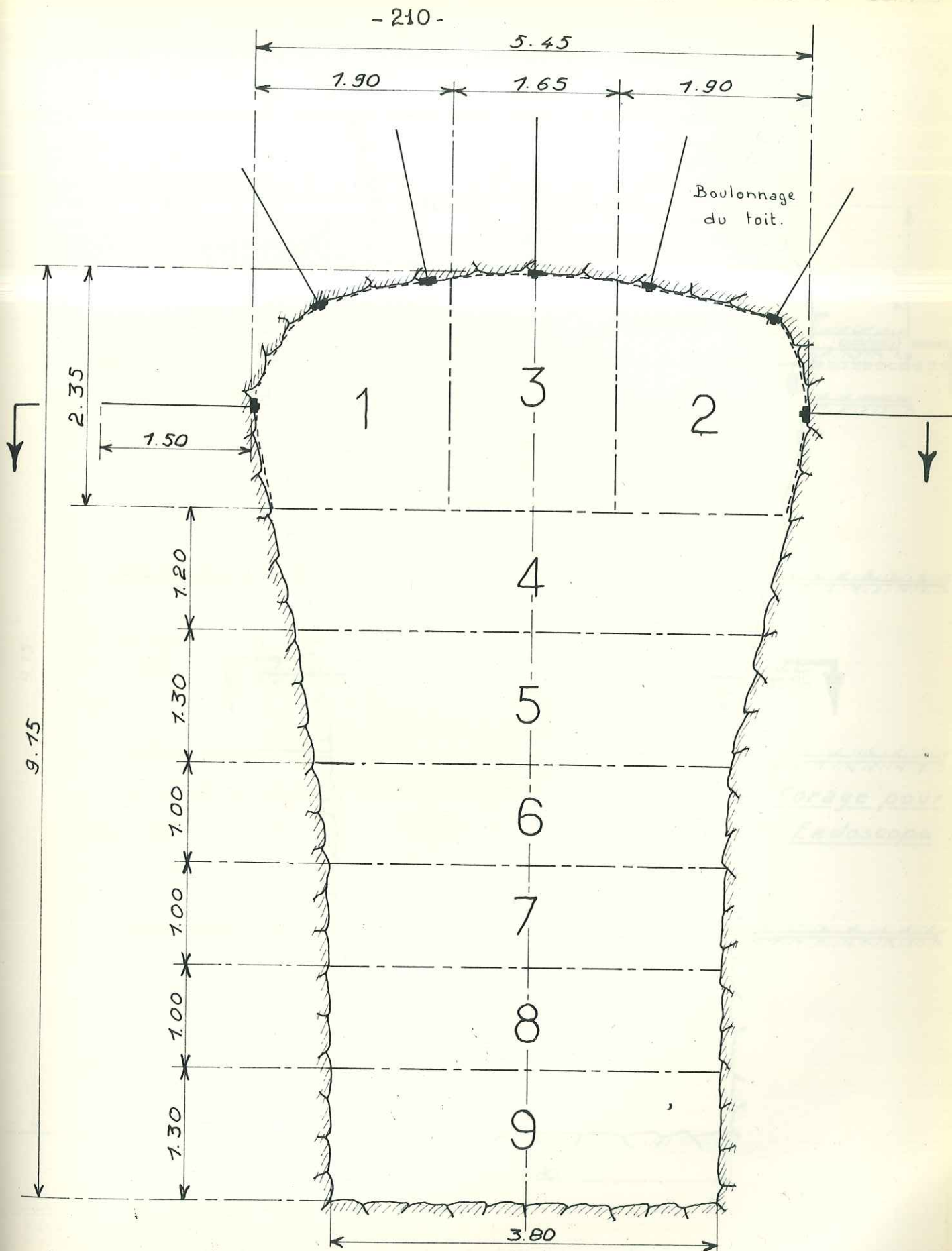


Fig. 7-12. Modèle réduit. Détail des phases d'exécution.

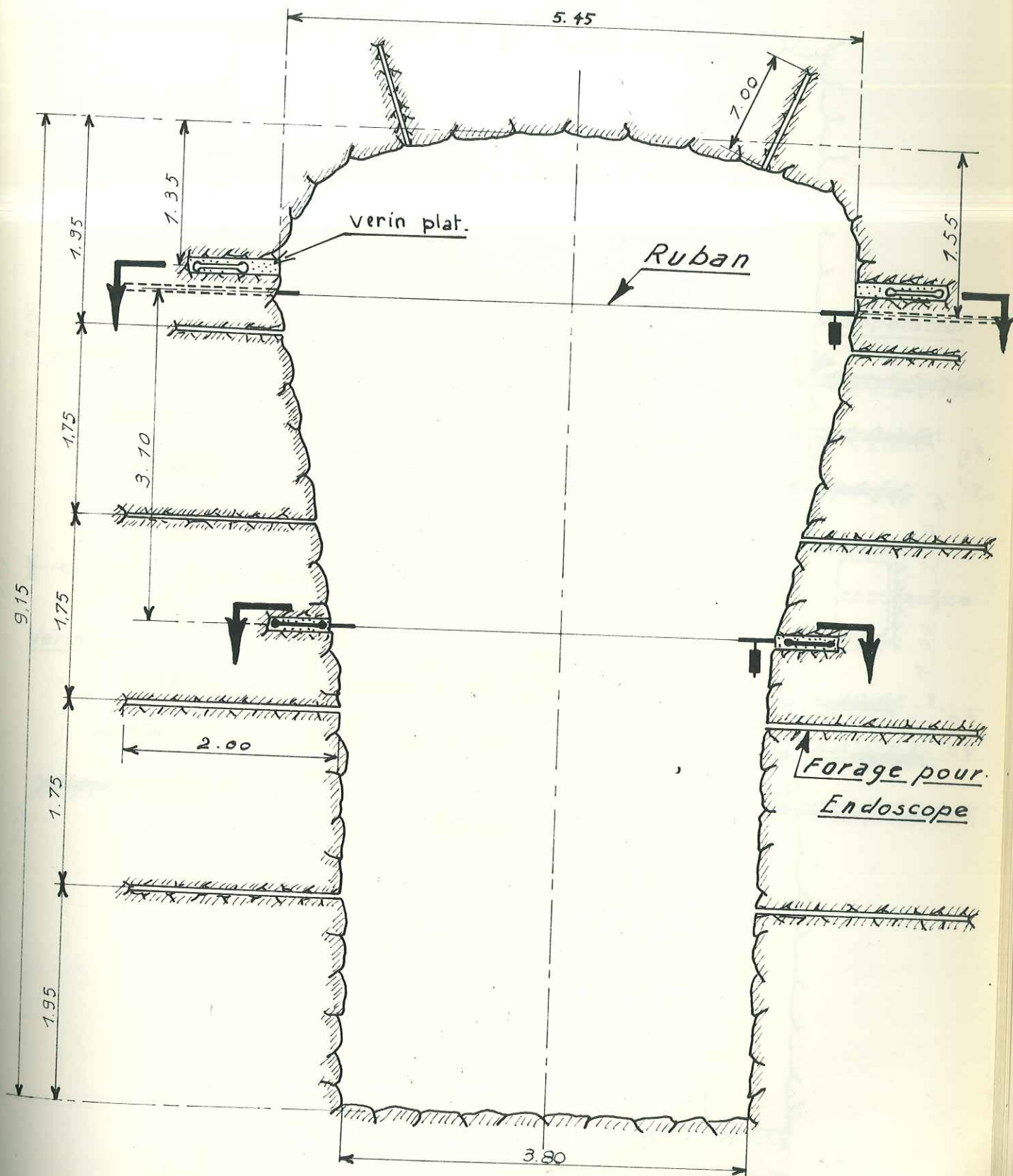


Fig. 7-13 - Vue en coupe des installations de mesure réalisées.

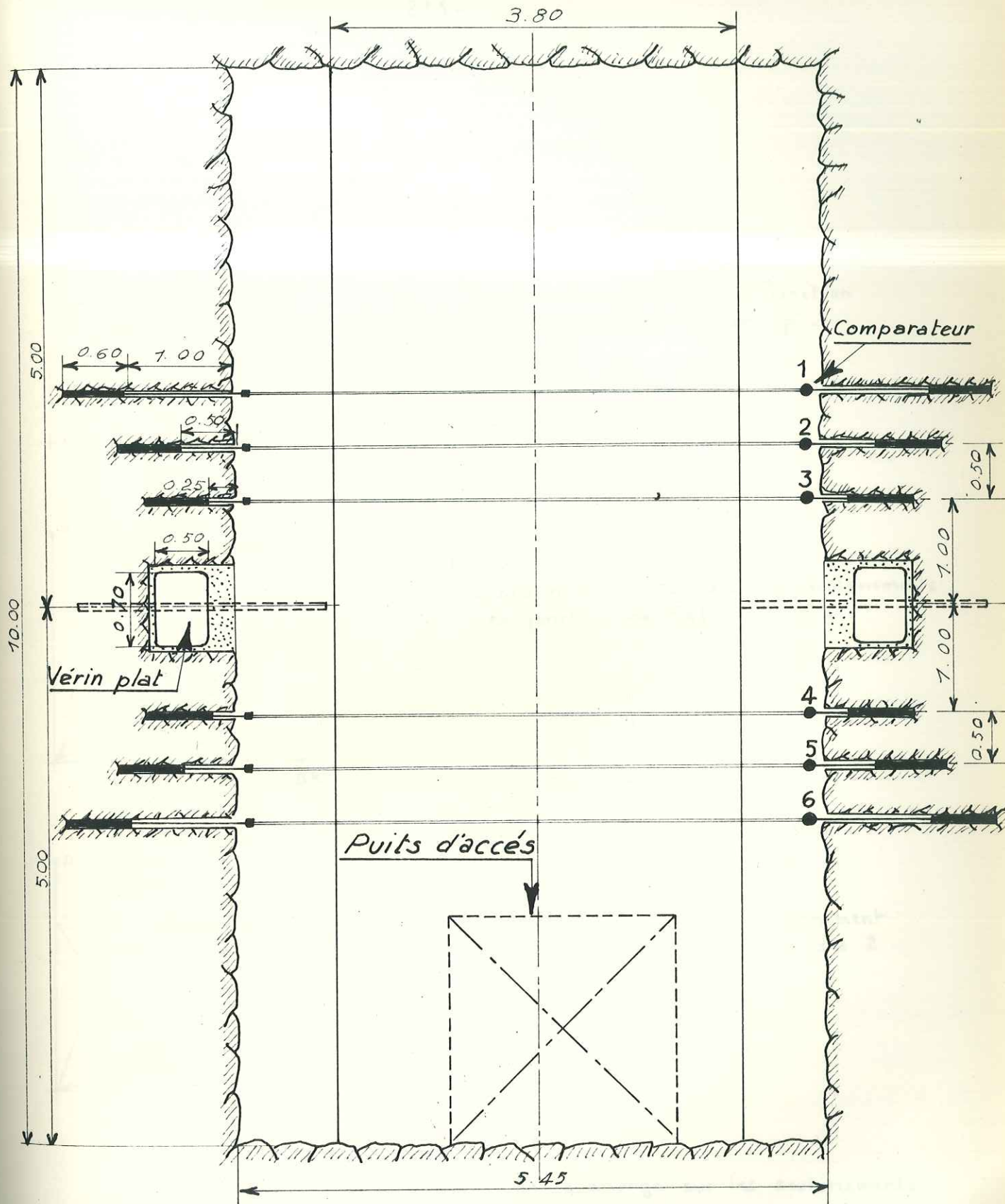
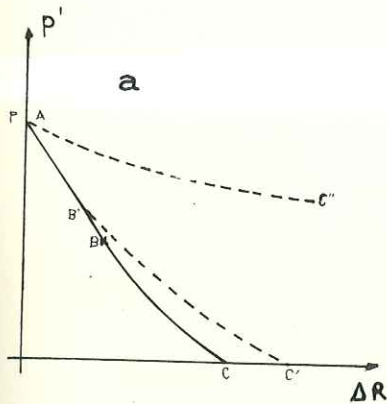
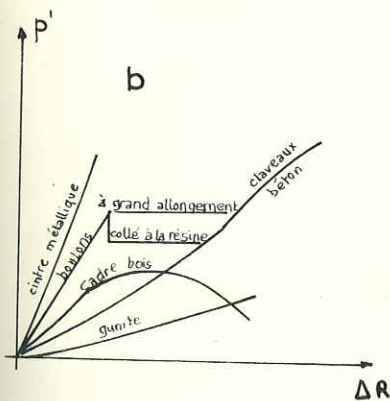


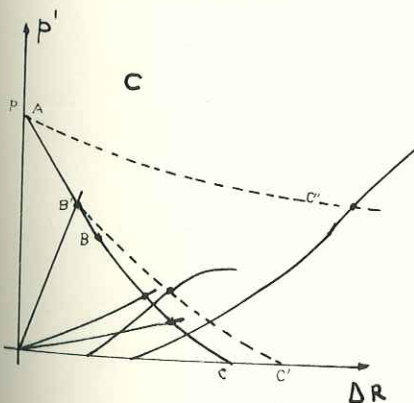
Fig. 7-14. Vue en plan, des installations de mesure à la retombée de route.



Déformation radiale en fonction de la contrainte d'arc P' .



Déformation radiale des soutènements en fonction de l'effort radial.



Interaction massif - soutènement obtenue par superposition des 2 graphiques a et b.

Fig. 7-15. Détermination de la charge sur les soutènements.

CHAPITRE 8

CONCLUSIONS GENERALES

Au terme de ce mémoire nous allons tenter de dégager les points les plus importants de notre étude.

L'utilisation du microscope électronique à balayage nous a permis de faire des observations d'une rare qualité sur la structure de la craie et son évolution lorsqu'elle subit des déformations. L'assemblage est constitué presque exclusivement de débris de coccolithes dont les dimensions font de la craie un matériau comparable à un silt fin.

Le volume des vides, voisin de 0,4, et l'homogénéité de la craie permettent de la considérer comme un modèle presque parfait de matériau poreux.

Les résultats que nous avons obtenus dans l'étude rhéologique concernent donc une roche très différente des modèles de milieux fissurés couramment étudiés.

Un comportement élastique fragile est obtenu en compression monoaxiale. On n'observe aucun serrage, caractéristique des milieux fissurés.

L'influence de l'eau est très sensible dès les faibles pourcentages de saturation. En compression monoaxiale la résistance et le module d'élasticité sont abaissés, tandis que le comportement devient visco-élastique. La rupture non fragile est précédée d'une phase de glissements irréversibles.

Nous avons mis en évidence une anisotropie continue de la résistance et du module, qui ne paraît pas pas liée à une orientation privilégiée des particules mais plus probablement à une forme géométrique anisotrope des vides.

Sous l'influence d'un champ de contraintes isotrope la craie sèche diminue de volume suivant deux phases successives.:

- une première phase élastique limitée par la rupture du squelette solide ;
- une deuxième phase qui consiste en une diminution très rapide du volume et un durcissement progressif lié à l'augmentation de la densité.

L'étude du comportement suivant un chemin déviatoire dans l'espace contrainte a permis d'obtenir la limite élastique complète qui, dans les axes de Mohr, se referme sur l'axe des contraintes normales. Il s'agit là, d'un résultat tout à fait original en mécanique des roches.

Au-delà de cette limite élastique la craie se durcit en augmentant de densité, c'est la phase d'écrouissage.

Cette phase se termine par un cisaillement généralisé du matériau obéissant à un critère de Coulomb. Ce cisaillement est le seuil d'un palier de déformation que nous proposons d'appeler palier de pseudo-plasticité. Car la déformation s'effectue suivant des plans privilégiés. La densité semble vouloir se stabiliser, au moins pour les fortes pressions de confinement.

Sous l'effet conjoint de l'eau interstitielle non drainée et d'une contrainte déviatoire la craie atteint rapidement une limite élastique du type droite de Coulomb. Cette limite est immédiatement suivie d'un palier de déformation infinie. Le comportement est alors purement plastique.

L'influence du temps sur le comportement en compression monoaxiale a été étudié par des essais de fluage. Après la phase transitoire le fluage de la craie est linéaire même pour des contraintes élevées. La vitesse de déformation augmente rapidement après un seuil situé à peu près à la moitié de la résistance en compression monoaxiale.

Deux types de rupture différée ont été obtenus :

- un premier type, brutal, qui suit immédiatement la phase transitoire, pour des contraintes élevées ;
- un deuxième type, moins net, qui ruine progressivement la roche pendant la phase de fluage linéaire, même pour des contraintes relativement basses, voisines de la moitié de la résistance en compression monoaxiale.

Ce résultat, très important, devrait susciter quelques réflexions lors du calcul de coefficient de sécurité dans les travaux souterrains.

La très grande sensibilité de la craie aux différents facteurs du comportement des roches aura permis de mesurer très nettement leur influence. Et nous pensons avoir atteint notre but si cette étude, bien incomplète, peut guider de futurs chercheurs, car de nombreux points n'ont pu être abordés, en particulier l'effet de l'anisotropie en contraintes triaxiales, le comportement en essai drainé et le fluage triaxial.

Une étude très fine et systématique de la déformation au microscope électronique à balayage reste à faire.

L'étude du comportement de la craie en souterrain a montré un accord exceptionnel avec les résultats de laboratoire grâce à la continuité et à l'homogénéité du massif.

Elle a permis conjointement avec l'étude rhéologique de mieux comprendre les rapports entre la théorie et la pratique des tunnels. Autour d'une cavité isolée, le matériau naturel est en quantité pratiquement infinie et si sa résistance n'est pas complètement annulée il doit toujours être capable de suffire seul à son soutènement.

BIBLIOGRAPHIE

- ACTION CONCERTEE DE MECANIQUE DES ROCHES, 1969.- Catalogue des caractéristiques géologiques et mécaniques de quelques roches françaises. Etabli par RIFFAULT, publié par D G R S T et L C P C.
- ANONYME, 1967.- Rock anchors in Chalk. Engineering, London, vol. 204, N. 5301, p. 826.
- BERRY (E.W.), 1919.- The Upper Cretaceous Mississippi Gulf. The Scientific Monthly, August.
- BIAREZ (J.), 1961.- Contribution à l'étude des propriétés mécaniques des sols et des matériaux pulvérulents. Thèse de Doctorat ès-Sciences, Univ. Grenoble.
- BIAREZ (J.), BELLIER (J.), 1968.- Fissuration des argiles, domaine fragile. C.R. Acad. Sc., Paris, Juin.
- BLACK (M.), 1953.- The constitution of the Chalk. Proc. geol. soc. London, N. 1499, IxxxI - Ixxxvi.
- BRUCKSHAW (J.M.) et al., 1961.- The work of the Channel Tunnel Study Group. Proc. Instn. Civ. Engrs. 18, pp. 149-178.
- BURLAND (J.B.), LORD (J.A.), 1969.- The load deformation behaviour of Middle-Chalk at Mundford, Norfolk : a comparison between full-scale performance and in-situ and laboratory measurements. Brit. Geotech. Soc. Conf. on In Situ Investig. in Soils and Rock, London, pp. 1-13.
- CHEATHAM (J.B.), 1967.- Strain hardening of a porous limestone. J. Soc. Petrol Engrs., v.7, N3, pp. 229-234.
- COLE (A.J.), HALISSY (T.), 1924.- Handbook of the Geology of Ireland. Thomas Murby, London.
- COMES (G.), DESSENNE (J.L.), 1967.- Essais de cisaillement sur des éprouvettes de Craie en état de contraintes triaxiales. Geotech., Conf. Oslo, vol. 2, pp. 248-249.
- DAGNAUX (J.P.), LAKSHMANAN (J.), GARNIER (J.C.), 1970.- Auscultation sismique de la craie soumise à des contraintes au laboratoire et in situ. Rapport 2e congrès internat. Mécanique des Roches, Belgrade 1970, vol. 2, Thème 4, N. 57.

- DAYRE (M.), 1963.- Etude expérimentale de quelques propriétés mécaniques des roches. Thèse 3e Cycle, Grenoble.
- DAYRE (M.), DESSENNE (J.L.), WACK (B.), 1970.- Variations locales et moyennes de la densité d'échantillons de Craie soumis à l'essai triaxial. 2e Cong. Internat. Mécanique des Roches, Belgrade, t. I, 2/15.
- DEBAILLE (G.), GHISTE (S.), 1965.- Mesure du cisaillement des craies par des essais de chantier et au laboratoire. 6e Cong. internat. Mécanique des Sols, t. I, pp. 203-207.
- DESENNE (J.L.), 1969.- Evolution du comportement mécanique de la craie sèche en essai triaxial. C.R. Acad. Sc., Paris, t. 268, Avril, pp. 839-842.
- DESENNE (J.L.), 1970.- Observation de la Craie au microscope électronique à balayage avant et après déformation à l'essai triaxial. 2e Cong. Internat. Mécanique des Roches, Belgrade, Interv. orale. Discussion. Thème II.
- DESENNE (J.L.), COMES (G.), DUFFAUT (P.), GERARD (P.), 1969.- La Craie au laboratoire et dans un tunnel profond. 7e Cong. Internat. Mécanique des Sols, Mexico, t. II, pp. 423-431.
- DESENNE (J.L.), DUFFAUT (P.), 1970.- Les propriétés rhéologiques de la Craie et leur influence sur le percement des galeries. La Houille Blanche, N 5, pp. 477-487.
- DESENNE (J.L.), WACK (B.), 1969.- Mesure du profil de densité d'échantillons rocheux soumis à l'essai triaxial. Pré-print. Coll. Geotech., Toulouse, mars.
- DUFFAUT (P.), 1967.- Compte rendu du 1er Congrès international de Mécanique des Roches. Lisbonne, 1966.- Rev. Industrie minière, vol. 49, N. 5.
- DUFFAUT (P.), 1969.- Quelques originalités du calcul des ouvrages souterrains. Symposium internat. sur les grandes excavations souterraines, Oslo, Sept., Intervention orale - Discussion Thème 2.
- DUFFAUT (P.), 1970.- Conception et calcul des grandes excavations souterraines à partir des résultats d'essais de laboratoire. Conférence C E R E S , Liège, 16 nov.
- FLEXER (A.), 1968.- Stratigraphy and facies development of Mount Scopus Group in Israel and adjacent countries. Israel J. of Earth-Science, v. 17, N 3, July.

- FLORENTIN (J.), L'HERITEAU (G.), FARHI (M.), PAREZ (L.), 1961.- Observations faites sur la Craie comme couche de fondations. 5e Cong. internat. Mécanique des Sols, t. 1, pp. 101-106.
- FOOKES (P.G.), DENNESS (B.), 1969.- Observational studies on fissure patterns in cretaceous sediment of South East England. Geotech., v. 19, N 4, pp. 453-477.
- GIGNOUX (M.), 1960.- Géologie stratigraphique, Masson, Paris, 5e éd.
- GROUPE D'ETUDES DU TUNNEL SOUS LA MANCHE, 1967.- Rapport.
- HABIB (P.), 1958.- Mesures de contraintes dans les piliers d'une carrière de Craie. Ann. I T B T P, N 125, pp. 633-636.
- HABIB (P.), BERNEDE (J.), 1965.- Résultats des mesures de contraintes effectuées dans divers souterrains en France, Ann. I T B T P, fév., pp. 825-834.
- HANCOCK (J.M.), KENNEDY (W.J.), 1967.- Photographs of hard and soft chalks taken with a scanning electron microscope. Proc. Geol. Soc. of London, n. 1643, pp. 249-252.
- HIGGINBOTTOM (I.E.), 1965.- The Engineering geology of Chalk. Proc. Symp. on Chalk in Earth works and Foundations. Inst. Civ. Engrs., London, pp. 1-13.
- HOUPERT (R.), 1966.- Variation de la résistance à la compression simple des roches grenues en fonction de la vitesse de mise en charge. C.R. Acad. Sc. Paris, t. 262, pp. 1423-1425.
- HUTCHINSON (J.N.), 1969.- A reconsideration of the coastal Landslides at Folkestone Warren, Kent. Geotechnique, v. 19, N. 1, pp. 6-38.
- INESON (J.), 1962.- A hydrogeological study of the permeability of the Chalk. J. Instn. Water Engrs., v. 16, n.6, pp. 449-463.
- K E E (R.), 1968.- Chalk in foundations and earthworks. D.I.C. Dissertation.
- LAFFITTE (R.), LECLAIRE (L.), 1967.- Sur la genèse au sein des boues calcaires ayant conduit à la formation de la Craie et des calcaires microgranulaires. C.R. Acad. Sc. Paris, t. 264, [D], pp. 1698-1701.
- LAFFITTE (R.), NOEL (D.), 1967.- Sur la formation des calcaires lithographiques. C.R. Acad. Sc. Paris, t. 264, [D], pp. 1379-1382.

- LAKE (L.M.), SIMONS (N.E.), 1969.- Investigations into the engineering properties of Chalk at Welford Theale, Berkshire. Brit. Geotech. Soc. Conf. on In situ Investigations in Soils and Rocks. London, pp. 21-27.
- LARGILLIER (J.F.), 1970.- Utilisation de la Géomorphologie dans l'étude d'un tracé d'autoroute. Cong. géol. Ingénieur, Paris 1970, t. 2, p. 1293.
- LEVEQUE (P.), 1960.- Remarques sur quelques anomalies géotechniques de la Craie. Soc. géol. Nord, Ann. t. 80, pp. 211-213.
- LEWIS (W.A.), CRONEY (D.), 1965.- The properties of Chalk in relation to road foundations and pavements. Proc. Symp. on Chalk in Earthworks and Found. Instn. Civ. Engrs., London, pp. 27-41.
- LOMBARD (A.), 1958. Géologie de la Belgique. Les Naturalistes belges.
- LOUIS (C.), 1968.- Etude des écoulements d'eau dans les roches fissurées et de leurs influences sur la stabilité des massifs rocheux. Bull. dir. Etudes et Recherches E.D.F., Série A, n° 3.
- LUNDBORG (), 1966.- Triaxial shear strength of some Swedish rocks and ores. 1er Cong. Internat. Mécanique des Roches, Lisbonne 1966., t. II, pp. 251-255.
- MEIGH (A.C.), EARLY (K.R.), 1957.- Some physical and engineering properties of Chalk. 4e Conf. internat. Mécanique des Sols, v. 1, pp. 68-73.
- MORLIER (P.), 1964.- Etude expérimentale de la déformation des roches. Thèse, Revue Inst. fr. Pétrole, Oct.-Nov., pp. 1115-1216.
- MORLIER (P.), 1969.- Comportement mécanique des solides poreux. Conf. au Groupe français de Rhéologie, Paris, février.
- MUIRWOOD (A.M.), CASTE (G.), 1969.- In situ testing for the Channel-Tunnel. Brit. geotech. Soc. Conf. on In situ investigations in Soils and Rocks. London, May, pp. 1-13.
- NALIVKIN (D.V.), 1960.- Geology of the U.S.S.R. Internat. Series of Monographs on Earth science, Vol. 8, Pergamon Press?
- N O E L (D.), 1967.- Etude des roches carbonatées par répliques de surface examinées au microscope électronique. C.R. Acad. Sc. Paris, t. 264, ~~pp. 544-547~~ [D], pp. 544-547.

- NORDMANN (V.), MADSEN (V.), 1928.- Aperçu de la Géologie du Danemark. C.A. Reitzels Forlag, Copenhagen.
- OBERT (L.), 1950.- Comparison of laboratory and field measurements of elastic properties of the Niobrara Chalk at Ft. Randall dam site. U.S. Bor. Mines, Rep. NE 1, 60 A.
- P E C K (R.B.), 1969.- Deep excavations and tunnelling in soft ground. 7e Cong. internat. Mécanique des Sols, Mexico. Vol. sur l'état actuel des connaissances, pp. 225-290.
- PELLEGRINO (A.), 1968.- Compressibilità e resistenza a rottura del tufo giallo napoletano. IX Convegno di Geotecnica, Genova, Tema 1-7.
- POLVECHE (J.), 1960.- Sur la stratigraphie, les propriétés physiques et chimiques des craies du Nord de la France. Soc. géol. Nord, Année 1960, t. 80, pp. 199-203.
- R O U X (J.C.), 1963.- Contribution à l'étude hydrogéologique du bassin de la Somme. Thèse Paris.
- SCHLUMBERGER (R.), 1965.- Observations sur la morphologie des falaises sénoniennes du secteur d'Etretat-Yport (Seine-Maritime). Rôle des karsts. C.R. ~~XXXX~~ Soc. Géol. Fr., p. 73.
- SIRIEYS (P.M.), 1966.- Contribution à l'étude des lois de comportement des structures rocheuses. Thèse de Doctorat ès-Sciences, Univ. Grenoble.
- Symposium sur la nappe d'eau de la Craie.- 1959.- Compte rendu.
- in Bulletin d'Information n° 3-4 de l'Association internationale des Hydrogéologues, Mars 1961.
- TERMIER (H. et G.), 1960.- Atlas de Paléogéographie. Masson, Paris.
- TERZAGHI (K.), 1950.- Mechanism of landslides in Application of Geology to Engineering practice, publ. by the Geol. Soc. of Amer.
- T O M S (A.H.), 1965.- Chalk in cuttings and embankments. Proc. symp. on Chalk in Earthworks and Foundations. Instn. Civ. Engrs., London, pp. 43-54.

- UNDERWOOD (U.), 1964.- Chalk foundations at four major dams in the Missouri river basin. 8e Cong. internat. Grands Barrages, vol. I, pp. 23-47.
- W A C K (B.), 1968.- Mesures par radioactivité en Mécanique des Sols. Thèse de Doctorat ès-Sciences, Univ. Grenoble.
- WAKELING (T.R.M.), 1965.- Foundations on Chalk. Proc. Sump. on Chalk in Earthworks and Foundation. Instn. Civ. Engrs., London, pp. 15-23.
- WAKELING (T.R.M.), 1969.- A comparison of the results of standard site investigations methods against the results of a detailed geotechnical investigation in the Middle Chalk at Mundford, Norfolk. Brit. Geotech. Soc. Conf. on In Situ Invest. in Soils and Rock, London, pp. 15-20.
- W A R D (W.H.), BURLAND (J.B.), 1968.- Assessment of the deformation properties of jointed rock in the mass. Internat. symp. Rock Mech., Madrid, pp. 35-43.
- W A R D (W.H.), BURLAND (J.B.), GALLOIS (R.W.), 1968.- Geotechnical assessment of a site at Mundford, Norfolk, for a large proton accelerator. Geotechnique, vol. 18, N.4, pp. 309-431.
- WILSON (G.), 1949.- Some laboratory tests on Chalk. 2e Conf. internat. Mécanique des Sols, vol. 3, pp. 183-187.
- WILSON (H.), 1949.- Chalk and Whiting in Industrial Rocks. Publ. by A.I.M.E., New-York.
- WISEMAN (G.), LEVY (J.), AISENSTEIN (B.), 1966.- Strength studies of Chalk specimens under moderate confining pressure. First Internat. Cong. Rock Mech. Lisbonne, t. 1, pp. 483-487.
- ZUMOFFEN (G.), 1926.- Géologie du Liban, Henry Barrère, Ed., Paris.

ANNEXE A

MESURE LOCALE DE LA DENSITE DES ECHANTILLONS APRES DEFORMATION

Description de la mesure par radioactivité

La mesure locale de la densité de ces échantillons de roche est obtenue par l'absorption d'un faisceau de rayons gamma (WACK, 1968). Le schéma de la mesure est représenté à la figure I. Le faisceau utile de rayons gamma, émis par une source de Césium 137, est délimité par des collimateurs en plomb de 6 cm d'épaisseur et possédant une ouverture de 4 mm de diamètre. L'atténuation de l'intensité du faisceau radioactif est donnée par une loi exponentielle de la forme :

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu \rho l}$$

où I_0 et I sont respectivement l'intensité du faisceau radioactif avant et après la traversée de l'échantillon, ρ est la masse volumique moyenne de l'échantillon sur la distance l parcourue par le rayonnement. Le coefficient μ exprimé en unité de section par unité de masse est une caractéristique de la composition chimique de l'échantillon et de l'énergie du rayonnement gamma.

Les taux de comptage mesurés par le détecteur de rayonnement étant proportionnels à l'intensité du rayonnement, nous obtenons la relation d'étalonnage suivante :

$$\text{densité} = \frac{1}{\mu \rho_w l} \cdot l_m \frac{N_0}{N}$$

N_0 et N étant respectivement le taux de comptage en l'absence d'échantillon et après la traversée de l'échantillon, ρ_w la masse volumique de l'eau.

Nous avons effectué les mesures le long de diamètres perpendiculaires à l'axe de l'échantillon et à différentes cotes. La valeur de l est obtenue en visant les deux bords de l'échantillon à l'aide d'une lunette se déplaçant sur un banc optique. Nous obtenons donc la valeur moyenne de la densité dans un cylindre allongé de 4 mm de diamètre et de longueur égale au diamètre de l'échantillon à la cote considérée.

La précision sur la mesure de la densité dépend du nombre total $N \cdot t$ de coups comptés, t étant le temps de comptage. Pour toutes nos mesures nous avons cumulé un nombre de coups égal à $3 \cdot 10^5$; la précision relative sur la densité est alors de $\pm 0,7 \%$.

BIBLIOTHEQUE
GRENOBLE-SCIENCES
UNIVERSITAIRE