

8/86¹⁵

Ministère de l'Enseignement Supérieur

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

THESE

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE
المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

SAICHI KHALED

Ingénieur E.N.P.

POUR OBTENIR LE DIPLOME DE
MAGISTER EN GENIE CIVIL

ETUDE EXPERIMENTALE DES RIGIDITES DU SOL
POUR LES FONDATIONS RECTANGULAIRES
ENTERREES SOUMISES A DES MOUVEMENTS
DE ROTATION

Soutenu en Octobre 1986

Devant le Jury d'Examen :

Président :	B. TILIOUINE	- Maître de Conférence
Rapporteur :	P. BONNEVILLE	- Professeur
Examineur :	A. CHAKER	- Maître de Conférence
	A. CHARIF	Maître de Conférence
Invitée :	Z. DJILLALI BERKANE	- Maître Assistante

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

«0»

Ministère de l'Enseignement Supérieur

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE



Présentée par :

SAICHI KHALED

Ingénieur E.N.P.

POUR OBTENIR LE DIPLOME DE

MAGISTER EN GENIE CIVIL

**ETUDE EXPERIMENTALE DES RIGIDITES DU SOL
POUR LES FONDATIONS RECTANGULAIRES
ENTERREES SOUMISES A DES MOUVEMENTS
DE ROTATION**

Soutenu en Octobre 1986

Devant le Jury d'Examen :

Président :	B. TILIOUINE	- Maître de Conférence
Rapporteur :	P. BONNEVILLE	- Professeur
Examineur :	A. CHAKER	- Maître de Conférence
	A. CHARIF	Maître de Conférence
Invitée :	Z. DJILLALI BERKANE	- Maître Assistante

REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer ma plus profonde gratitude à toutes les personnes ayant contribué, de près ou de loin à l'élaboration du présent travail.

Je remercie Monsieur B. TILIOUINE, maître de conférences d'avoir bien voulu accepter de présider le jury d'examen.

Je remercie vivement Monsieur P. BONNEVILLE Professeur à l'E.N.P.A. pour ses précieux conseils.

Je remercie également MM.

- A. CHAKER Maître de conférences.
- A. CHARIF Maître de conférences.
- Z. DJILALI Berkane Maître assistant.

Pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail en me faisant l'honneur de participer au jury.

K. SAICHI.

TABLE DES MATIERES

	Pages
- Résumé :.....	I
- Principales notations :.....	2
- Liste des figures et tableaux :	4
- Introduction :.....	9

CHAPITRE I

ETUDES ANTERIEURES

1 - Introduction :.....	II
2 - Recherches antérieures :.....	II

CHAPITRE II

DESCRIPTION DU MODELE ET DU DISPOSITIF D'ESSAI

1 - Introduction :.....	19
2 - Modélisation :.....	19
2-1 - Modèle de sol :.....	19
2-2 - Modèle de fondation :.....	19
3 - Montage du système :.....	23
3-1 - Le sol :.....	23
3-2 - La fondation :.....	23
3-3 - L'appareillage :.....	24
4 - Mise au point du modèle :.....	24
4-1 - Généralités :.....	24
4-2 - Choix des dimensions :.....	24

4-2-1 - Modèle de sol :.....	24
4-2-2 - Modèle de fondation :.....	24 bis
4-3 - Choix des matériaux :.....	24 bis
4-3-1 - Modèle de sol :.....	24 bis
4-3-2 - Modèle de fondation :.....	25
4-4 - Procédés de fabrication :.....	25
4-5 - Remarques :.....	26
5 - Essais sur le caoutchouc :.....	26
5-1 - Essais de traction :.....	26
5-2 - Essais de compression :.....	30
5-3 - Essai de dureté :.....	33
5-4 - Essai de chargement et de déchargement :.....	35

CHAPITRE III

EXPERIMENTATION

I - Objet de l'expérimentation :.....	40
2 - Nature des essais et mesures :.....	40
3 - Notations et principe de mesures pour les deux types d'essais :.....	41
3-1 - Notations :.....	41
3-2 - Principe de mesures des grandeurs :.....	41
4 - Essai de basculement :.....	42
4-1 - Description du montage et principe de l'essai :.....	42
4-2 - Méthode de calcul :.....	42
5 - Essai de torsion :.....	46
5-1 - Description du dispositif et principe de l'essai :.....	46

5-2 - Méthodes de calcul :.....	50
6 - Remarques :.....	5I

CHAPITRE IV



ANALYSE DES RESULTATS ET
CALCUL DES RIGIDITES

1 - Introduction :.....	57
2 - Présentation des résultats :.....	57
3 - Analyse des résultats :.....	58
3-1 - Centre de basculement :.....	58
3-2 - Moments-Rotations :.....	59
4 - Calcul des rigidités :.....	65
5 - Comparaison des résultats :.....	81
5-1 - Rigidités superficielles :.....	81
5-2 - Rigidités en profondeur :.....	91
6 - Validité des résultats :.....	93
6-1 - Le modèle :.....	93
6-2 - L'expérience :.....	95
6-3 - Les résultats :.....	96
7 - Extension au régime dynamique - fonctions d'impédance :...	97
7-1 - Introduction :.....	97
7-2 - Formulation du problème :.....	98
7-3 - Lois de variation des fonctions d'impédance pour les fondations circulaires enterrées :.....	98
7-4 - Fonctions d'impédance pour les fondations rectangulaires:	99
7-4-1 - Fondations superficielles :.....	99
7-4-2 - Fondations profondes :.....	100

- Conclusion :.....	101
- Annexe " I " :.....	103
- Annexe " II " :.....	119
- Annexe " III " :.....	132
- Bibliographie :.....	143

المدرسة الوطنية المتعددة الفنون
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

خلاصة: انطلاقاً من التشكيل بين التربة والأساس، أتمت دراسة تجريبية على نماذج مختصرة للحصول على قواعد التفسير للجسوات الترابية من تجارب متاتيكية للأساسات المستطيلة والمردومة الخاضعة للحركات الدورانية، ولقد بينت التجارب أن الجسوات للتربة تتزايد بسرعة مع عمق الأساس، هذا التفسير متأثر بشكل المقطع، وعلاقات التفسير التي أثبتت هي خطية إلى انحدار 0,5 ومطبقة على المساحات المبنية في مناطق زلزالية، في تربة عميقة، التي تتراوح نسب أبعاد للمصاحبة الأساسية بين 1/3 إلى 3.

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

SUMMARY

From a soil foundation model, an experimental study has been carried out on a small-scale reproduction to determine, from static test, the variation laws of soil rigidities for buried rectangular foundations subjected to rotational movements (rocking and torsion).

It has been shown that soil rigidities rapidly increase with the foundation depth. This variation is slightly influenced by the form of the cross-section.

The established variations laws are practically linear up to a driving in 0.5 and applicable to structures built in seismic zones on deep soils, with the base surface dimensions ratio ranges from 1/3 to 3.

RESUME

A partir d'une modélisation sol-fondation, une étude expérimentale a été faite sur modèle réduit pour déterminer par des essais statiques les lois de variation des rigidités du sol pour les fondations rectangulaires enterrées soumises à des mouvements de rotation (basculement et torsion).

L'expérience a montré que les rigidités du sol augmentent rapidement avec la profondeur de la fondation, cette variation étant influencée à moindre titre par la forme de la section.

Les lois de variation établies sont pratiquement linéaires jusqu'à un enfoncement de 0,5 et applicables aux ouvrages construits en zone sismique sur sol profonds dont les rapports des dimensions de la surface de base se situent dans la gamme 1/3 à 3.

- 2 -

PRINCIPALES NOTATIONS

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة — BIBLIOTHÈQUE
Ecole Nationale Polytechnique

- p : profondeur de la fondation en mm
- r_0 : rayon de la fondation circulaire en mm
- G : module de cisaillement du sol en kg/cm^2
- ν : coefficient de Poisson du sol
- r_θ : rayon équivalent de la fondation rectangulaire pour le mouvement de basculement
- r_ψ : rayon équivalent de la fondation rectangulaire pour le mouvement de torsion
- M_θ : moment de basculement
- M_ψ : moment de torsion
- θ : déformation angulaire en basculement
- ψ : déformation angulaire en torsion
- β_x, β_ψ : constantes selon Richart et Woods
- χ_θ : coefficient d'enfoncement pour le mouvement de basculement
- χ_ψ : coefficient d'enfoncement pour le mouvement de torsion
- k_θ : rigidité en profondeur pour le mouvement de basculement
- k_ψ : rigidité en profondeur pour le mouvement de torsion
- k_{θ_0} : rigidité superficielle pour le mouvement de basculement
- k_{ψ_0} : rigidité superficielle pour le mouvement de torsion
- k'_{θ_0} : rigidité superficielle pour le mouvement de basculement (selon la théorie du demi espace élastique)
- k'_{ψ_0} : rigidité superficielle pour le mouvement de torsion (selon la théorie du demi espace élastique)
- ω : pulsation
- V_s : vitesse de l'onde sismique de cisaillement
- F : force statique

- Δl : allongement
- ϵ : déformation relative
- l_0 : longueur initiale de l'éprouvette de traction
- Δ_1, Δ_2 : déplacements horizontaux
- C : position du centre de rigidité horizontale
- l : distance du centre de rigidité horizontale au point d'application de la force de basculement
- l' : distance du centre de gravité de la fondation au point d'application de la force de torsion
- O : centre de la base de la fondation
- O' : centre de basculement
- a : distance entre deux comparateurs
- a_0 : constante adimensionnelle
- S : surface de base de la fondation
- δ : déplacement horizontal du centre de rigidité horizontale
- α_θ : pente des droites $M = f(\theta)$ pour le mouvement de basculement
- α_ψ : pente des droites $M = f(\psi)$ pour le mouvement de torsion
- α'_θ : pente des droites d'approximation pour le mouvement de basculement
- α'_ψ : pente des droites d'approximation pour le mouvement de torsion
- A, B : constantes de calcul
- f_1, f_2 : fonctions de déplacement
- Cz : coefficient de compression élastique du sol
- $2d$: dimension de la fondation parallèle au mouvement de basculement
- $2c$: dimension de la fondation perpendiculaire au mouvement de basculement

LISTE DES TABLEAUX ET FIGURES

SCHEMAS :

	Pages
II-1 - plaques de caoutchouc :.....	20
II-2 - modèles sol et fondation :.....	21
II-3 - modèle de fondation :.....	22
II-4 - essai de compression sur modèle (photo) :.....	39
II-5 - essai de dureté (photo) :.....	39
III-1 - dispositif pour les essais de basculement :.....	43
III-2 - " " " " (schéma) :.....	44
III-3 - schémas statique et de calcul :.....	45
III-4 - dispositif pour les essais de torsion (photo) :.....	47
III-5 - " " " " (schéma) :.....	48
III-6 - schémas statique et de calcul (torsion) :.....	49

GRAPHES :

II-1 - courbe caractéristique en traction du caoutchouc (expérimentale) :.....	29
II-2 - courbe caractéristique en traction du caoutchouc (selon Buzdugan) :.....	30
II-3 - courbes caractéristiques de compression des modèles de sol :.....	32
II-4 - courbes de chargement et de déchargement en torsion pour le modèle carré (60 x 60) :.....	38
III-1 - variation des centres de rigidité horizontale et de basculement en fonction de la profondeur pour le modèle 60 x 60 :.....	53

III-2 - variation des centres de rigidité horizontale et de basculement en fonction de la profondeur pour le modèle 60 x I20 :.....	54
III-3 - variation des centres de rigidité horizontale et de basculement en fonction de la profondeur pour le modèle 40 x I20 :.....	55
IV-I a - moment de basculement en fonction de l'angle pour le modèle 60 x 60 :.....	60
IV-I b - moment de basculement en fonction de l'angle pour le modèle 40 x I20 :.....	61
IV-I c - moment de basculement en fonction de l'angle pour le modèle 60 x I20 :.....	62
IV-2 a - moment de torsion en fonction de l'angle pour le modèle 60 x 60 :.....	63
IV-2 b - moment de torsion en fonction de l'angle pour le modèle 60 x I20 :.....	64
IV-2 c - moment de torsion en fonction de l'angle pour le modèle 40 x I20 :.....	64
IV-3 a - rigidités rapportées à la rigidité en surface en fonction du coefficient d'enfoncement au basculement pour le modèle 60 x 60 :.....	71
IV-3 b - rigidités rapportées aux rigidités en surface en fonction des coefficients d'enfoncement en basculement pour les modèles 40 x I20 et 60 x I20 :.....	72
IV-4 - rigidités rapportées aux rigidités en surface en torsion pour les modèles 60 x 60 , 60 x I20 et 40 x I20 :.....	73
IV-5 a - droite d'approximation en basculement pour le modèle 60 x 60 :.....	75
IV-5 b - droites d'approximation en basculement pour les modèles 40 x I20 et 60 x I20 :.....	76

IV-6 - droites d'approximation en torsion pour les modèles 60 x 60 , 40 x I20 et 60 x I20 :.....	77
IV-7 - variation des coefficients directeurs des droites d'approximation en fonction du rapport d/c en basculement:.....	78
IV-8 - variation des coefficients directeurs des droites d'approximation en fonction du rapport d/c en torsion:.....	79
IV-9 - rigidités superficielles rapportées à cd^2 (formule théorique selon Corbunov-Possadov) :.....	84
IV-10 - rigidités superficielles rapportées à cd^2 en basculement (formule théorique selon L. Tzénov):.....	87
IV-11 - rigidités superficielles rapportées à cd en torsion (formule théorique selon Barkan) :.....	90
IV-12 - comparaison des rigidités rapportées aux rigidités en surface en fonction de l'enfoncement en basculement :.....	92
A _{I-12} - moment de basculement en fonction de l'angle pour les profondeurs p = 0 à 60 mm (modèle 60 x 60) :.....	116
A _{I-13} - moment de basculement en fonction de l'angle pour les profondeurs p = 0 à 60 mm (modèle 60 x I20) :.....	117
A _{I-14} - moment de basculement en fonction de l'angle pour les profondeurs p = 0 à 60 mm (modèle 40 x I20) :.....	118
A _{II-10} - moment de torsion en fonction de l'angle pour les profondeurs p = 0 à 60 mm (modèle 60 x 60) :.....	130
A _{II-11} - moment de torsion en fonction de l'angle pour les profondeurs p = 0 à 60 mm (modèles 40 x I20 et 60 x I20):..	131
A _{III-1} - coefficients β_x et β_y en fonction de d/c :.....	137
A _{III-2} - fonctions de déplacement selon Deleuze :.....	138
A _{III-3} - valeurs de k_2 et c_2 selon Veletsos :.....	138
A _{III-4} - valeurs de f_{1b} et f_{2b} selon Luco et Westmann :.....	139

A III-5	- valeurs de f_{1t} et f_{2t} selon luco et Westmann :.....	139
A III-6	- valeurs de λ_{θ} et ξ_{θ} selon Veltsos et Jethro :.....	140

T A B L E A U X :

II-1	- résultats de mesures et calcul pour les plaques d'épais- seur 20 mm :.....	27
II-2	- résultats de mesures et calculs pour les plaques d'épais- seur 5 mm :.....	28
II-3	- déformations relatives en fonction de la contrainte de compression des différents modèles de sol :.....	31
II-4	- valeurs des modules d'élasticité et diamètres de l'emprein- te de la bille :.....	35
II-5	- résultats de chargement et de déchargement en torsion:....	37
III-1	- côtes des centres de rigidités horizontale et de bascule- ment par rapport à la base de la fondation :.....	52
III-2	- déplacement du centre de gravité de la fondation en tor- sion :.....	56
IV-1	- valeurs des rigidités en rotation k_{θ} et k_{ψ} en fonction de la profondeur p :.....	67
IV-2	- valeurs des rigidités en profondeur rapportées aux rigidi- tés en surface pour le basculement en fonction du coeffi- cient d'enfoncement χ_{θ} :.....	68
IV-3	- valeurs des rigidités en profondeur rapportées aux rigidi- tés en surface à la torsion en fonction du coefficient d'enfoncement χ_{ψ} :.....	69
IV-4	équations des droites d'approximation :.....	70
IV-5	- rigidités superficielles expérimentales :.....	81

IV-6 - rigidités superficielles expérimentales et théoriques selon Gorbunov-Possadov :..... 82

IV-7 - rigidités superficielles rapportées à cd^2 (formule théorique selon Gorbunov-Possadov) :..... 83

IV-8 - rigidités superficielles expérimentales et théoriques selon L. Tzénov :..... 85

IV-9 - rigidités superficielles rapportées à cd^2 (formule théorique selon L. Tzénov) :..... 86

IV-10 - rigidités superficielles expérimentales et théoriques en torsion (formule théorique selon Barkan) :..... 88

IV-II - rigidités superficielles rapportées à cd (formule théorique selon Barkan) :..... 89

A_{I-1} à A_{I-3} - tableaux de mesures et calculs en basculement pour le modèle carré 60 x 60 :..... 105

A_{I-4} à A_{I-7} - mesures et calculs en basculement pour le modèle 60 x 120 :..... 106

A_{I-8} à A_{I-II} - mesures et calculs en basculement pour le modèle 40 x 120 :..... 112

A_{II-1} à A_{II-3} - mesures et calculs en torsion pour le modèle 60 x 60 :..... 121

A_{II-4} à A_{II-6} - mesures et calculs en torsion pour le modèle 60 x 120 :..... 124

A_{II-7} à A_{II-9} - mesures et calculs en torsion pour le modèle 40 x 120 :..... 127

A_{III-1} - coefficients de compression élastique du sol :..... 134

A_{III-2} - valeurs des fonctions de déplacement f_1 et f_2 selon Hsieh :..... 135

I N T R O D U C T I O N

Le calcul de la réponse dynamique d'une structure construite en zone sismique est fait généralement en négligeant l'interaction sol-fondation . Cette réponse dynamique est établie à partir de l'action seule d'un mouvement d'entraînement de la base correspondant au mouvement du sol en l'absence de toute construction ou " mouvement de champ libre " , le mouvement du sol est en fait modifié par la présence de la construction ; une approche plus précise du problème dynamique doit considérer le système sol-structure dans son ensemble sous réserve d'une modélisation plus ou moins élaborée du comportement du sol .

L'effet de l'interaction sol-fondation pris en compte dans l'analyse des réponses dynamiques est introduit en faisant intervenir les paramètres dynamiques du sol (masse de sol participant au mouvement , amortissement , rigidité) ; ces paramètres se trouvent également modifiés en fonction de la forme de la fondation et de sa position vis à vis du sol (superficielle ou enterrée) .

Le problème le plus étudié a été celui de la fondation circulaire reposant sur un demi espace élastique , qui conduit souvent à des solutions explicites , mais une approche assez précise a été également faite pour la fondation rectangulaire superficielle dont l'intérêt pratique concerne des structures beaucoup plus nombreuses .

L'objet de la présente recherche est de déterminer à partir d'essais statiques sur modèle réduit les lois de variation des rigidités du sol des fondations rectangulaires enterrées en fonction de la profondeur pour les mouvements de rotation (basculement et torsion) .

Les essais utilisent pour modèle de sol un bloc de caoutchouc et pour modèle de fondation un parallélépipède rigide sur lequel des efforts sont exercés selon un dispositif approprié et dont on mesure les dépla-

cements .

Cette étude est composée de quatre chapitres présentés comme suit

- Le premier chapitre résume les travaux effectués dans le domaine de l'interaction sol-structure pour la détermination des rigidités du sol .
- Le deuxième chapitre est réservé à la description du matériel et appareillage utilisés dans l'expérimentation .
- La conduite des essais et les méthodes de calcul sont décrites dans le troisième chapitre .
- L'analyse des résultats , le calcul des rigidités et les lois de variation avec la profondeur sont donnés au chapitre quatre .

CHAPITRE I

ETUDES ANTERIEURES

I-1 . Introduction :

Le problème de la réponse dynamique d'une fondation rigide encastrée dans un sol et sujette à une excitation sismique joue un rôle important dans les études de l'interaction sol-structure pour les ouvrages construits en zone sismique . Ces études sont basées sur un certain nombre d'hypothèses simplificatrices en particulier :

- la fondation est supposée plane , rigide et posée à la surface du sol
- le sol est considéré comme un milieu élastique
- l'excitation sismique est représentée par une onde plane et incidente verticalement .

La réponse dynamique d'une structure sujette à une excitation dépend de la réaction du sol sur lequel est fondée cette structure . Cette réaction est caractérisée par une force de rappel du sol , elle dépend de la forme de la fondation ainsi que du contact sol-fondation .

Le problème le plus étudié est celui de la fondation circulaire reposant sur un demi espace élastique infini avec ou sans amortissement homogène ou stratifié horizontalement .

La détermination de cette caractéristique a fait l'objet de différentes recherches .

I-2 . Recherches antérieures :

A partir de modèles mathématiques et d'hypothèses basées sur la théorie d'élasticité plusieurs auteurs (2 , 19 , 20 , 21) ont établis des formules donnant les rigidités du sol en surface pour les différents degrés de liberté de la fondation quand celle ci est sujette à une excitation statique ou dynamique , en particulier :

Pour la fondation soumise à un mouvement de torsion et reposant sur un demi espace élastique Reisner (1937) a présenté une solution analytique en considérant une variation linéaire des contraintes de cisaillement, nulle au centre du cercle et maximum à la périphérie. En 1944 Reisner et Sagoci (4) considèrent une variation linéaire des déformations, nulle au centre du cercle et maximum à la périphérie, par suite ils établissent la constante de rappel statique donnée par la formule suivante :

$$k'_{\psi} = \frac{16}{3} G r^3 \quad (I-1)$$

avec

k'_{ψ} : rigidité du sol pour la fondation circulaire en torsion

G : module de cisaillement du sol

r : rayon de la fondation

Sous l'action d'un couple statique Borowika (1943) établit l'expression de la rigidité statique au basculement de la fondation circulaire reposant sur un demi espace élastique soit :

$$k'_{\theta} = \frac{8}{3(1-\nu)} G r^3 \quad (I-2)$$

k'_{θ} : rigidité du sol pour la fondation circulaire en basculement

r : rayon de la fondation

ν : coefficient de Poisson

Cette solution a été étendue au cas de la fondation rectangulaire reposant sur la surface du sol ; l'extension est obtenue en convertissant la surface de base de la fondation rectangulaire en une base circulaire équivalente, le rayon de la fondation circulaire sera remplacé par un rayon équivalent faisant intervenir les dimensions $2d$ et

2c de la fondation rectangulaire (28) soit :

$$r_{\theta} = \sqrt[4]{\frac{16 c d^3}{3 \pi}} \quad (I-3)$$

$$r_{\psi} = \sqrt[4]{\frac{16 c d (c^2 + d^2)}{6 \pi}} \quad (I-4)$$

r_{θ} : rayon équivalent pour le mouvement de basculement

r_{ψ} : rayon équivalent pour le mouvement de torsion

En utilisant les hypothèses de rigidité infinie des fondations et de la surface de base équivalente Gorbunov-Possadov (5) établissent en 1961 la formule (I-5) ciaprès , qui permet de calculer la rigidité du sol pour les fondations rectangulaires reposant sur un milieu élastique et soumises à un mouvement de basculement .

$$k_{\theta} = \frac{G}{1-\nu} 8 \beta_{\nu} c d^2 \quad (I-5)$$

La rigidité en torsion est établie selon l'hypothèse de Barkan (6) en considérant un module de réaction de cisaillement du sol non uniforme en torsion égal à 1,5 fois le module de cisaillement uniforme en translation ; cette rigidité est donnée par la formule suivante soit :

$$k_{\psi} = 2 (1 + \nu) G \beta_x (c^2 + d^2) \cdot \sqrt{cd} \quad (I-6)$$

2c et 2d représentent les dimensions de la fondation

β_{ν} et β_x coefficients donnés par le graphe ^A III-I

Une autre méthode citée par L. Tzénov (7) basée sur la réaction élastique du sol permet d'évaluer les constantes de rappel, pour le basculement cette constante est donnée par la formule A_{III-I} . Les réactions élastiques du sol ou "coefficients de ballast" sont déterminés expérimentalement; par suite leurs évaluation n'est possible que dans un domaine très limité de dimensions et de charge de la fondation (voir tableau A_{III-I}).

Récemment (1984) une étude expérimentale en bidimensionnel (8) a été effectuée sur modèle réduit.

- Le sol a été modélisé par une membrane en caoutchouc fixée sur trois cotés et la fondation par un système de plaques rigide appliqué sur les faces de la membrane selon le contour de la fondation.

- Dans cette étude l'auteur s'est intéressé aux mouvements de basculement et de translation horizontale; la loi de variation de la rigidité du sol pour le mouvement de basculement en fonction du coefficient d'enfoncement est donnée sous la forme soit :

$$k_{\theta} = k_{\theta_0} (1,3 \chi_{\theta}^2 + 2,4 \chi_{\theta} + 1) \quad (I-7)$$

k_{θ} : rigidité en profondeur pour le mouvement de basculement

k_{θ_0} : rigidité superficielle pour le mouvement de basculement

$\chi_{\theta} = p/2d$: coefficient d'enfoncement

p : profondeur de la fondation

$2d$: dimension de la fondation parallèle au mouvement de basculement

Une autre approche du problème a été développée pour déterminer les caractéristiques dynamiques du sol (rigidité et amortissement) pouvant affecter la réponse de la structure :

- Méthode des fonctions d'impédance

La fonction d'impédance d'une fondation définit les relations entre les forces appliquées au sol par l'intermédiaire de la fondation et les déformations du sol .

Les vecteurs forces considérés sont harmoniques de pulsation ω et dépendant du temps .

Les fonctions d'impédance comportent deux parties , une réelle et l'autre imaginaire ; la partie réelle caractérise la rigidité et la partie imaginaire l'amortissement du sol .

La détermination de ces fonctions d'impédance est basée sur certaines hypothèses concernant la distribution des contraintes sous le massif de fondation .

- distribution uniforme (3 , 16 , 14)
- distribution parabolique (3 , 14)
- distribution correspondant aux contraintes statiques sous une fondation rigide (11 , 12 , 13 , 22 , 23) .

Pour une répartition uniforme des contraintes sous le massif de fondation et un déplacement pondéré moyen de celui-ci , Housner , Bycroft (2) , Deleuze (16) ont développé des solutions donnant la réponse d'une fondation circulaire reposant sur un demi espace élastique et sujette à une excitation harmonique ; ces solutions sont données en utilisant des fonctions de déplacement f_1 et f_2 .

Ces fonctions de déplacement représentent des grandeurs réelles dépendant de la fréquence d'excitation et du coefficient de Poisson du sol , elles sont exprimées par rapport à une variable adimensionnelle a_0 donnée par la formule ci-après :

$$a_0 = \frac{r \cdot \omega}{V_s} \quad (1-8)$$

ω : pulsation
 r : rayon de la fondation
 V_s : vitesse de l'onde de cisaillement

Les fonctions f_1 et f_2 gouvernent les termes de rigidité et d'amortissement respectivement, elles sont évaluées pour les valeurs de a_0 inférieures à 2 ; la réponse ainsi obtenue est généralement satisfaisante.

Les fonctions d'impédance ont été développées par plusieurs auteurs (3 , II , 12 , 13 , 14 , 16 , 22 , 23 , 24 , 27) pour les fondations circulaires, elles sont résumées en annexe " A_{III} " .

Afin de simplifier les calculs des fonctions d'impédance variables avec la fréquence, Veletsos (II), Newmark (24), Lysmer (20) ont proposés des valeurs des fonctions d'impédance indépendantes de la fréquence, ces fonctions constantes donnent des valeurs très proches de celles obtenues à partir des valeurs dépendant de la fréquence ; par suite la rigidité statique est utilisée pour obtenir une réponse correcte aux basses fréquences, le terme d'amortissement est choisit de façon à ajuster la réponse à la résonance.

L'évaluation des fonctions d'impédance est un problème très complexe, il fait appel à des méthodes numériques variées soient :

- Méthode des éléments finis (10 , 17 , 19 , 26)

Cette méthode permet d'évaluer les caractéristiques dynamiques du sol à partir d'un modèle mathématique.

Le sol est modélisé par des éléments finis de géométrie quelconque, et considéré comme un milieu élastique ; les lois d'interpolation utilisées dans les calculs sont le plus souvent linéaires, l'effet de non linéarité est obtenu par superposition de lois linéaires.

La réponse du sol à prendre en compte dans les calculs est donnée pour un accélérogramme de base ; cet accélérogramme correspond au mouvement en champ libre du sol d'un site donné .

L'amortissement géométrique est pris en compte en introduisant un module de cisaillement complexe ; alors que cet amortissement est négligé dans les calculs des fréquences propres de l'analyse modale (30 , 31) .

La méthode des éléments finis donne des résultats satisfaisants ; sa précision dépend d'un certain nombre de facteurs :

- l'élément discrétisant le sol est fonction du programme utilisé .
- les frontières latérales des modèles doivent être assez grandes (4 à 5 fois la hauteur) pour que les ondes réfléchies soient suffisamment atténuées .
- les conditions aux limites des modèles doivent être prises en compte avec soin de façon à éviter la réflexion des ondes à l'intérieur du modèle et empêchant ainsi la dissipation de l'énergie à l'intérieur du modèle faisant ainsi l'effet de l'amortissement géométrique .
- le maillage est choisi de façon à déterminer en tous points les caractéristiques du sol .
- la constante de rappel et l'amortissement du sol doivent être ajustés à chaque itération .
- par raison d'économie et de capacité des ordinateurs le système tridimensionnel est remplacé par un modèle bidimensionnel .

- Méthode des équations intégrales (32)

C'est une méthode numérique , qui a été récemment développée pour le calcul des caractéristiques dynamiques du sol en surface ; elle permet d'évaluer les fonctions d'impédance pour les fondations enterrées dans un milieu homogène , et de résoudre les problèmes difficiles à modéliser par éléments finis à cause du grand nombre d'éléments discrétisant le sol .

Cette méthode consiste à résoudre numériquement des équations intégrales satisfaisant la loi de comportement d'un milieu donné ; la résolution s'effectuant le long de la frontière du milieu considéré .

CHAPITRE

2

DESCRIPTION DU MODELE ET DU

DISPOSITIF D'ESSAI

CH II DESCRIPTION DU MODELE ET DU DISPOSITIF D'ESSAI

II-1 Introduction :

Cette étude a pour but de déterminer les rigidités du sol pour les fondations rectangulaires enterrées soumises à des mouvements de rotation .

L'expérimentation étant faite sur modèle réduit , il est présenté dans ce chapitre la description et le mode de réalisation de ces modèles ainsi que le matériel et appareillage utilisé . Les essais de translation (3X), ainsi que les essais de rotation relatif à la présente recherche sont effectués avec les mêmes modèles , et par suite cette partie de la présentation des travaux est commune .

II-2 Modélisation : (fig II-2)

Il s'agit d'une modélisation sol-structure

II-2-1 Modèle de sol : (fig II-2 a)

La matière modélisant le sol est un caoutchouc naturel dont les caractéristiques sont données dans le paragraphe II-3-I cette modélisation est destinée à représenter un demi espace d'un milieu élastique homogène et isotrope . Cette modélisation est faite sous forme de bloc de caoutchouc (1) placé dans un caisson en bois (4) ; une cavité (2) en forme de parallélépipède rectangle est prévue à la partie supérieure du bloc de caoutchouc selon des dimensions correspondant à celles du modèle de fondation à considérer .

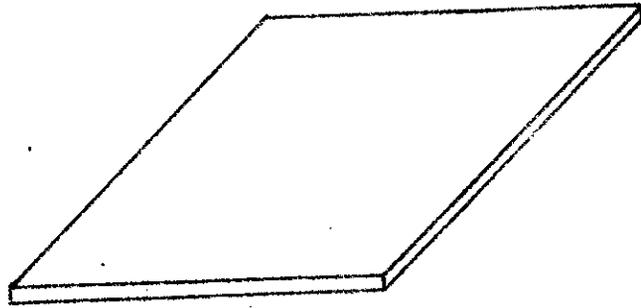
Cette cavité est située au milieu de la face supérieure du bloc .

II-2-2 Modèle de fondation : (fig II-2 b)

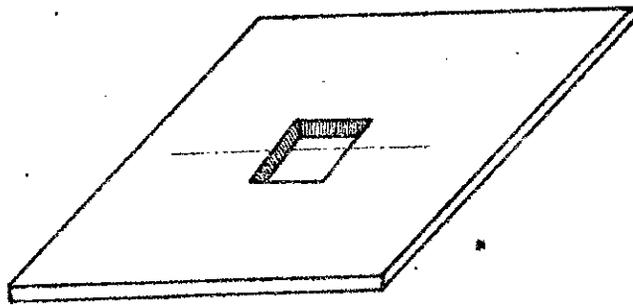
La structure rigide intervient dans l'interaction sol-structure par sa fondation (6) de dimensions de base $2c$ et $2d$ et de profondeur p .

La fondation est modélisée par un parallélépipède rectangle en acier de mêmes dimensions que la cavité (2) prévue dans le bloc de caoutchouc .

Fig II-1: Plaques de caoutchouc



a) Plaque pleine

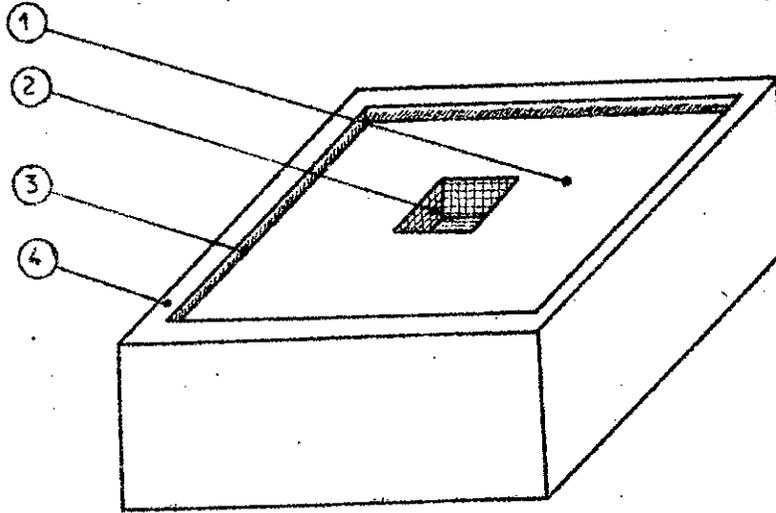


b) Plaque perforée



c) Plaque pour variation de profondeur

Fig II-2 : Modèles sol et sol-fondation



a) modèle sol

① plaques en caoutchouc

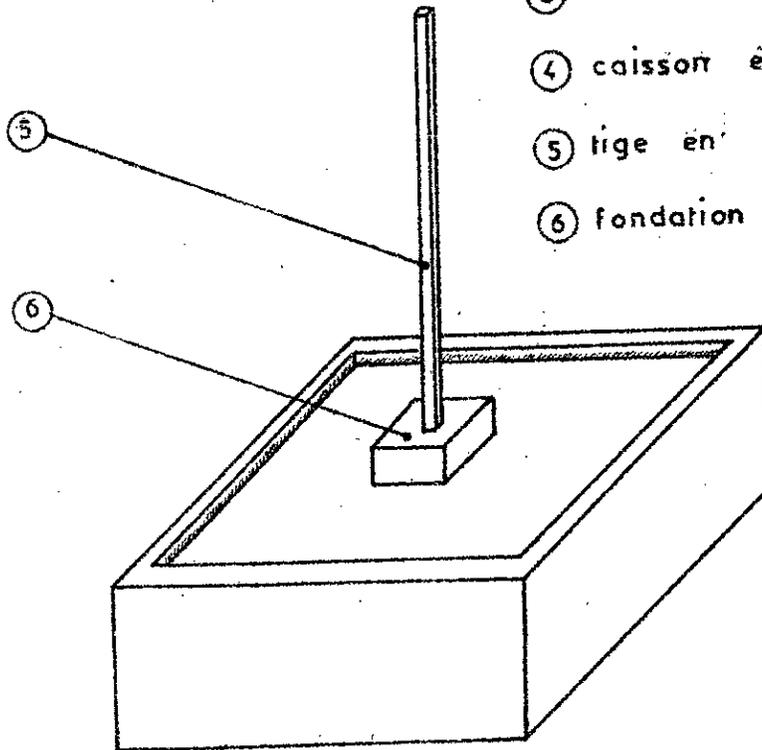
② cavité

③ coulée en plâtre

④ caisson en bois

⑤ tige en acier

⑥ fondation en acier



b) modèle sol - fondation

sûrmoné d'une tige rigide (5) en acier pour l'application des charges et le montage de l'appareillage de mesure .

II-3 Montage du système : (fig II-1 et II-2)

II-3-1 Le sol :

Le bloc de caoutchouc modélisant le sol est réalisé à l'aide de plaques carrées (fig II-1) de dimensions (50 x 50) cm et d'épaisseur 2 cm . Les plaques constituant ainsi le bloc de caoutchouc sont de deux types :

- plaques pleines (fig II-1 a) formant l'assise de la fondation
- plaques perforées (fig II-1 b) servant à la constitution de la cavité (§ II-2-1) .

Ces plaques sont superposées horizontalement et collées entre elles . La colle de type néoprène a été choisie en vue d'assurer la continuité du matériau et d'en suivre les déformations élastiques ; ce collage permet notamment d'éviter le glissement éventuel entre les plaques lors des essais .

Une coulée de plâtre (fig II-2 a) a été appliquée sur le pourtour des plaques afin d'éliminer le jeu pouvant exister entre le bloc de caoutchouc et le caisson .

La variation de la profondeur de la fondation à l'intérieur de la cavité est obtenue par superposition sous la fondation de plaques minces de caoutchouc (fig II-2 c) collées d'épaisseur 5 mm : ces dernières sont découpées selon le modèle de fondation à considérer . Par suite cette variation de profondeur se fait de 5 en 5 mm jusqu'à la profondeur maximale de 60 mm .

L'expérience a été menée sur trois modèles de sol séparés .

II-3-2 La fondation : (fig II-3)

Trois types de modèles de fondations sont utilisés

...../.....

dont la surface de base présente les dimensions suivantes :

- modèle carré : 60 x 60 mm
- modèle rectangulaire : 40 x 120 mm
- modèle rectangulaire : 60 x 120 mm

La hauteur du modèle de fondation est fixée à 70 mm .

La tige surmontant la fondation est de section carrée et de dimensions 20 x 20 mm .

II-3-3 L'appareillage :

Des comparateurs de précision $1/100$ sont utilisés pour la lecture des déplacements ; leur nombre ainsi que leur position sur la tige seront précisés dans la description de chaque type d'essai (chapitre III) . Ces comparateurs sont munis d'un socle aimanté permettant leur immobilisation sur une plaque métallique elle même fixée au caisson .

Les charges sont appliquées à l'aide de poids placés sur un plateau suspendu ; la tension du câble de suspension est exercée horizontalement sur la tige par l'intermédiaire d'une poulie en duralumin de diamètre 100 mm . Le câble utilisé est un câble flexible torsadé de diamètre 1 mm . La liaison entre le câble et la tige est réalisée par un anneau assurant un contact tige-anneau pratiquement ponctuel , géométriquement précis et de frottement négligeable .

II-4 Mise au point du modèle :

II-4-1 Généralités :

Pour modéliser un demi espace élastique , les dimensions du modèle de sol doivent être choisies relativement grandes par rapport à celles du modèle de fondation .

II-4-2 Choix des dimensions :

II-4-2-1 Modèle de sol :

Dans le but d'obtenir un modèle de demi espace

...../.....

élastique homogène , l'idée initiale était d'utiliser un bloc de caoutchouc unique de grandes dimensions , or le mode de fabrication industrielle du caoutchouc destiné à la confection du modèle ne permettait que des dimensions très réduites pour une pièce massive , par suite le modèle a été réalisé par superposition de plaques de dimensions maximales pour la fabrication industrielle utilisée .

Le modèle de sol ainsi constitué a les dimensions suivantes :

50 x 50 x 24 cm

II-4-2-2 Modèle de fondation :

Les dimensions des modèles de fondations données au paragraphe II-3-2 sont choisies en fonction du modèle de sol décrit précédemment (§ II-4-2-1) .

La hauteur de 70 mm (§ II-3-2) ainsi fixée permet d'une part , d'obtenir la profondeur maximale ($p = 60$ mm) , et faciliter le montage et la prise des mesures d'autre part .

II-4-3 Choix des matériaux :

II-4-3-1 Modèle de sol :

Le type de caoutchouc utilisé permet d'obtenir

.../....

des déformations relativement importantes sous faibles charges pour la commodité des mesures . Les caractéristiques données par le fabricant sont les suivantes :

- masse volumique $\rho = 0,96 \text{ g/cm}^3$

- coefficient de poisson $\nu = 0,5$

- le module d'élasticité $E = 10 \text{ kgf/cm}^2$. Cette valeur est déterminée expérimentalement par des essais de traction effectués sur le caoutchouc; ces essais seront décrits dans le paragraphe II-5 .

II-4-3-2 Modèle de fondation :

L'acier utilisé pour confectionner les modèles de fondations est un acier doux de masse volumique $7,8 \text{ kgf/dm}^3$ et de module d'élasticité $E = 2 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$.

Avant le choix définitif du modèle en acier , plusieurs modèles ont été réalisés avec d'autres matériaux (pléxiglass , bois) .

Pour le modèle en pléxiglass les déformations propres , lors des essais sont apparues très importantes par rapport à celles du caoutchouc .

Un deuxième modèle exécuté en bois n'a pas permis une réalisation précise aux cotes prévues .

II-4-4 Procédés de fabrication :

Le caoutchouc est obtenu par moulage .

Afin d'obtenir des cavités dans les plaques superficielles de mêmes dimensions que celles des fondations , plusieurs procédés de coupe ont été essayés (presses avec emporte pièces , sciage électrique ;.) ; aucun de ces procédés n'a permis d'obtenir une coupe précise et un état de surface satisfaisant .

Il a par suite été nécessaire de prévoir ces cavités lors du moulage des plaques et donc de réaliser les moules métalliques réservant l'emplacement des cavités selon un usinage précis ($1/100 \text{ mm}$) .

Les modèles de fondation en acier sont réalisés par fraisage ; ce moyen d'usinage permet d'avoir les dimensions au 1/100 mm .

Le diamètre des poulies a été choisi de façon à réduire la flexion du câble de suspente .

II-4-5 Remarques :

Afin d'augmenter l'adhérence sol-fondation au niveau de la surface de base et d'éviter le soulèvement éventuel de la fondation celle ci est collée à sa base .

Lors des essais , d'importants frottements ont été constatés entre la poulie et son axe . Pour rendre ces frottements négligeables , les poulies ont été montées sur des roulements .

En vue d'obtenir une modélisation satisfaisante de demi espace élastique , il a été admis de ne pas dépasser le rapport de 1/4 entre la plus grande dimension en plan de la fondation et celle du modèle de sol , ou entre la profondeur de la fondation et la hauteur du modèle de sol . Pour ce rapport de 1/4 , les recherches antérieures en modèle bidimensionnel (8) avaient indiqué la faible incidence des conditions de contour , à une similitude près . Pour la présente étude une vérification de validité pourra être faite pour le cas des fondations superficielles par comparaison aux valeurs théoriques basées sur l'hypothèse du demi espace élastique (chapitre IV) .

II-5 Essai sur le caoutchouc :

II-5-1 . Essai de traction :

Des essais de traction ont été effectués sur le caoutchouc pour en étudier les caractéristiques de déformation et de déterminer le module d'élasticité à prendre en compte .

Ces essais ont été fait sur les plaques de 20 et 5 mm d'épaisseur ;

les éprouvettes utilisées ont pour longueur initiale $l_0 = 90$ mm , et sont découpées sur les plaques de caoutchouc . Les sections de ces éprouvettes sont les suivantes :

- 20×20 mm² soit 4 cm² pour les plaques de 20 mm d'épaisseur.
- 5×20 mm² soit 1 cm² pour les plaques de 5 mm d'épaisseur .

Les résultats sont présentés dans les tableaux II-1 et II-2 ci-après :

Δl : allongement mesuré en mm .

$\sigma = \frac{F}{S}$: contrainte de traction en kg/cm² .

$\epsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$: déformation relative .

Tableau II-1 : Résultats de mesures et calcul pour les plaques d'épaisseur 20 mm

F (kg)	1	2	3	4	5
Δl (mm)	2,0	4,5	7,0	9,0	11,0
σ (kg/cm ²)	0,25	0,50	0,75	1,00	1,25
ϵ	0,022	0,050	0,078	0,100	0,122

Tableau II-2 : Résultats de mesures et calculs pour les plaques d'épaisseur 5 mm .

F (kg)	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
Δl (mm)	2,0	4,0	6,0	8,0	1,0
σ (kg/cm ²)	0,20	0,40	0,60	0,80	1,00
ϵ	0,022	0,044	0,067	0,089	0,111

A partir de ces tableaux il est déduit le graphe $\sigma = f(\epsilon)$ fig II-1 , les graphes obtenus sont des droites passant par l'origine, pour les deux essais correspondant aux plaques de 20 et 5 mm d'épaisseur . Les pentes de ces droites correspondent selon la loi de Hooke $\sigma = E \cdot \epsilon$, aux valeurs suivantes du module d'élasticité E :

- E = 9,3 kg/cm² pour les plaques d'épaisseur 5 mm .
- E = 10,2 kg/cm² pour les plaques d'épaisseur 20 mm .

La valeur du module d'élasticité E prise en compte dans les calculs est E = 10 kg/cm² . Ce résultat est en conformité en limite inférieure avec les valeurs de E données pour le caoutchouc usuel (voir Buzdugan) soit E = 10 à 100 kg/cm² .

Les courbes caractéristiques d'allongement du caoutchouc ne sont pas des droites (I) l'allure de cette courbe en traction est représentée par la figure II-2 .

Dans le cas des présents essais sur le caoutchouc il s'agit de contraintes faibles (inférieures à 1,5 kg/cm²) qui ne sont pas non plus

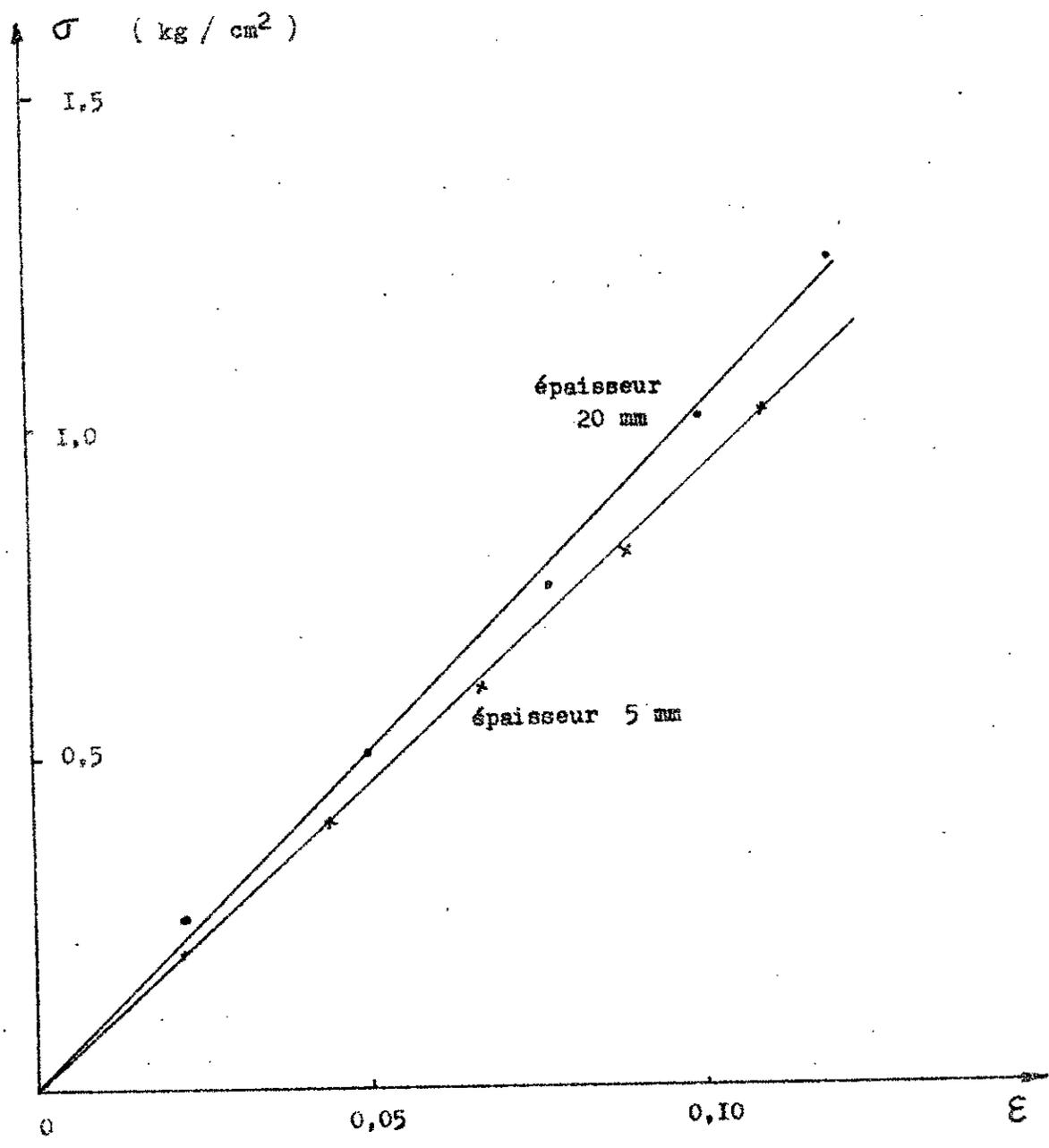
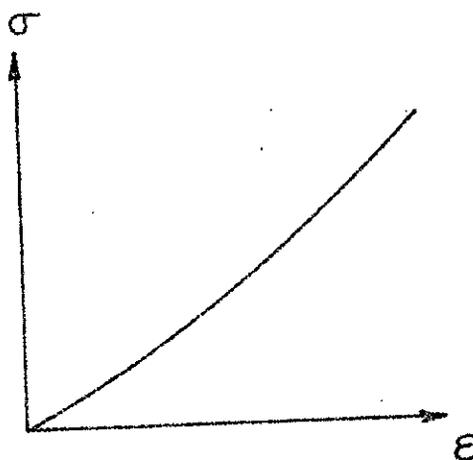


Fig II-I : Courbes caractéristiques de traction du caoutchouc

dépassées en générale lors des essais sur modèle dans la portion utilisée des graphes expérimentaux .

Les courbes expérimentales (fig II-I) indiquent dans ce domaine un comportement purement linéaire d'où une valeur constante du module élastique .

Fig II-2 : Courbe caractéristique en traction du caoutchouc selon Buzdugan (I) .



II-5-2 . Essai de compression : (fig II-5)

Ces essais de compression ont pour but de déterminer le module d'élasticité des modèles de sol ; ces essais sont effectués sur chaque modèle de sol séparément .

L'effort de compression est exercé à l'aide d'une presse dont le chargement successif s'effectue de 200 en 200 kg jusqu'à un effort maximal de 1400 kg .

La charge est appliquée de manière uniforme par l'intermédiaire d'une plaque métallique rigide reposant sur la face supérieure du modèle de sol .

Cinq comparateurs sont utilisés pour mesurer les déformations longitudinales ; un comparateur est placé au centre de la plaque et les quatre autres sont placés aux angles de cette plaque ; cette disposition des comparateurs permet de vérifier l'uniformité du déplacement vertical sur toute la surface de la plaque reposant sur le modèle de sol.

Les résultats de ces essais sont résumés dans le tableau II-3 ci-après :

- F : charge verticale
- S : section du modèle de sol 50 x 50 cm
- l_0 : hauteur du modèle de sol 24 cm
- Δl : raccourcissement du modèle de sol
- ϵ : déformation relative

Tableau II-3 : Déformations relatives en fonction de la contrainte de compression des différents modèles de sol

σ (kg/cm ²)	0,16	0,24	0,32	0,40	0,48	0,56
modèle 60 x 60 $\epsilon_1 \times 10^{-3}$	7,6	11,0	16,0	19,0	23,0	26,0
modèle 60 x 120 $\epsilon_2 \times 10^{-3}$	6,0	9,0	12,0	16,0	18,0	21,0
modèle 40 x 120 $\epsilon_3 \times 10^{-3}$	8,4	12,0	17,0	21,0	25,0	29,0

A partir des valeurs de ce tableau, il est déduit la courbe en compression $\sigma = f(\epsilon)$ (fig II-3) ; les graphes ainsi obtenus pour

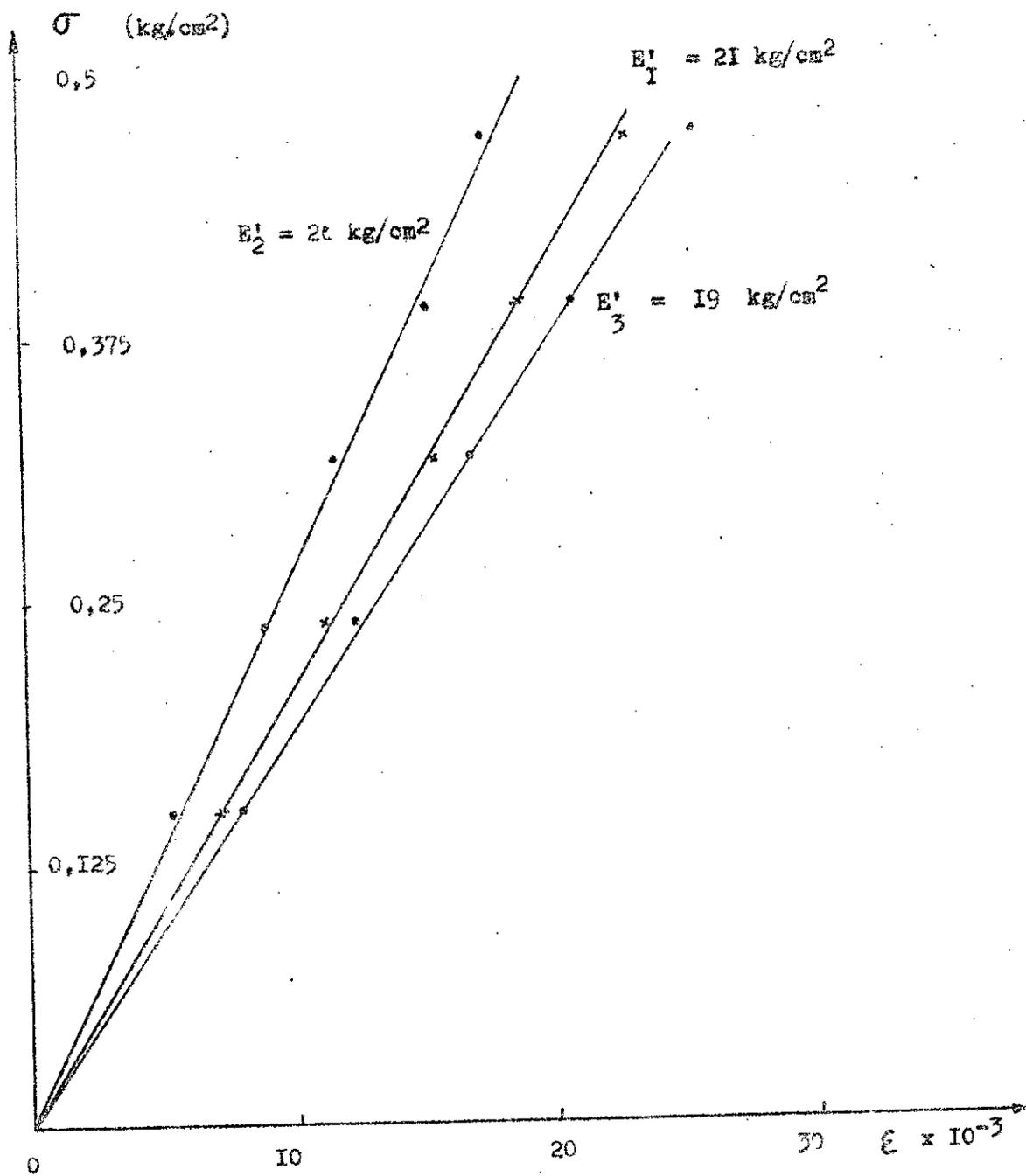


Fig II-3 : Courbes caractéristiques de compression des modèles de sol

Les trois modèles sont sensiblement linéaires ; les coefficients de proportionnalité ont pour valeurs :

- $E' = 21 \text{ kg/cm}^2$ pour le modèle 60 x 60
- $E' = 26 \text{ kg/cm}^2$ " " 60 x 120
- $E' = 19 \text{ kg/cm}^2$ " " 40 x 120

Un calcul simplifié de la déformation en compression d'un échantillon de caoutchouc sans déformation des faces extrêmes est présenté en annexe " III " , ce calcul approché a montré que la valeur du module d'élasticité apparent obtenu dans ce cas est sensiblement le double du module d'élasticité réel avec déformation latérale . La valeur de E résultant de ce calcul est alors :

- $E_1 = 10,5 \text{ kg/cm}^2$ pour le modèle 60 x 60
- $E_2 = 13 \text{ kg/cm}^2$ " " 60 x 120
- $E_3 = 9,5 \text{ kg/cm}^2$ " " 40 x 120

Ces valeurs sont comparables aux valeurs de E obtenues dans l'essai de traction ; les modules apparents sont en tous cas proportionnels aux modules réels , et ces résultats montrent qu'il existe une dispersion sensible sur les valeurs du module moyen E d'un modèle à un autre (15%) .

II-5-3 . Essai de dureté : (fig II-6)

Des essais non destructifs sont effectués sur les différentes plaques de caoutchouc constituant un modèle de sol pour étudier leur dispersion .

Par analogie à l'essai de " Dureté Brinell " , un appareillage est mis au point afin de mesurer la dureté des plaques .

L'appareillage d'essai est constitué d'une bille de 50 mm de diamètre solidaire à l'une des extrémités d'un levier en bois de longueur 300 mm ; la rotation de ce levier se fait par rapport à l'autre extrémité

qui repose sur un axe de rotation fixé à un socle en bois .

Une force verticale constante est appliquée sur la plaque de caoutchouc par l'intermédiaire de la bille ; cette force vertical est exercée à l'aide d'un poids $P = 4 \text{ kg}$ placé à l'extrémité où est fixée la bille .

L'horizontalité du levier est vérifiée à l'aide d'un niveau à bulles posé sur le bras .

Le choix du diamètre de la bille s'est effectué d'une part en fonction de la charge appliquée , et d'autre part pour avoir un diamètre de l'empreinte de la bille facilement mesurable avec une bonne précision ; cette empreinte est mise en évidence par application d'une couche fine d'huile visqueuse sur la partie de la bille en contact avec la plaque .

Le diamètre de l'empreinte est mesuré à l'aide d'un pied à coulisse ; la visualisation de cette empreinte est faite avec une loupe .

Le module de glissement G est donné par la formule de Hertz en demi espace soit :

$$G = \frac{3 P R}{16 a^3} \quad (\text{II-1})$$

avec

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (\text{II-2})$$

R : rayon de la bille

a : rayon de l'empreinte

Tableau II-4 : Valeurs des modules d'élasticité et diamètres de l'empreinte

numéro des plaques	Diamètres de l'empreinte 2a en mm			E en kg/cm ²		
	modèle 60 x 120	modèle 40 x 120	modèle 60x60	modèle 60 x 120	modèle 40 x 120	modèle 60 x 60
1	15,0	16,4	15,3	13,33	10,2	12,56
2	15,2	16,6	15,2	12,81	9,70	12,81
3	15,1	16,7	15,3	13,07	9,66	12,56
4	15,0	15,8	15,4	13,33	11,40	12,32
5	15,3	15,9	15,2	12,56	11,19	12,81
6	15,0	16,6	15,2	12,81	9,84	12,81
7	15,1	16,6	15,3	13,07	9,84	12,56
8	15,5	15,8	15,4	12,08	11,41	12,32
9	15,2	15,9	15,3	12,81	11,19	12,56
10	15,1	16,5	15,3	13,07	10,20	12,56
11	15,2	16,5	15,2	12,81	10,20	12,81
12	15,2	16,5	15,2	12,81	10,20	12,81

II-5-4 . Essai de chargement et de déchargement en torsion :

Un essai de chargement et de déchargement en torsion a été effectué sur le modèle carré (60 x 60) à une profondeur $p = 30$ mm pour déterminer le comportement du caoutchouc ; les résultats de mesures et calculs sont reportés dans le tableau II-5 ci-après :

d'où la valeur du module d'élasticité

$$E = \frac{3}{8} \frac{P}{a^3} R (1 + \nu) \quad (II-3)$$

Les résultats de mesures sont donnés dans le tableau II-4 ; ces résultats montrent qu'il existe une dispersion sur les valeurs du module d'élasticité des plaques d'un même modèle , cette dispersion est comme suit :

- 10 % pour le modèle 60 x 120
- 18 % " " 40 x 120
- 4 % " " 60 x 60

Toutefois cet essai dont le but est seulement d'apprécier la dispersion entre les caractéristiques élastiques , ne donne qu'une valeur approchée du module de glissement ou du module élastique .

- L'épaisseur de la plaque n'est pas très grande par rapport au rayon de l'empreinte (3 fois environ) ; d'où une erreur en utilisant la formule de Hertz qui correspond au demi espace .

- La précision des lectures est de l'ordre de $\pm 0,2$ mm ; d'où une erreur sur le module élastique de ± 4 % .

Tableau II-5 : Résultats de chargement et de déchargement en torsion

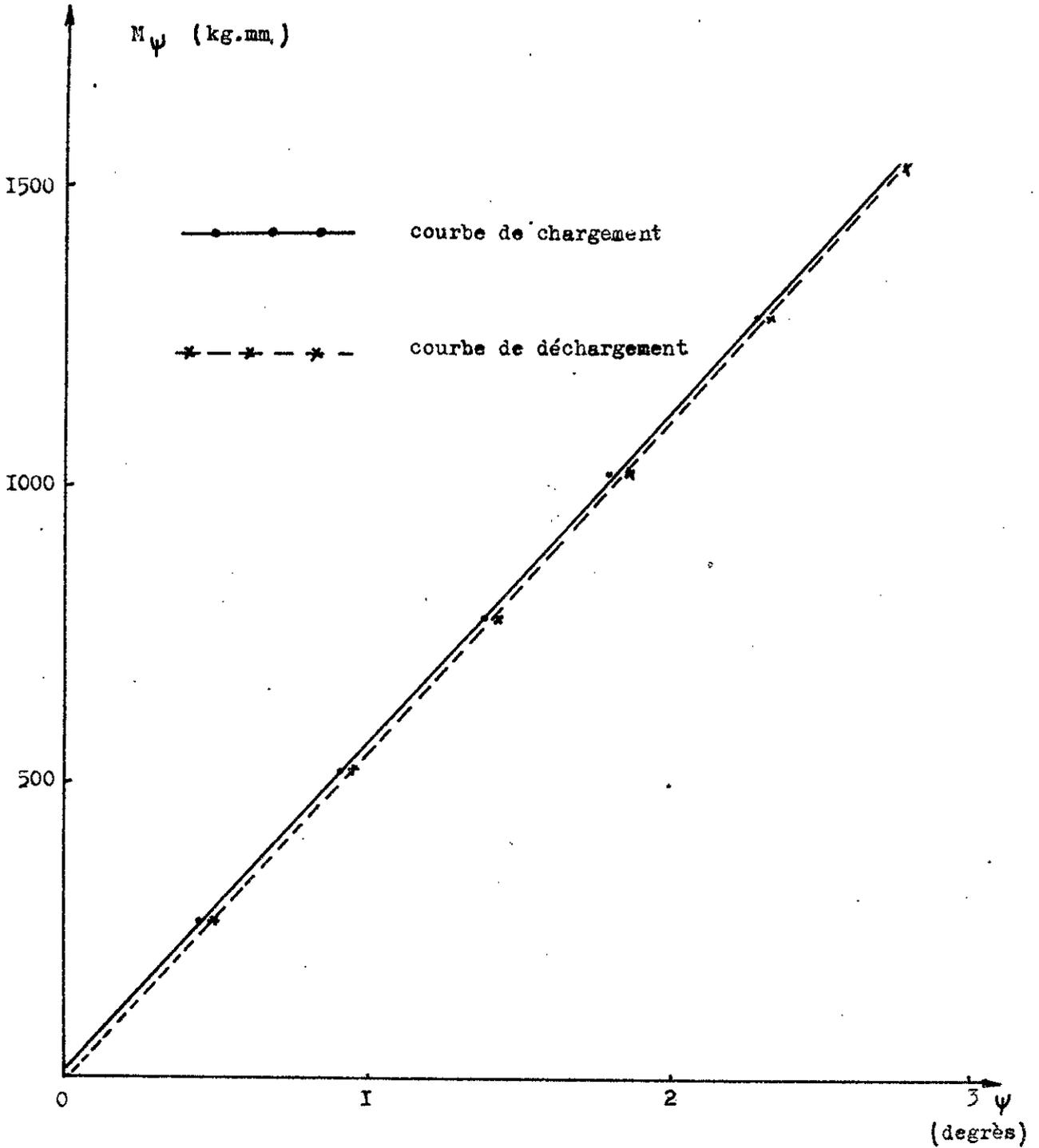
	M_{ψ}	0	255	510	765	1020	1275	1530
chargement	Δ_1	0	0,77	1,55	2,40	3,15	3,97	4,84
	Δ_2	0	1,53	3,10	4,79	6,29	7,93	9,68
	ψ_{ch}	0	0,44	0,89	1,37	1,80	2,27	2,77
décharg.	Δ_1	0,03	0,81	1,57	2,43	3,20	4,02	4,84
	Δ_2	0,07	1,60	3,14	4,85	6,39	8,03	9,68
	$\psi_{dech.}$	0,02	0,46	0,90	1,39	1,83	2,30	2,77
$\psi_{chg} - \psi_{dech.}$		0,02	0,02	0,01	0,02	0,03	0,03	0,00

Ce tableau montre que les déformations dues au chargement et au déchargement sont très proches avec un écart variant de 0,01 à 0,03 degrés ; cet écart est pratiquement constant pour la série de mesure effectuée .

Les résultats indiqués ci-dessus confirment que pour des moments de torsion variant de 0 à 1530 kg.mm , le caoutchouc a un comportement linéaire élastique , et que les courbes (fig II-4) chargement-déchargement sont presque confondues .

L'écart existant peut être dû aux glissements très localisés inévitables au voisinage des angles où les contraintes élastiques sont théoriquement infinies , d'où une adaptation plastique locale .

Fig II-5 : Courbes de chargement et déchargement en torsion
(modèle 60 x 60)



CHAPITRE 3

EXPERIMENTATION

Ch III EXPERIMENTATION

III-1. Objet de l'expérimentation :

En vue d'étudier les problèmes d'interaction sol-structure pour les fondations profondes , l'expérimentation a pour objet de déterminer pour les fondations rectangulaires rigides , la variation des rigidités dans un sol élastique semi-infini .

L'expérience est faite sur un modèle de fondation tridimensionnel soumis à des mouvements de rotation pour des mesures statiques . Pour cela deux types d'essais sont effectués :

- Essais de basculement
- Essais de torsion

III-2. Nature des essais et mesures :

Ces essais ont pour but de mesurer les déplacements de rotation de la fondation sous l'action de charges statiques appliquées au système.

Les fondations tournent d'un angle θ ou ψ par rapport à un axe horizontal ou vertical respectivement . Ces angles de rotation sont calculés à partir des déplacements linéaires lus sur les comparateurs , en fonction des charges appliquées .

Des graphes moment-rotation ($M_{\theta} = f(\theta)$ et $M_{\psi} = f(\psi)$) sont établis pour chaque type de fondation , pour une profondeur donnée et selon la direction du mouvement à considérer .

Pour pouvoir effectuer séparément les essais de basculement et de torsion ; des systèmes de montage sont prévus pour découpler les deux mouvements , la description de ces montages sera faite ultérieurement (§ III-4 et III-5) .

III-3. Notations et principe des mesures pour les deux types d'essais :

III-3-1. Notations : (fig III-4 et III-6)

- F : force provoquant les mouvements de rotation
- C : position du centre de rigidité horizontale
- l : distance du centre de rigidité horizontale au point d'application de la force de basculement
- l' : distance du centre de gravité de la fondation au point d'application de la force de torsion
- O : centre de la base de la fondation
- O' : centre de basculement de la fondation
- p : profondeur de la fondation
- a : distance entre deux comparateurs
- M_{θ} : moment de basculement
- M_{ψ} : moment de torsion
- p' = OC : cote du centre de rigidité horizontale par rapport à la base de la fondation
- Δ : déplacements horizontaux
- OO' : écart existant entre le centre de rigidité horizontal et le centre de basculement réel
- θ : angle de basculement
- ψ : angle de torsion

III-3-2. Principe des mesures de grandeurs :

Les forces F sont réalisées par l'action gravitaire de poids dont l'incrément est de un kilogramme sauf pour les trois premières profondeurs ou il est de 240 grammes .

Le nombre de mesures effectuées , pour une série d'essais sur un modèle de fondation , pour une profondeur et une direction donnée est de cinq .

La profondeur est obtenue par différence à la profondeur maximale par superposition des plaques de caoutchouc additionnelles de 5 mm.

La profondeur de la fondation varie de 0 à 60 mm.

Les déplacements horizontaux sont mesurés à l'aide de comparateurs de précision 1/100 de mm.

Les distances sont mesurées avec une règle graduée au 1/2 mm.

III-4 . Essai de basculement : (fig III-1 et III-2)

III-4-1 . Description du montage et principe de l'essai :

Le mouvement de basculement est obtenu par application d'une force horizontale en un point de la tige situé à une distance l du centre de rigidité horizontale de la fondation . Cette force est appliquée par l'intermédiaire d'une poulie (3) à l'aide d'un poids suspendu (6) .

Les mesures de déplacements horizontaux sont données par deux comparateurs placés sur la tige selon un plan vertical .

Cet essai est effectué dans deux directions perpendiculaires , pour chaque modèle de fondation et chaque profondeur .

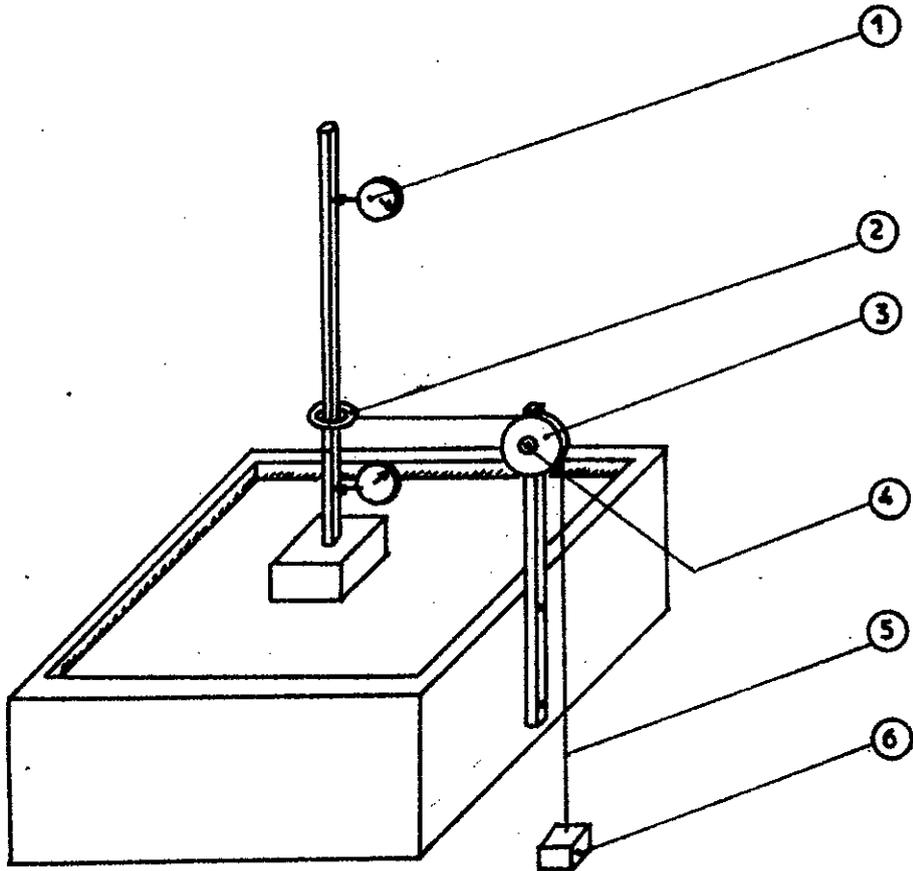
III-4-2 . Méthode de calcul : (fig III-3)

Pour séparer les mouvements de rotation et de translation de la fondation dans les calculs dynamiques , il est commode de se rapporter au centre de rigidité de translation de la fondation , et la rigidité en basculement sera par suite calculée par rapport à ce centre .

Dans les essais de basculement effectués ici avec une seule force , le centre de basculement diffère du centre de rigidité , mais on peut considérer le mouvement comme la somme d'une translation et d'une rotation autour du centre de rigidité , les états de contraintes seront superposables si le comportement est élastique linéaire .

En ce cas la rotation de basculement est indépendante de la

Fig III-2: Dispositif pour les essais de basculement.



- ① comparateurs
- ② anneau en acier
- ③ poulie en duralumin
- ④ roulement
- ⑤ câble flexible en acier
- ⑥ plateau de balance

Fig III-3 : Schéma statique et de calcul (basculement)

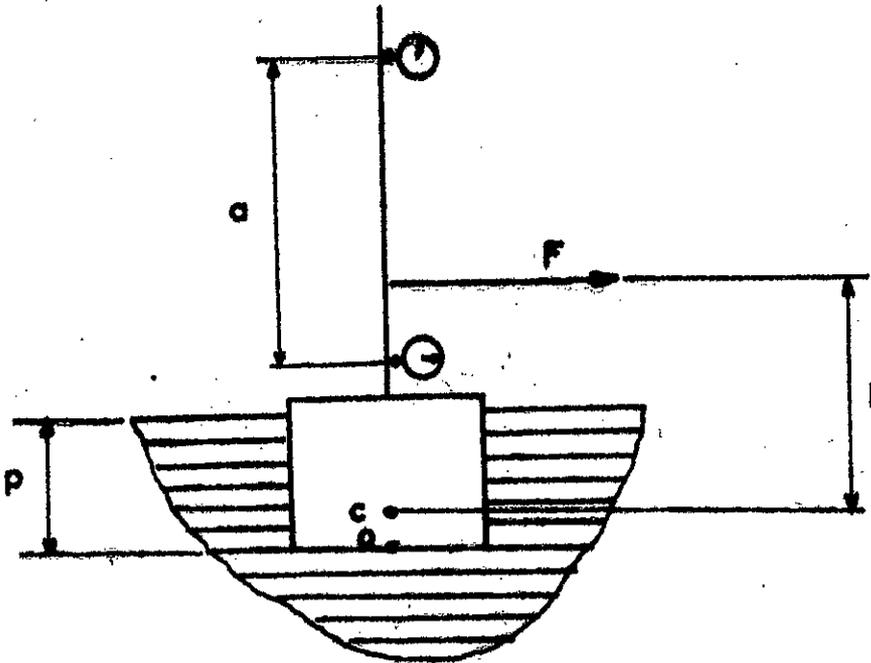


Schéma statique

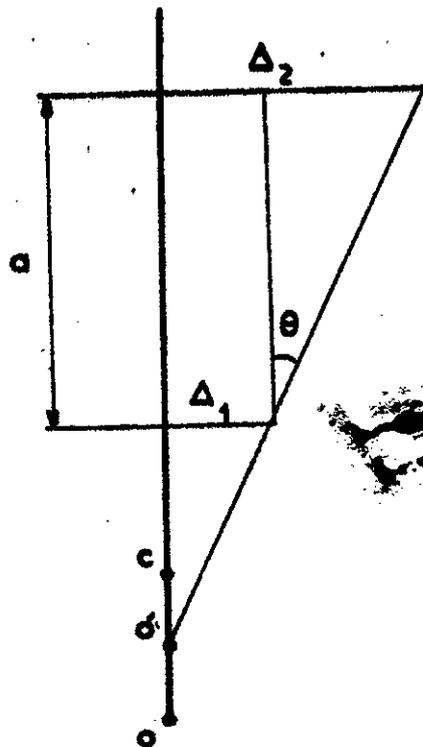


Schéma de calcul

translation et permettra donc de déterminer , à partir du mouvement de basculement au centre de rigidité , la rigidité de basculement en ce point .

Calcul du moment de basculement au centre de rigidité

$$M_0 = F \cdot l \quad (\text{III-4-1})$$

Calcul de l'angle de basculement

$$\theta = \arctg \frac{\Delta_2 - \Delta_1}{a} \quad (\text{III-4-2})$$

Calcul de la position du centre de basculement

$$x = \frac{\Delta_1}{\text{tg} \theta} \quad \text{ou} \quad x = \frac{\Delta_2}{\text{tg} \theta} \quad (\text{III-4-3})$$

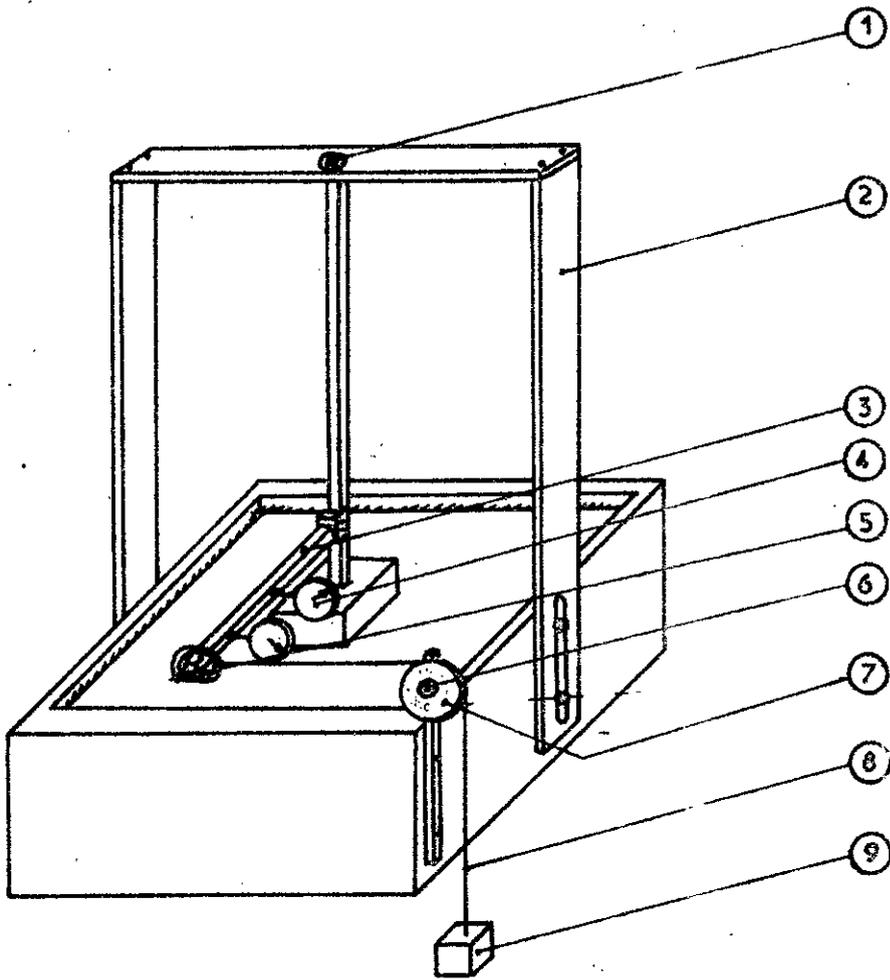
III-5 . Essai de torsion : (fig III-4 et III-5)

III-5-I . Description du dispositif et principe de l'essai :

A l'extrémité du bras métallique horizontal (3) de section carrée et de longueur 260 mm solidaire de l'axe du modèle de fondation , une force horizontale est appliquée pour provoquer la rotation de torsion de la fondation . Un câble en acier torsadé (8) reliant la charge (9) au bras par un anneau en acier (5) dont le contact anneau-bras est pratiquement ponctuel , et passant par la gorge d'une poulie (7) permet l'application de la force .

La position en hauteur de la poulie est fixe ; pour assurer l'horizontalité de la force lors des essais , le bras coulissant sur la

Fig. III-5 : Dispositif pour les essais de torsion



- ① roulement
- ② portique en bois
- ③ bras en acier
- ④ comparateurs
- ⑤ anneau en acier
- ⑥ roulement
- ⑦ poulie
- ⑧ câble flexible en acier
- ⑨ plateau de balance

Fig III-6 : Schémas statique et de calcul. (en rien)

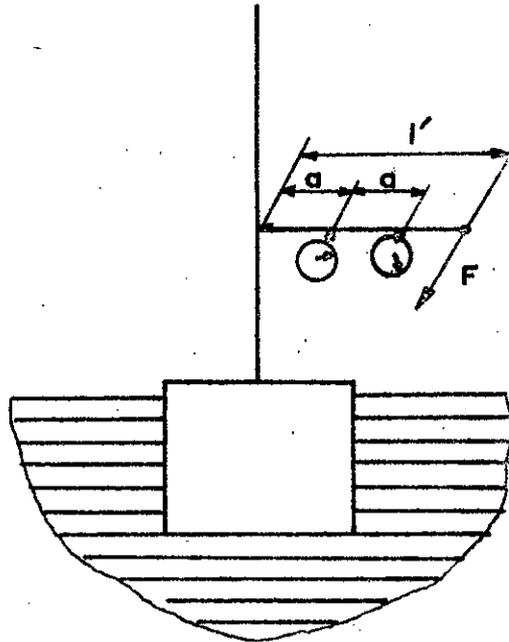


Schéma statique

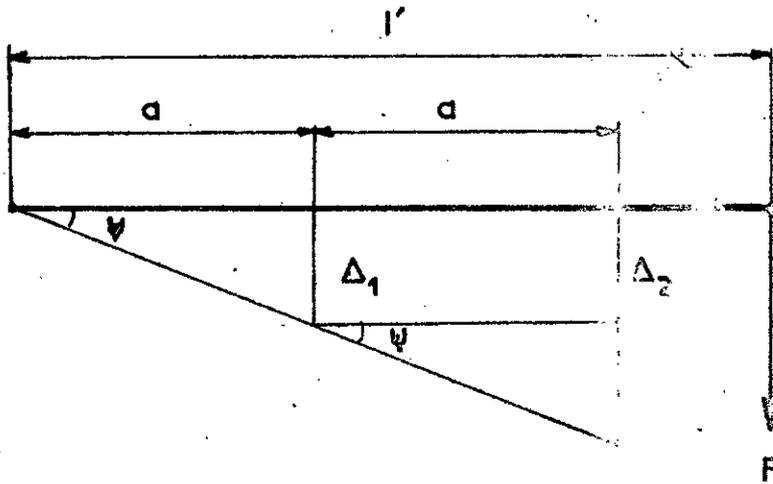


Schéma de calcul

tige peut être réglé en hauteur selon la profondeur de la fondation à considérer, l'immobilisation de ce bras en hauteur est réalisé par six vis de blocage. Ce procédé de fixation permet d'éliminer tout déplacement éventuel du bras par rapport à la tige au niveau de la liaison.

Pour pouvoir effectuer l'essai de torsion pure; un portique en bois (2) réglable en hauteur monté sur le caisson permet de maintenir l'axe vertical du mouvement, un palier de roulement (I) encastré dans la partie supérieure de ce portique et monté à l'extrémité supérieure de la tige surmontant la fondation, permet de réaliser l'articulation supérieure de l'axe avec un frottement négligeable.

Deux comparateurs (4) placés sur le bras dans un plan horizontal donnent les déplacements subis lors de la torsion.

III-5-2. Méthode de calcul :

Calcul du moment de torsion par rapport au centre de gravité de la fondation

$$M_{\psi} = F \cdot l \quad (III-5-1)$$

Calcul de l'angle de torsion

$$\psi = \arctg \frac{\Delta_2 - \Delta_1}{a} \quad (III-5-2)$$

Calcul de la position du centre de torsion

$$x' = \frac{\Delta_1}{\operatorname{tg} \psi} \quad \text{ou} \quad x' = \frac{\Delta_2}{\operatorname{tg} \psi} \quad (III-5-3)$$

III-6 . Remarques :

La position du ressort horizontal ou centre de rigidité C pour les fondations rectangulaires enterrées est donné dans la thèse " Etude expérimentale des rigidités du sol pour les fondations rectangulaires enterrées soumises à des mouvements de translation " (33) .

Les positions du centre de rigidités horizontales et celle du centre de basculement sont très voisines voir tableau III-1 , ces valeurs sont reportées sur les graphes III-1 , III-2 et III-3 .

Pendant les essais de torsion le centre de gravité de la fondation subi un léger déplacement ; néanmoins ce mouvement associé est très faible (tableau III-2) et n'a aucune influence sur le calcul des moments ; cependant le bras de levier l' est compté à partir du centre de gravité de la fondation (fig III-6) .

Si x' est supérieur à l' , le déplacement est compté positivement

Si x' est inférieur à l' , le déplacement du centre de gravité de la fondation est compté négativement .

Tableau III - I : Cotes des centres de rigidités horizontale et de basculement par rapport à la base de la fondation

P	Modèle 60x60						Modèle 40 X 120						Modèle 60 X 120																							
	a/c = 1												a/c = 1/3						a/c = 3						a/c = 1/2						a/c = 2					
	0°	00°	0°0	00°	00°	00°	00°	00°	0°0	00°	00°	00°	00°	00°	0°0	00°	00°	00°	0°0	00°	00°	00°	00°	00°	0°0	00°	00°	00°	00°	00°	0°0	00°	00°	00°		
0	-	-0,34	-	-	-	-	-0,32	-0,32	-	-	-	-0,36	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,02	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
5	0,55	0,63	0,08	0,32	0,46	0,54	0,46	0,46	0,54	0,16	0,48	0,16	0,48	0,27	0,27	0,23	0,04	0,49	0,22	0,04	0,22	0,23	0,04	0,49	0,22	0,04	0,22	0,23	0,04	0,49	0,22	0,04	0,22			
10	2,41	2,91	0,50	0,86	0,70	0,46	0,70	0,70	0,46	-0,09	0,95	-0,09	0,95	0,55	0,55	0,85	0,30	-0,07	0,62	0,30	0,62	0,85	0,30	-0,07	0,62	0,30	0,62	0,85	0,30	-0,07	0,62	0,30	0,62			
15	4,09	3,70	0,39	4,38	5,05	0,47	5,05	5,05	0,47	5,02	0,14	5,02	0,14	4,73	4,73	4,64	0,11	4,67	0,06	0,11	0,06	4,64	0,11	4,67	0,06	0,11	0,06	4,64	0,11	4,67	0,06	0,11	0,06			
20	5,71	5,93	0,22	7,07	6,85	0,22	6,85	6,85	0,22	6,95	0,12	6,95	0,12	6,96	6,96	7,09	0,13	5,95	1,01	0,13	1,01	7,09	0,13	5,95	1,01	0,13	1,01	7,09	0,13	5,95	1,01	0,13	1,01			
25	8,89	9,07	0,19	7,92	7,97	0,09	7,97	7,97	0,09	8,20	0,22	8,20	0,22	7,89	7,89	7,99	0,00	6,97	0,92	0,00	0,92	7,99	0,00	6,97	0,92	0,00	0,92	7,99	0,00	6,97	0,92	0,00	0,92			
30	10,82	11,00	0,18	10,55	10,88	0,11	10,88	10,88	0,11	10,65	0,08	10,65	0,08	9,64	9,64	10,01	0,37	10,45	0,84	0,37	0,84	10,01	0,37	10,45	0,84	0,37	0,84	10,01	0,37	10,45	0,84	0,37	0,84			
35	12,55	13,08	0,46	12,12	13,10	0,98	13,10	13,10	0,98	12,41	0,29	12,41	0,29	11,91	11,91	11,77	0,14	11,87	0,94	0,14	0,94	11,77	0,14	11,87	0,94	0,14	0,94	11,77	0,14	11,87	0,94	0,14	0,94			
40	14,52	15,20	0,53	14,20	14,88	0,68	14,88	14,88	0,68	15,57	1,37	15,57	1,37	13,07	13,07	13,16	0,09	13,36	0,29	0,09	0,29	13,16	0,09	13,36	0,29	0,09	0,29	13,16	0,09	13,36	0,29	0,09	0,29			
45	15,17	16,16	0,99	14,84	14,79	0,09	14,79	14,79	0,09	14,27	0,58	14,27	0,58	14,64	14,64	14,51	0,43	14,17	0,47	0,43	0,47	14,51	0,43	14,17	0,47	0,43	0,47	14,51	0,43	14,17	0,47	0,43	0,47			
50	17,40	17,75	0,21	15,55	16,75	1,20	16,75	16,75	1,20	16,49	0,94	16,49	0,94	16,84	16,84	17,23	0,41	16,79	0,05	0,41	0,05	17,23	0,41	16,79	0,05	0,41	0,05	17,23	0,41	16,79	0,05	0,41	0,05			
55	19,48	19,73	0,25	18,24	18,71	0,47	18,71	18,71	0,47	18,31	0,07	18,31	0,07	17,99	17,99	17,79	0,80	17,44	0,85	0,80	0,85	17,79	0,80	17,44	0,85	0,80	0,85	17,79	0,80	17,44	0,85	0,80	0,85			
60	21,24	21,33	0,09	20,43	21,44	1,04	21,44	21,44	1,04	21,15	1,02	21,15	1,02	20,51	20,51	21,19	0,38	19,99	1,22	0,38	1,22	21,19	0,38	19,99	1,22	0,38	1,22	21,19	0,38	19,99	1,22	0,38	1,22			

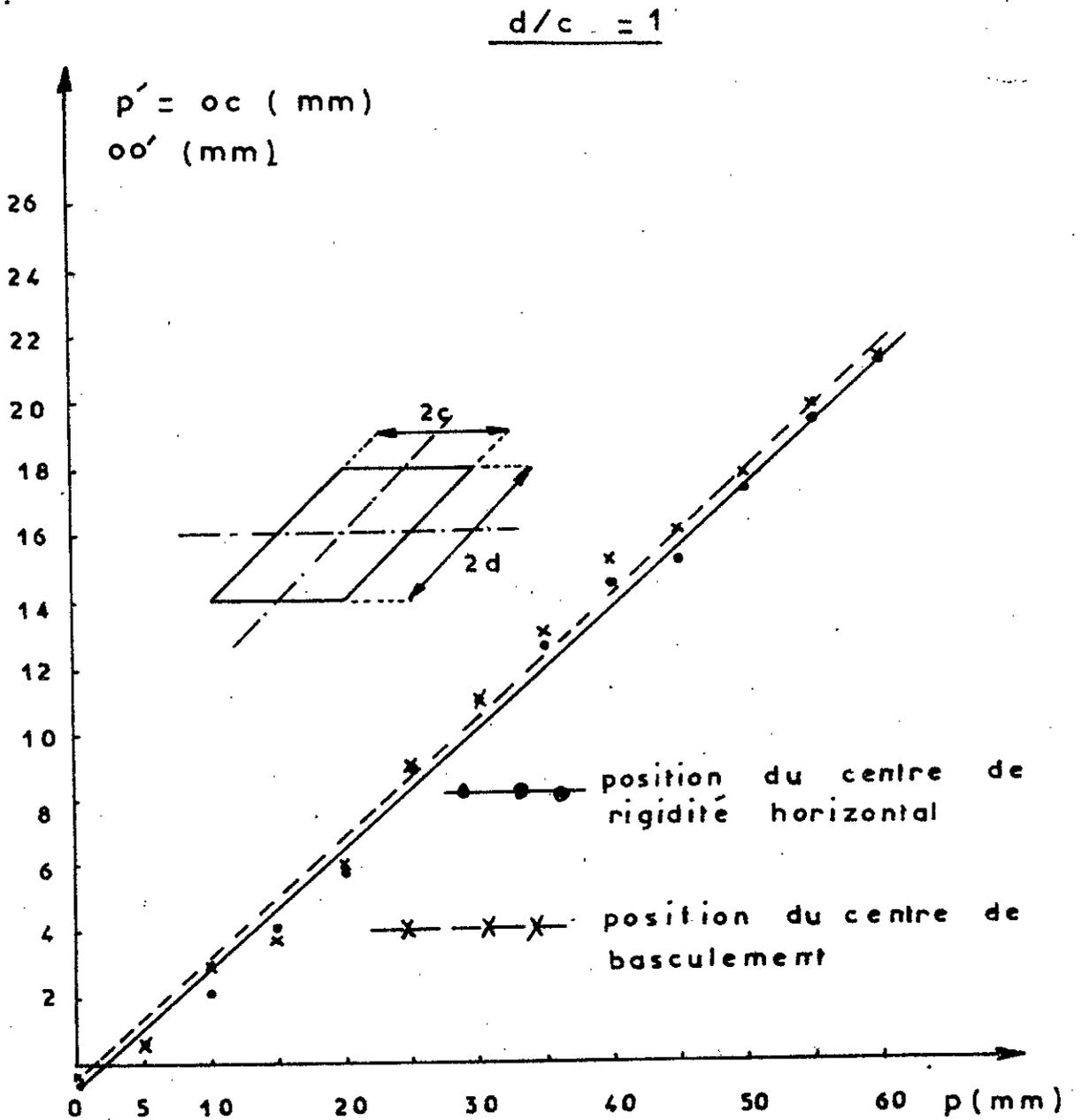


Fig III-I : Variation des centres de rigidité horizontale et de basculement en fonction de la profondeur (modèle 60 x 60)

Fig. III-2 : Variation des centres de rigidité horizontale et de basculement en fonction de la profondeur

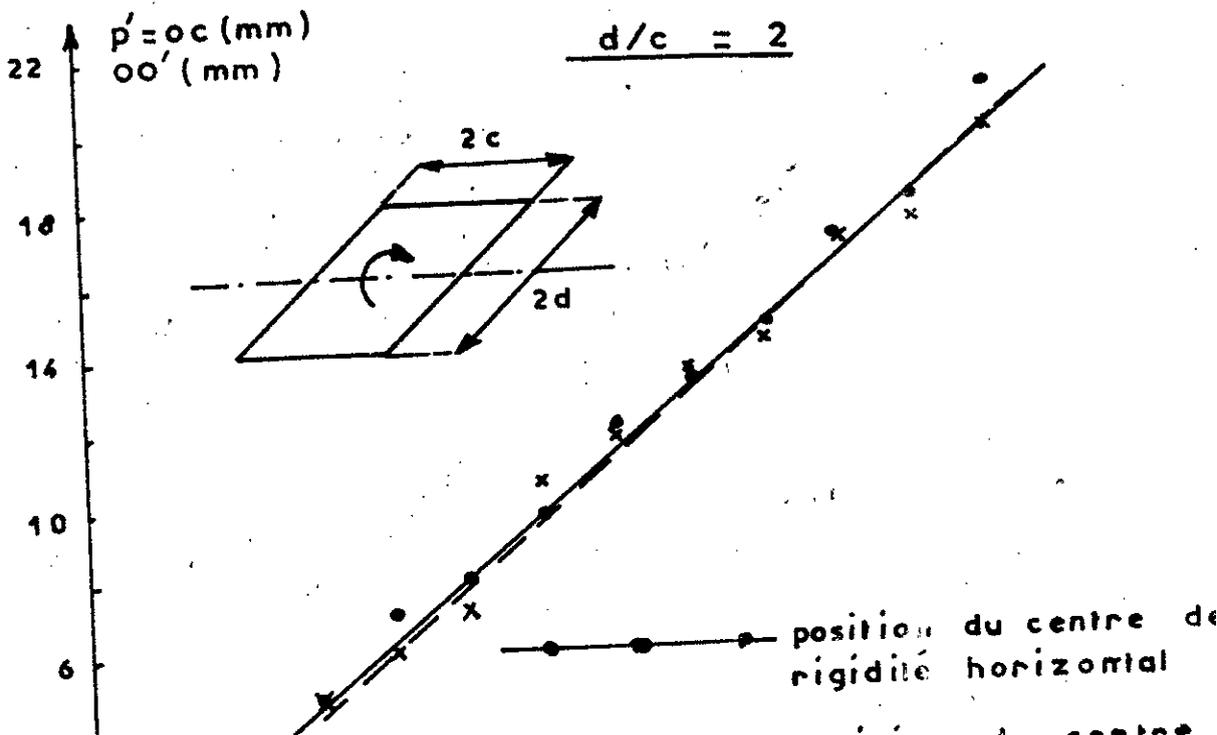
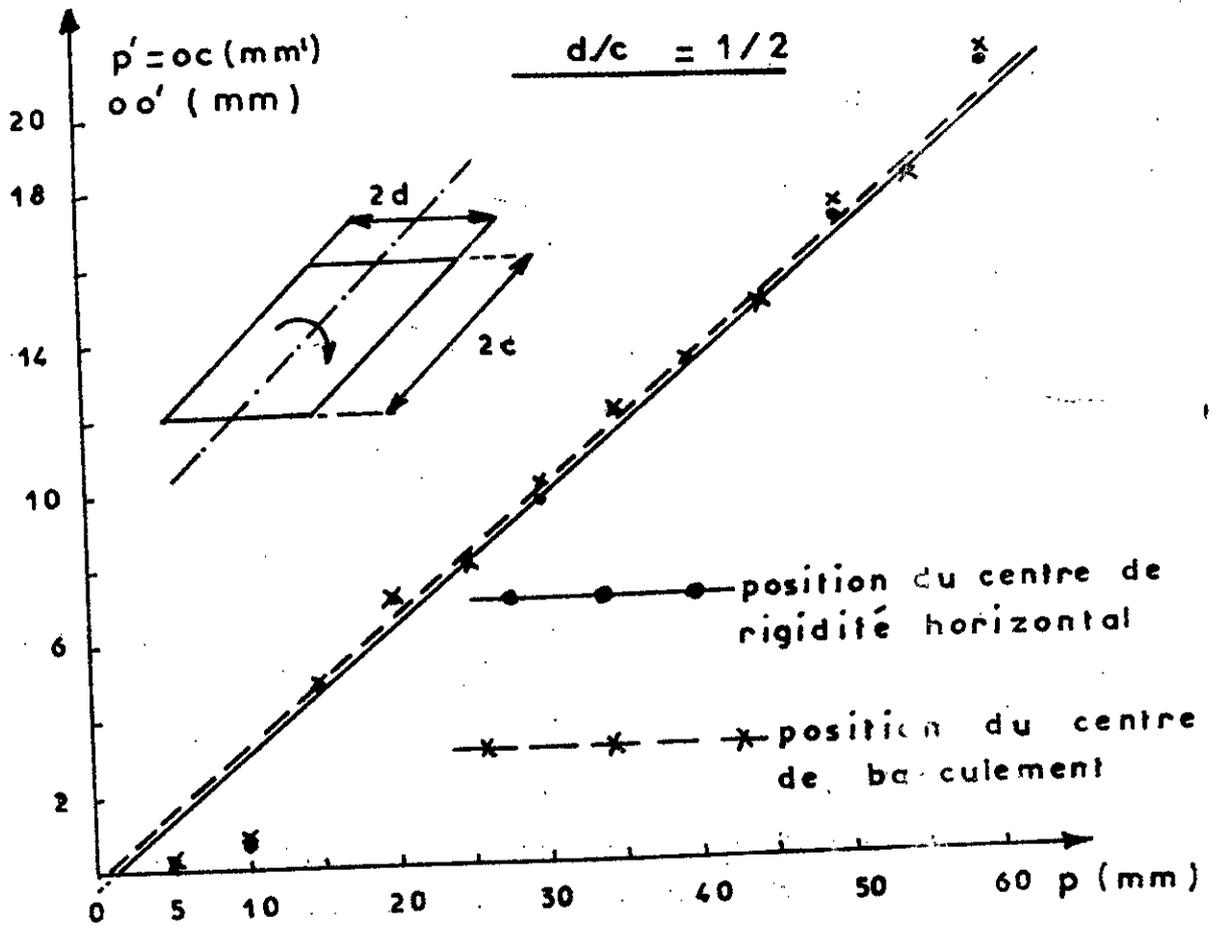


Fig III-3 Variation des centres de rigidité horizontale et de basculement en fonction de la profondeur
 $\underline{d/c = 1/3}$

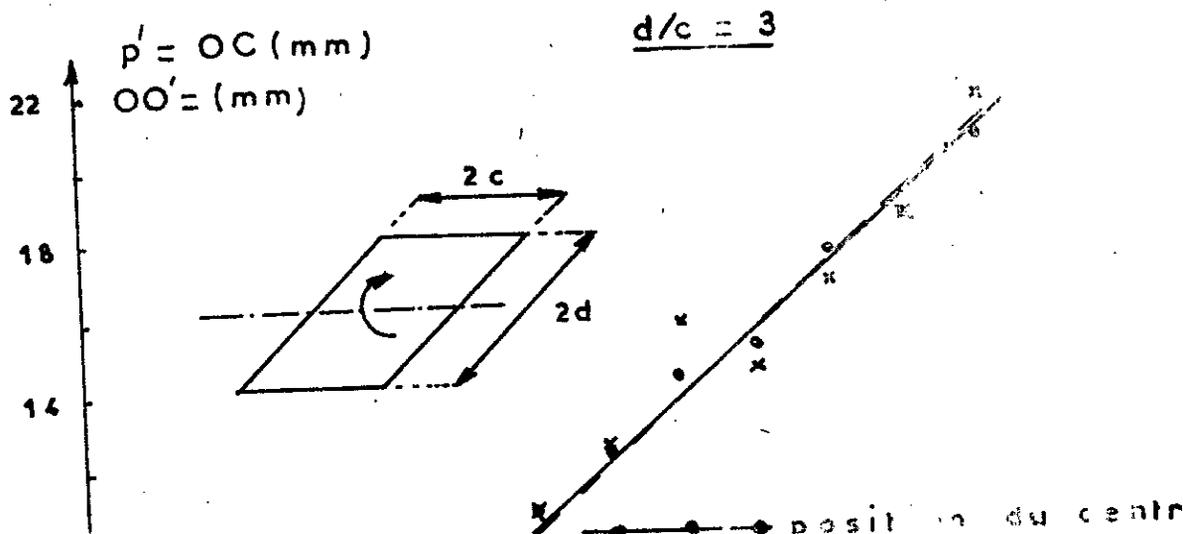
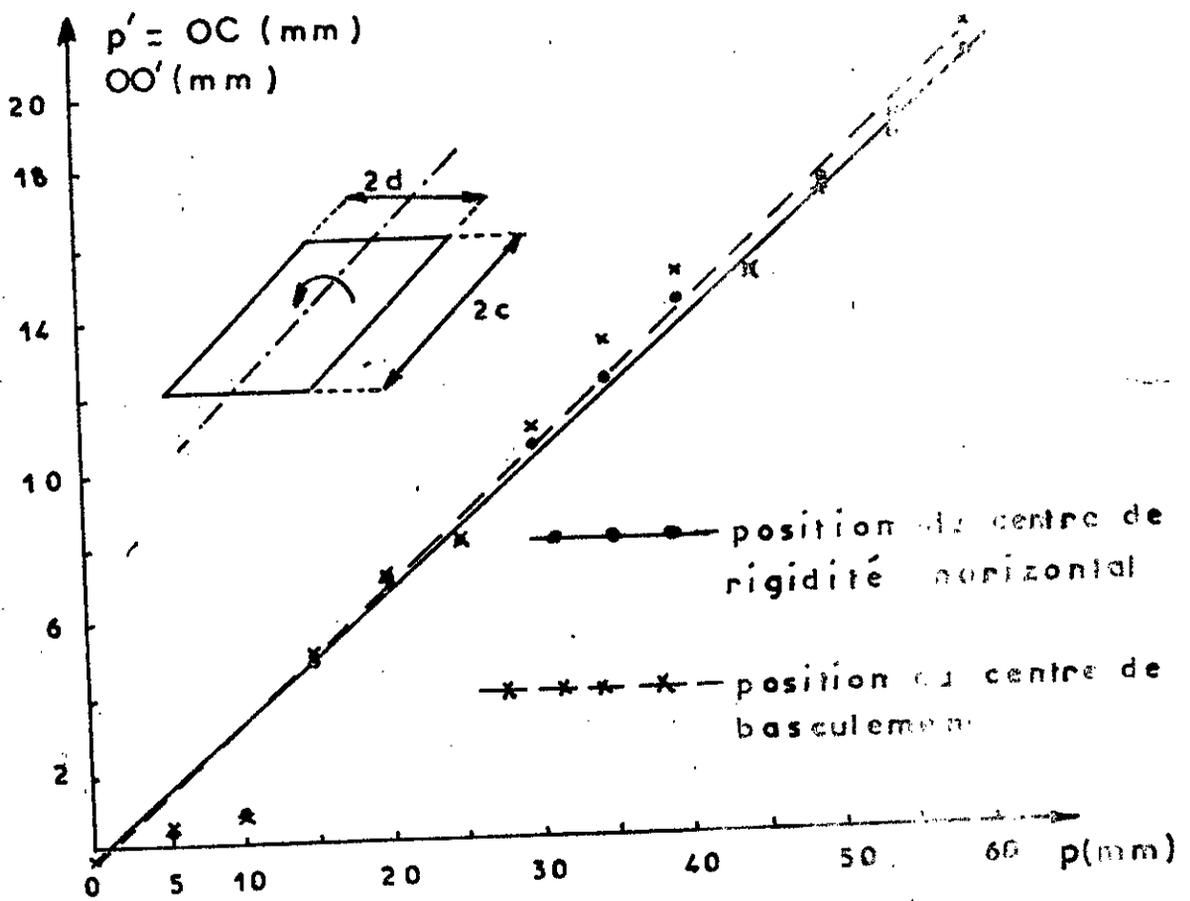


Tableau III-2 : Déplacements du centre de gravité de la
fondation (torsion)

P mm	modèle 60 x 60	modèle 40 x I20	modèle 60 x I20
0	0,18	- 0,13	- 0,05
5	- 0,21	- 0,17	- 0,32
10	0,04	0,15	- 0,15
15	- 0,06	0,04	- 0,15
20	0,15	0,04	- 0,15
25	0,01	0,05	0,01
30	- 0,11	0,05	- 0,20
35	0,16	0,01	- 0,06
40	- 0,09	- 0,24	0,20
45	0,20	- 0,06	0,00
50	- 0,04	0,22	- 0,11
55	- 0,17	0,32	0,05
60	- 0,06	- 0,32	- 0,13

CHAPITRE 4

ANALYSE DES RESULTATS ET

CALCUL DES RIGIDITES

CH IV ANALYSE DES RESULTATS ET CALCUL DES RIGIDITES

IV-1 . Introduction :

Comme indiqué (§ II-2) les essais sont effectués pour les trois types de fondations de dimensions de base (60 x 60 , 40 x 120 , 60 x 120) pour les profondeurs $p = 0$ à 60 mm et dans deux directions perpendiculaires .

Il est présenté dans ce chapitre les résultats découlant de l'expérience et leurs analyses .

IV-2 . Présentation des résultats :

Sous l'action de charges , la fondation subit une rotation; cette rotation provoque une déformation du milieu élastique , par suite il est mesuré des déplacements horizontaux .

Des moments de rotation M_{θ} et M_{ψ} , ainsi que les angles θ et ψ correspondant sont calculés en utilisant d'une part les relations (III-4-1 et III-4-2) , (III-5-1 et III-5-2) pour les mouvements de basculement et torsion respectivement , et les résultats de mesures provenant des essais de rotation d'autre part . Ces résultats de calcul et mesures sont résumés dans les tableaux en annexes " I " et " II " comme suit :

" A_{I-1}" à " A_{I-3}" }
" A_{II-1}" à " A_{II-3}" }

pour le modèle carré (60 x 60)

" A_{I-4}" à " A_{I-7}" }
" A_{II-4}" à " A_{II-6}" }

pour le modèle rectangulaire
(40 x 120)

Les essais effectués ont pour but d'étudier les déformations du milieu élastique en fonction des charges statiques appliquées au système .

Les déformations correspondent aux angles de rotation θ et ψ de la fondation autour des axes horizontaux et verticaux respectivement .

Les charges statiques exercent les moments de rotation M_θ et M_ψ pour les mouvements de " tangage et roulis " et " lacet " respectivement de la fondation .

Selon , le mouvement à étudier , la direction à considérer et le modèle utilisé ; la relation " moment-rotation " pour les profondeurs $p = 0$ à 60 mm est représentée par les graphes donnés en annexes " I " et " II " dans l'ordre suivant :

" A_{I-13} " à " A_{I-15} " pour les mouvements de roulis et tangage

" A_{II-10} " à " A_{II-11} " pour les mouvements de lacet

IV-3 . Analyse des résultats :

IV-3-I . Centre de basculement :

A une profondeur p d'un modèle de fondation donné , la position du centre de rigidité horizontale C est la même lorsque le mouvement de translation horizontale s'effectue dans deux directions perpendiculaires (33) .

Le tableau III-I montre que le basculement s'effectue au voisinage du centre de rigidité C avec un écart ne dépassant pas 1,22 mm

Deux cas se présentent :

- Le centre de basculement se situe au dessus du centre de rigidité C .
- Le centre de basculement se situe en dessous du centre de rigidité C .

Dans les deux cas le centre de rigidité horizontale subit un déplacement δ calculé avec la relation suivante :

$$\delta = 0'c \cdot \text{tg } \theta \quad (\text{IV-I})$$

Les essais ont été conduit pour les faibles déformations inférieures à 5 degrés d'où $\text{tg } \theta \leq 0,087$.

L'écart existant entre les centres de basculement et de rigidité en translation horizontale est inférieur à 1,5 mm (tableau III-I). Cependant le produit $0'c \cdot \text{tg } \theta$ donne des valeurs de δ inférieures à 0,13 mm.

De même en torsion un léger déplacement de la fondation s'est associé avec le mouvement de torsion ; dans cet essai les rotations sont également inférieures à 5 degrés et l'écart existant entre le centre de torsion et le centre de gravité de la fondation est inférieur à 0,3 mm (tableau III-2) ; ces valeurs donnent un déplacement de la fondation inférieur à 0,001 mm. Le bras de levier x' compté à partir du centre de gravité sera pris égal à 1' avec une erreur négligeable (fig III-6 b).

IV-3-2 . Moments-Rotations :

Les graphes " Moment - Rotation " présentés en annexes " I " et " II " sont donnés sans points expérimentaux pour éviter des confusions vu le rapprochement des valeurs expérimentales. Cependant il est présenté ci-après cette variation avec les points expérimentaux pour les profondeurs $p = 0, 30$ et 60 mm, et pour les trois types de fondations utilisées comme l'indiquent les graphes (fig IV-1 et IV-2).

Les points expérimentaux sont alignés avec une très faible dispersion (1%) ; la courbe moyenne ainsi représentée, passant prati-

$d/c = 1$

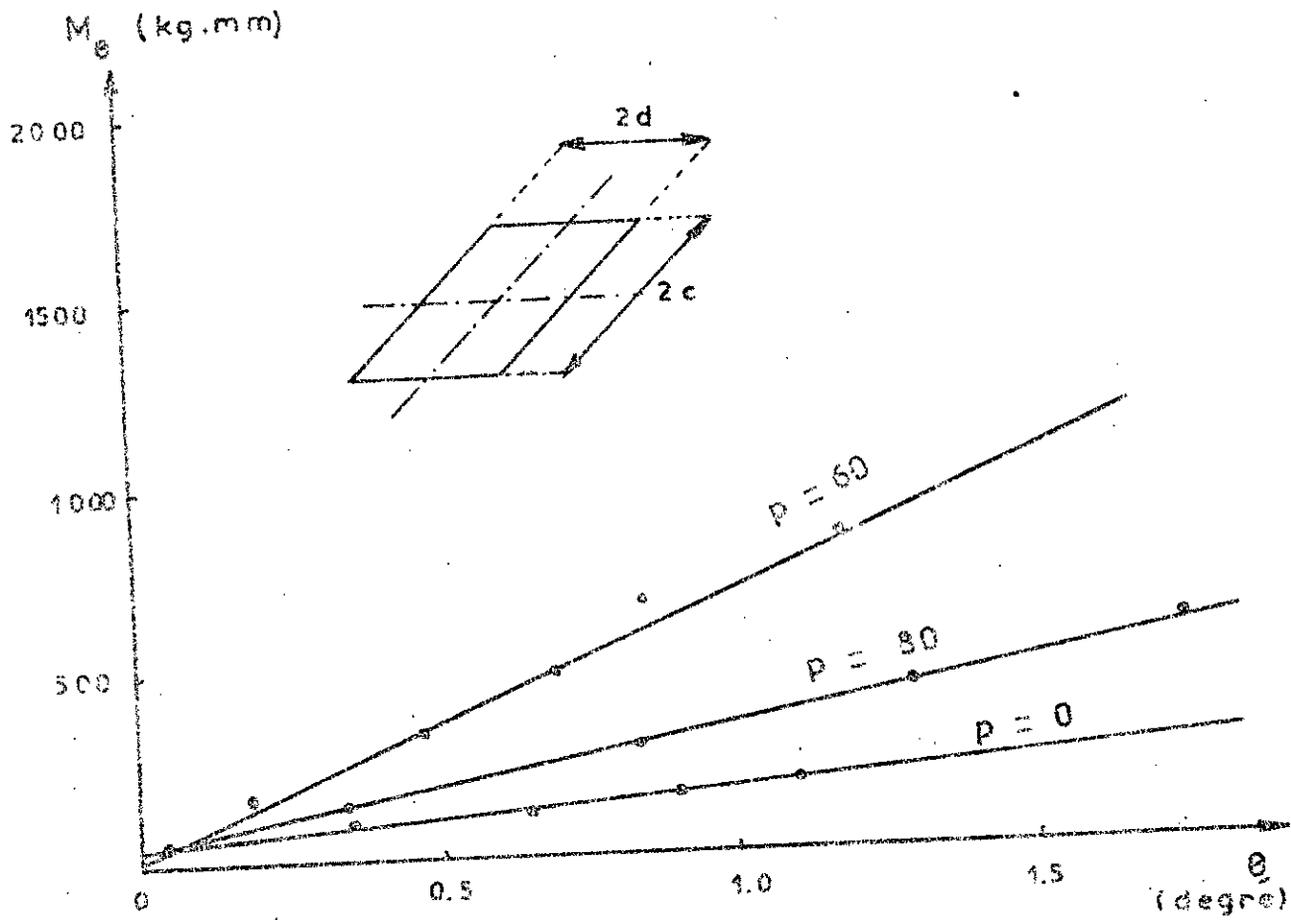
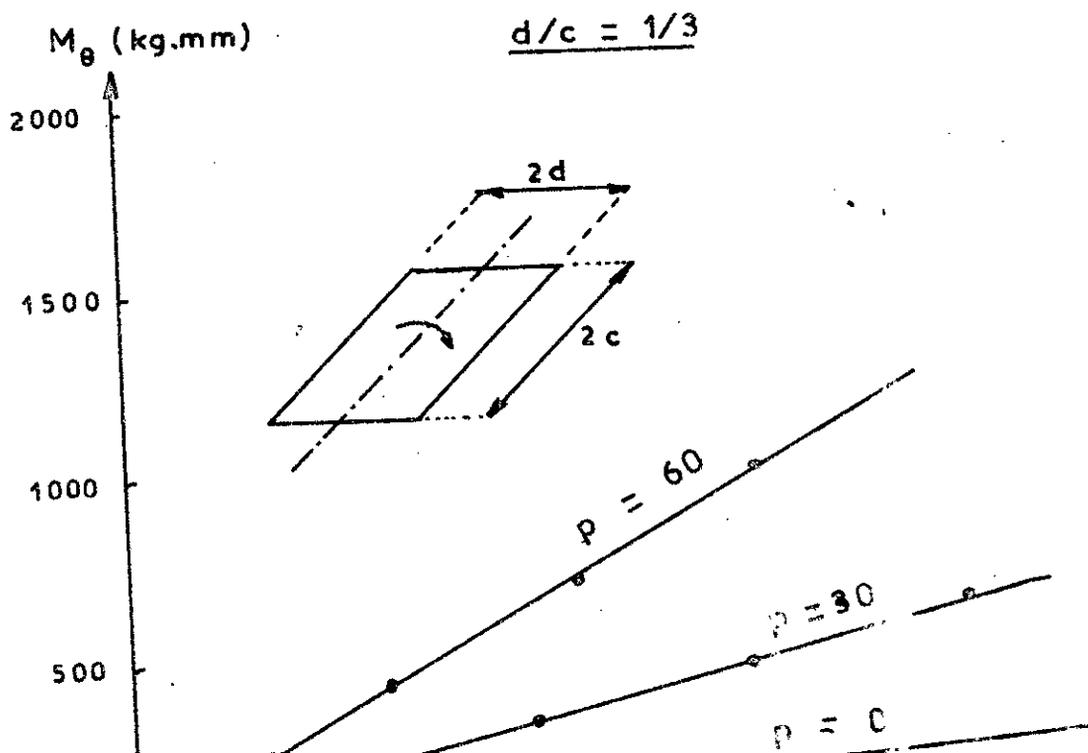
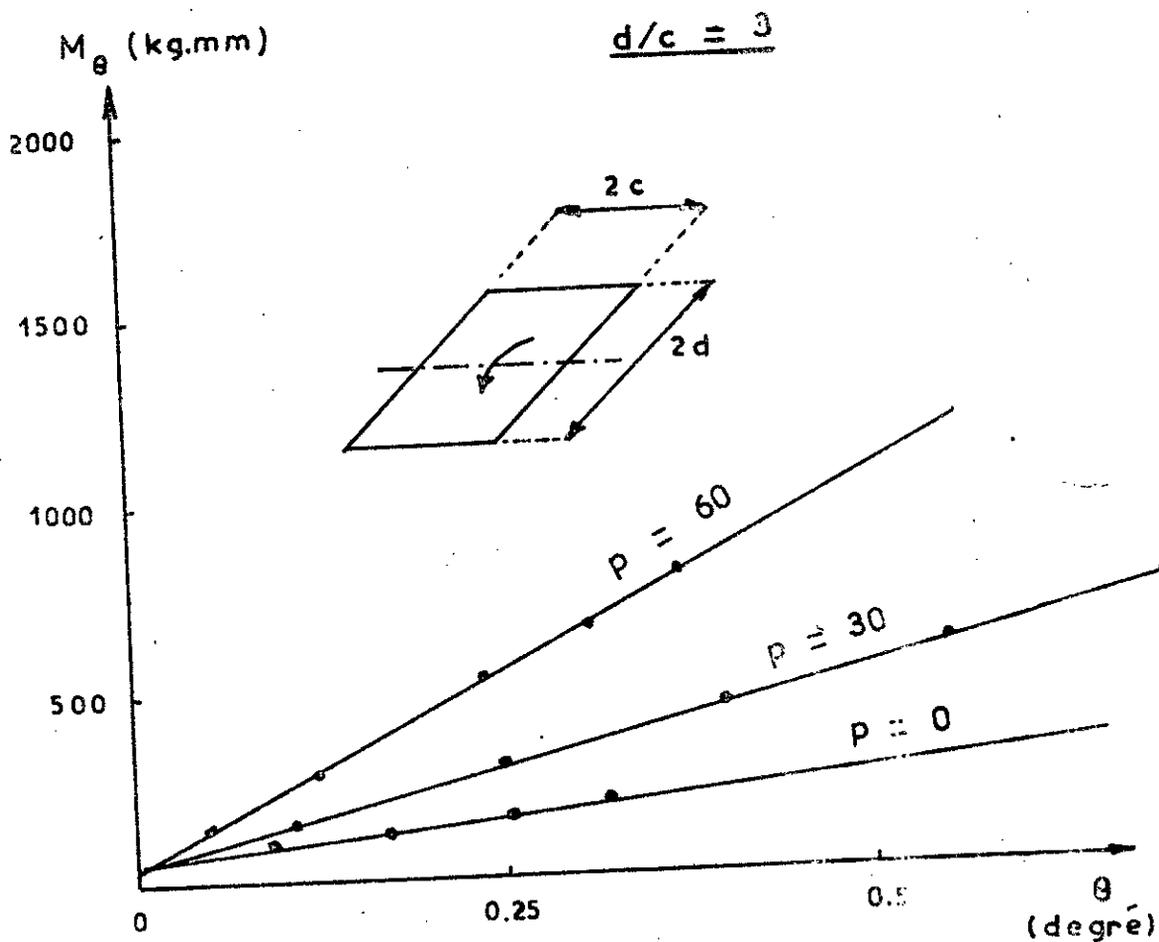
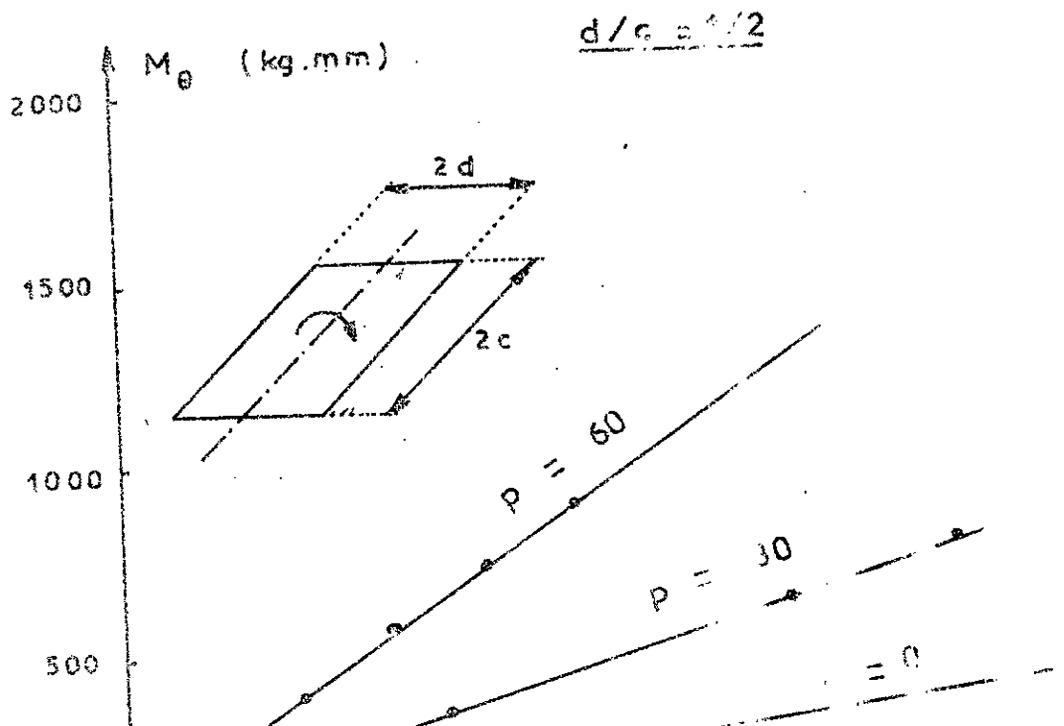
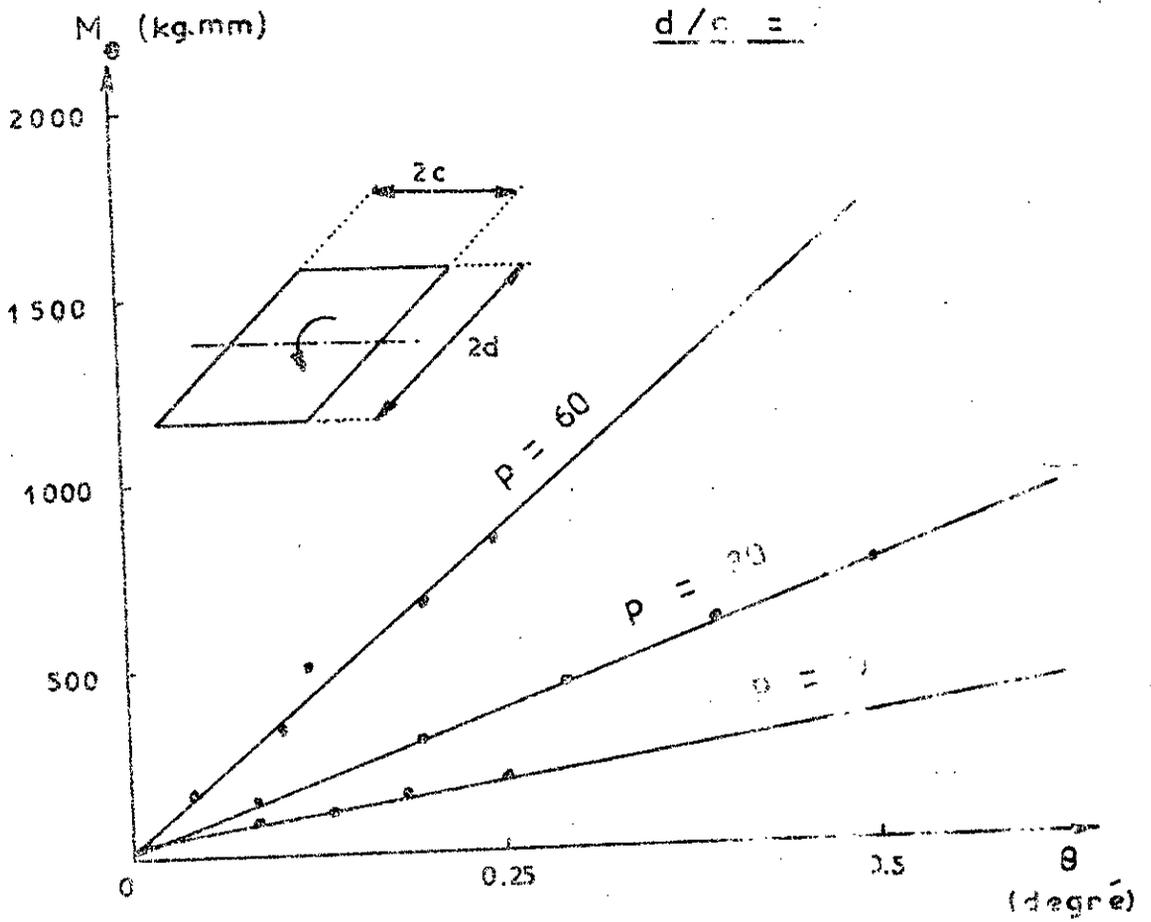


fig IV-1 : Moment de basculement en fonction de l'angle
modèle 60x60





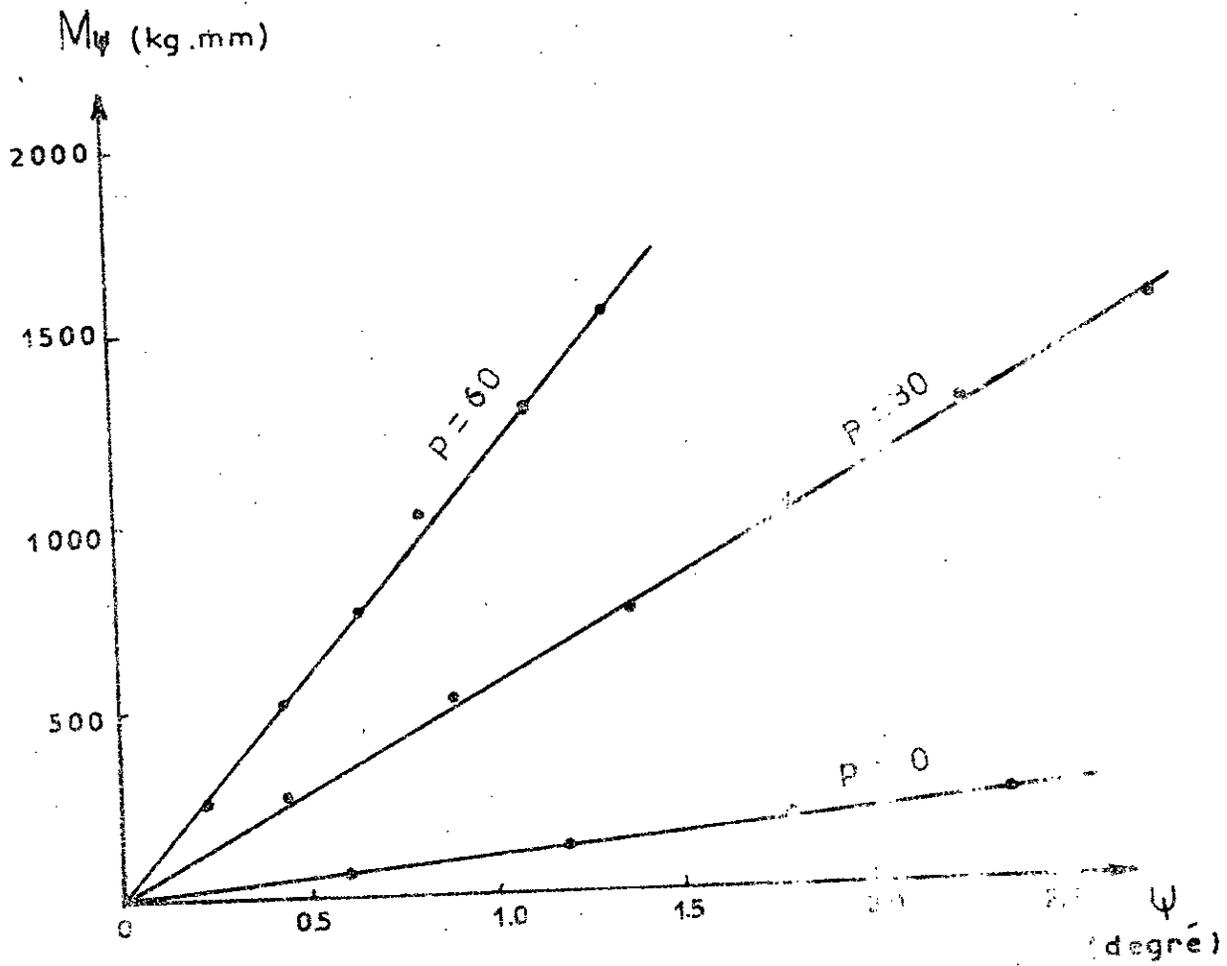
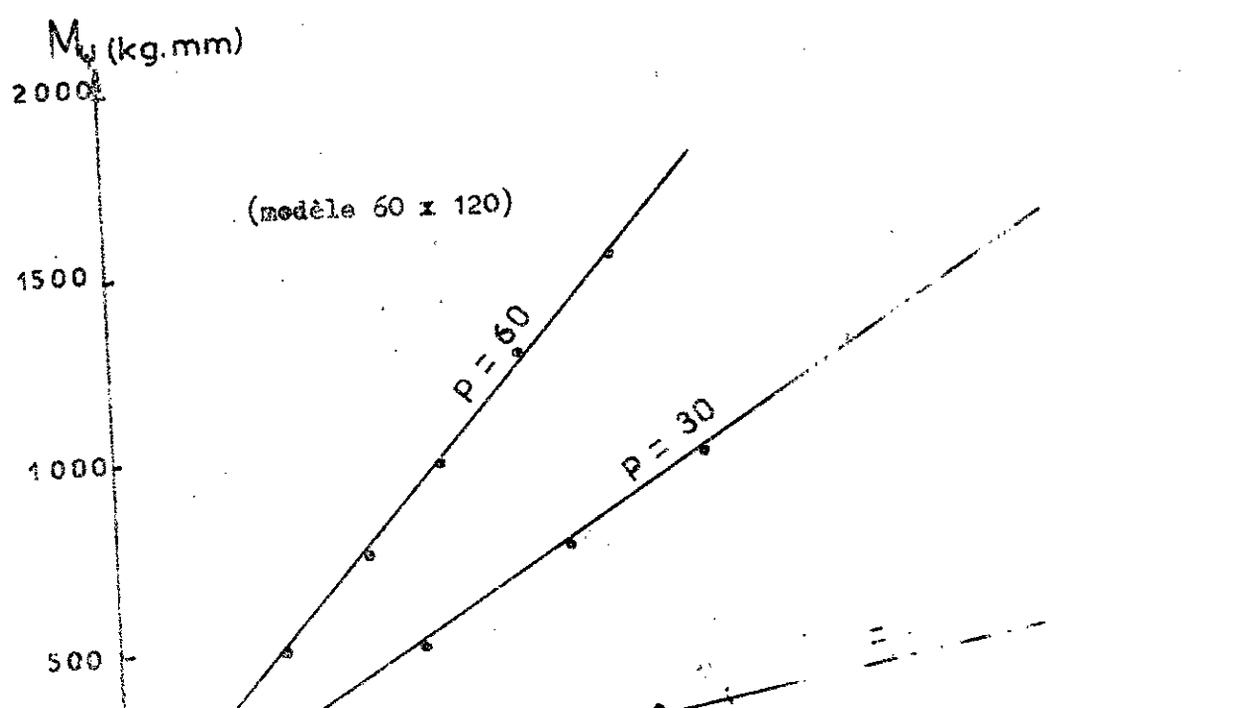
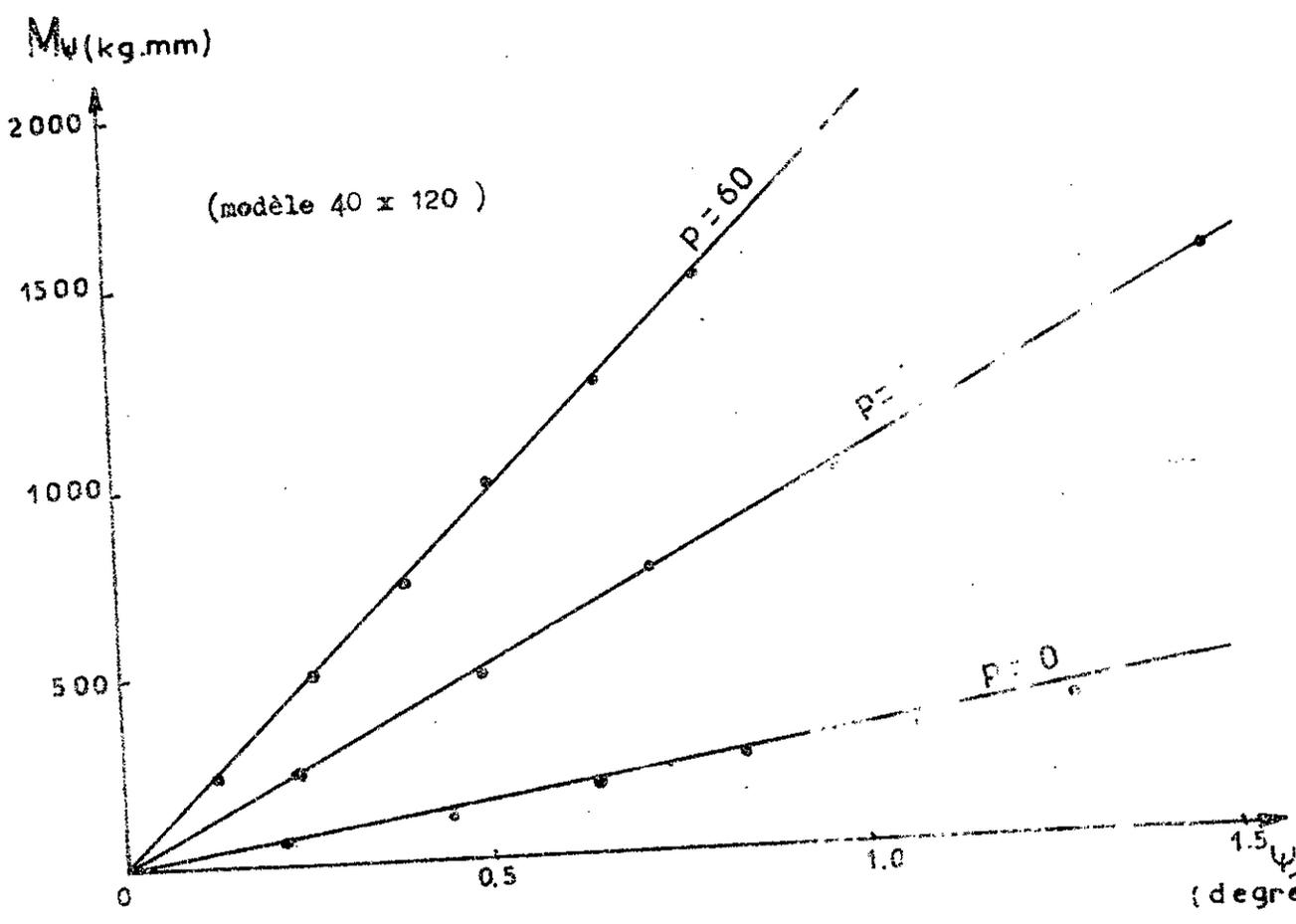


Fig IV-2 a: Moment de torsion en fonction de l'angle.
(modèle 60 x 60)



k_{θ} et k_{ψ} représentent les rigidités en rotation par rapport à un axe horizontal et vertical respectivement .

Ces rigidités ou constantes de rappel représentent les coefficients directeurs α_{θ} et α_{ψ} des droites $M_{\theta} = f(\theta)$ et $M_{\psi} = f(\psi)$; elles sont données par les relations suivantes soient :

$$\alpha_{\theta} = \frac{M_{\theta}}{\theta} \quad (IV-3)$$

$$\alpha_{\psi} = \frac{M_{\psi}}{\psi} \quad (IV-4)$$

Les valeurs des rigidités en rotation sont résumées dans le tableau IV-I pour les profondeurs $p = 0$ à 60 mm et pour chaque type de fondation .

On remarque que , les rigidités en torsion augmentent avec la profondeur et la surface de base de la fondation ; au basculement , elles augmentent de la même façon qu'en torsion et de plus elles varient avec l'inertie de la fondation selon le sens du mouvement à considérer .

En basculement la rigidité augmente plus rapidement quand le mouvement s'effectue dans le sens de la grande inertie , comparé à celui effectué dans le sens de la petite inertie .

Cette étude a pour but d'établir les lois de variation des rigidités du sol pour la fondation rectangulaire en fonction de la profondeur ; par suite il est utilisé les grandeurs sans dimensions suivantes :

$\frac{k_{\theta}}{k_{\theta_0}}$, $\frac{k_{\psi}}{k_{\psi_0}}$: rigidités du sol en profondeur rapportées aux rigidités en surface du sol de la fondation

Tableau : IV-2

Valeurs des rigidités en profondeur rapportées
aux rigidités en surface pour le basculement en fonction
du coefficient d'enfoncement χ_0

Modèle 40 x 120 d/c = 1/3		Modèle 60 x 120 d/c = 1/2		Modèle 60 x 60 d/c = 1		Modèle 60 x 120 d/c = 2		Modèle 40 x 120 d/c = 3	
χ_0	$\frac{k_0}{k_{e_0}}$	χ_0	$\frac{k_0}{k_{e_0}}$	χ_0	$\frac{k_0}{k_{e_0}}$	χ_0	$\frac{k_0}{k_{e_0}}$	χ_0	$\frac{k_0}{k_{e_0}}$
0,000	1,00	0,000	1,00	0,000	1,00	0,000	1,00	0,000	1,00
0,125	1,72	0,083	1,153	0,083	1,176	0,042	1,220	0,042	1,178
0,250	1,920	0,166	1,304	0,166	1,518	0,083	1,440	0,083	1,333
0,375	2,320	0,250	1,517	0,250	1,771	0,125	1,710	0,125	1,600
0,500	2,490	0,333	1,698	0,333	2,104	0,166	1,950	0,166	1,777
0,625	2,800	0,416	2,000	0,416	2,482	0,208	2,210	0,208	2,044
0,750	3,280	0,500	2,217	0,500	2,774	0,250	2,450	0,250	2,355
0,875	3,720	0,583	2,480	0,583	3,195	0,293	2,860	0,292	2,666
1,000	4,280	0,666	2,870	0,666	3,363	0,333	3,130	0,333	2,999
1,125	4,800	0,750	3,216	0,750	4,203	0,375	3,450	0,375	3,311
1,250	5,600	0,833	3,700	0,833	4,369	0,416	3,800	0,416	3,720
1,375	6,160	0,916	4,220	0,916	5,164	0,458	4,200	0,458	4,176
1,500	7,280	1,000	4,740	1,000	5,718	0,500	4,700	0,500	4,720

Tableau : IV-3 Valeurs des rigidités en profondeur rapportées aux rigidités en surface à la torsion en fonction du coefficient d'enfoncement χ_{ψ}

Modèle 40 x I20		Modèle 60 x I20		Modèle 60 x 60	
χ_{ψ}	$\frac{k_{\psi}}{k_{\psi_0}}$	χ_{ψ}	$\frac{k_{\psi}}{k_{\psi_0}}$	χ_{ψ}	$\frac{k_{\psi}}{k_{\psi_0}}$
0,00	1,00	0,00	1,00	0,00	1,00
0,07	1,19	0,06	1,50	0,08	1,66
0,14	1,50	0,12	1,89	0,17	2,50
0,22	1,87	0,18	2,27	0,25	3,18
0,29	2,32	0,24	2,65	0,33	3,86
0,36	2,65	0,29	3,10	0,42	4,75
0,43	3,15	0,35	3,45	0,50	5,64
0,51	3,57	0,41	3,88	0,58	6,40
0,58	3,95	0,47	4,33	0,67	7,51
0,65	4,38	0,53	4,87	0,75	8,28
0,72	4,84	0,59	5,31	0,83	9,17
0,79	5,50	0,65	5,67	0,92	10,66
0,87	5,83	0,71	6,19	1,00	11,82

Les rapports k_{θ}/k_{θ_0} et k_{ψ}/k_{ψ_0} en fonction des coefficients d'enfoncement respectifs sont donnés par les tableaux IV-2 et IV-3 ; leur variation est représentée par les graphes (fig IV-3 et IV-4) ; les courbes ainsi obtenues sont des paraboles d'équation :

$$\frac{k}{k_0} = A \chi^2 + B \chi + I \quad (IV-5)$$

Les coefficients A et B donnés à titre indicatif aux tableaux IV-4 a et IV-4 b varient considérablement d'un modèle à l'autre par suite de la dispersion physique des modèles ; dans le but d'avoir une loi unique, ces paraboles peuvent être approchées par des droites jusqu'à un enfoncement de 0,5, l'erreur faite sur ces lois approchées pour une profondeur modérée correspondant à un enfoncement inférieur à 0,5 est de l'ordre de 5%.

On remarque que jusqu'à un enfoncement de 0,5 les droites d'approximation passent pratiquement par tous les points comme l'indiquent les figures IV-5 et IV-6.

Les équations de ces droites sont résumées dans le tableau IV-4 ci-après :

Tableau IV-4 : Equations des droites d'approximation

d/c	Basculement	Torsion
I/2	$\frac{k_{\theta}}{k_{\theta_0}} = 2,4 \chi_{\theta} + I \quad (IV-6 a)$	$\frac{k_{\psi}}{k_{\psi_0}} = 6,6 \chi_{\psi} + I \quad (IV-7 a)$
2	$\frac{k_{\theta}}{k_{\theta_0}} = 6,4 \chi_{\theta} + I \quad (IV-6 b)$	
I/3	$\frac{k_{\theta}}{k_{\theta_0}} = 3,34 \chi_{\theta} + I \quad (IV-6 c)$	$\frac{k_{\psi}}{k_{\psi_0}} = 4,6 \chi_{\psi} + I \quad (IV-7 b)$
3	$\frac{k}{k} = 6,34 + I \quad (IV-6 d)$	
I	$\frac{k_{\theta}}{k_{\theta_0}} = 3,36 \chi_{\theta} + I \quad (IV-6 e)$	$\frac{k_{\psi}}{k_{\psi_0}} = 8,6 \chi_{\psi} + I \quad (IV-7 c)$

$d/c = 1$

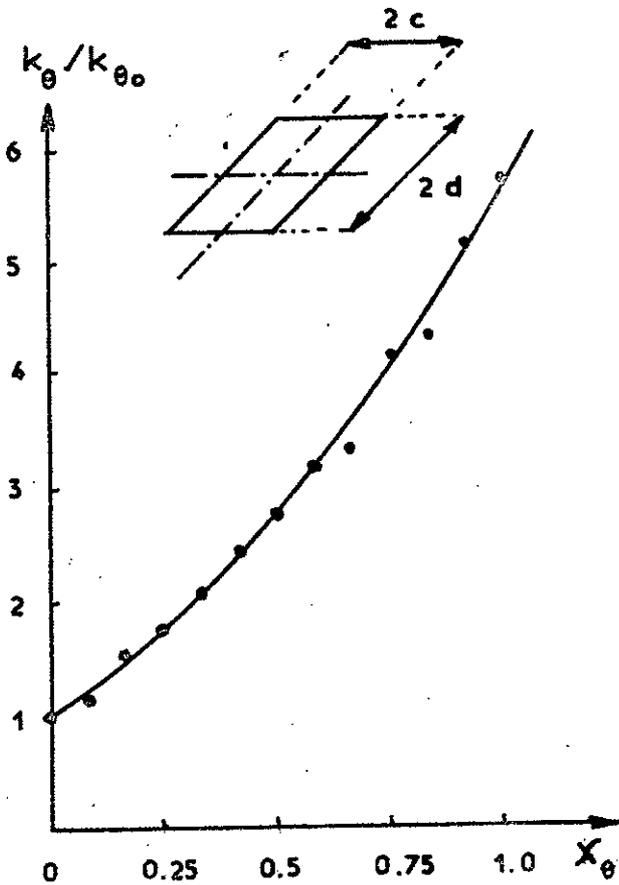


Fig : IV-3 a

Rigidité rapportée à la rigidité en surface en fonction de l'enfouissement (Basculement).

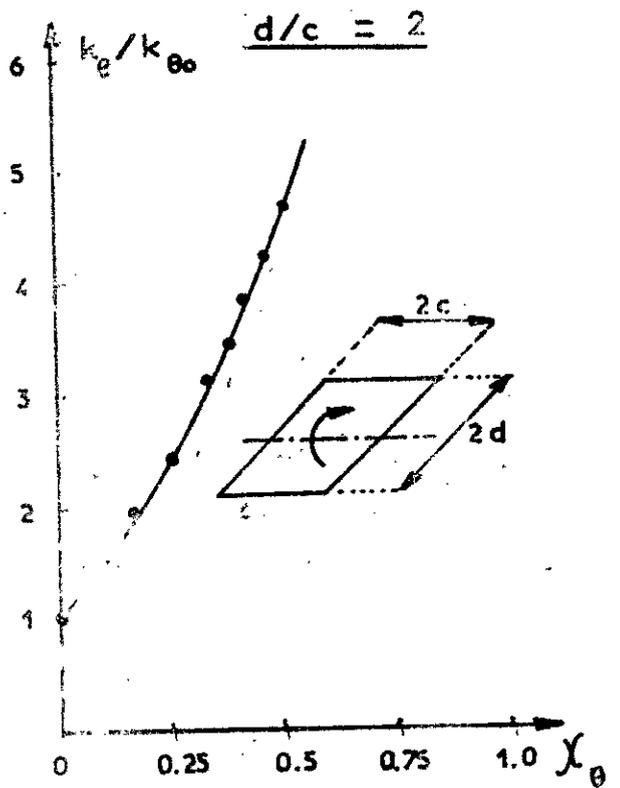
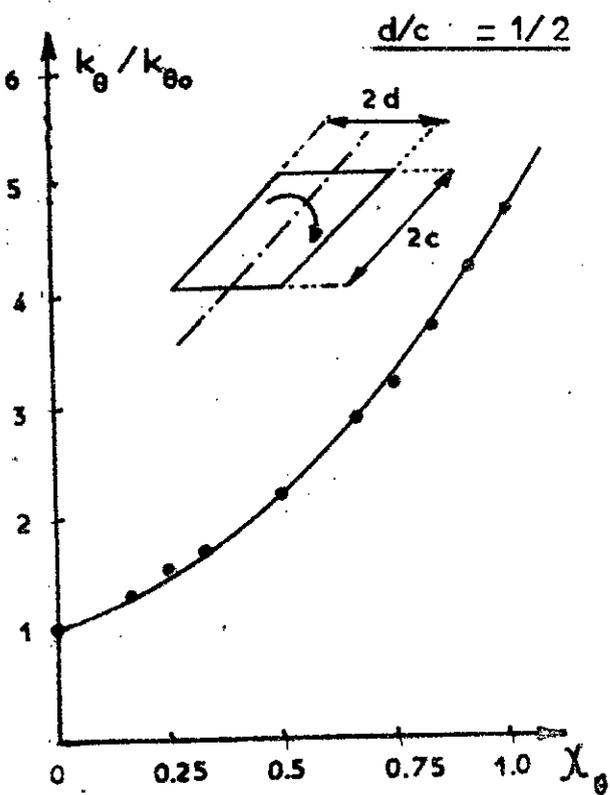
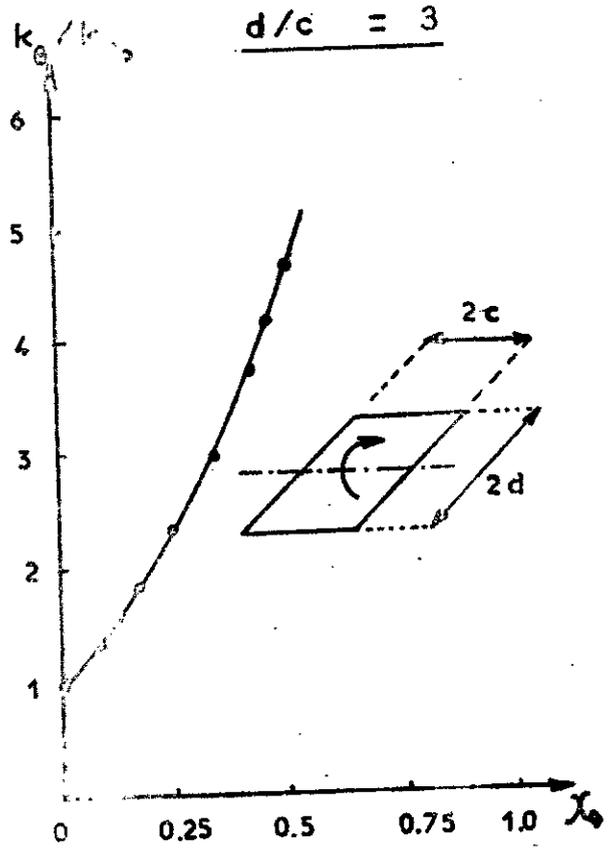
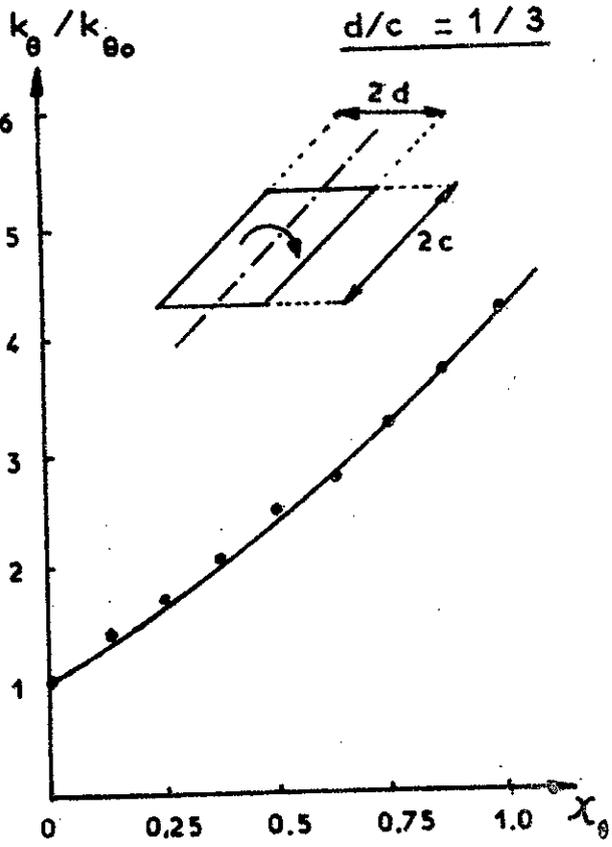
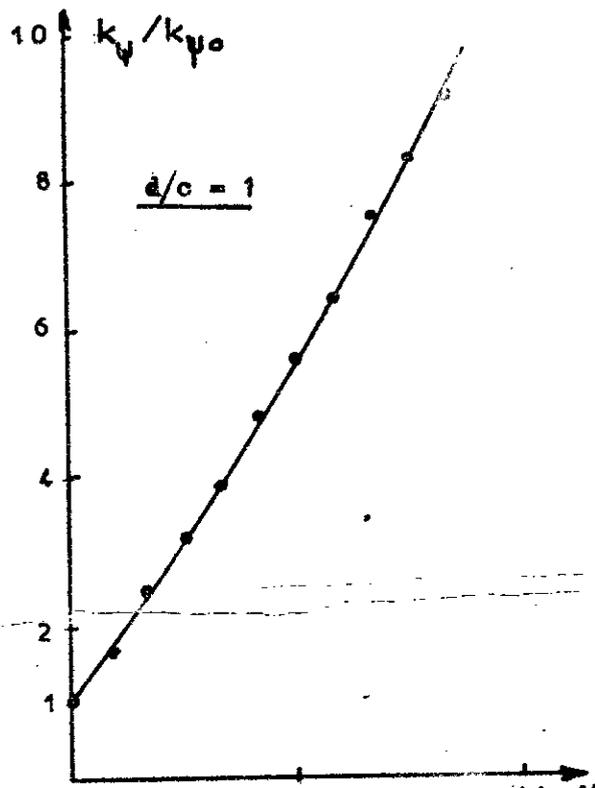
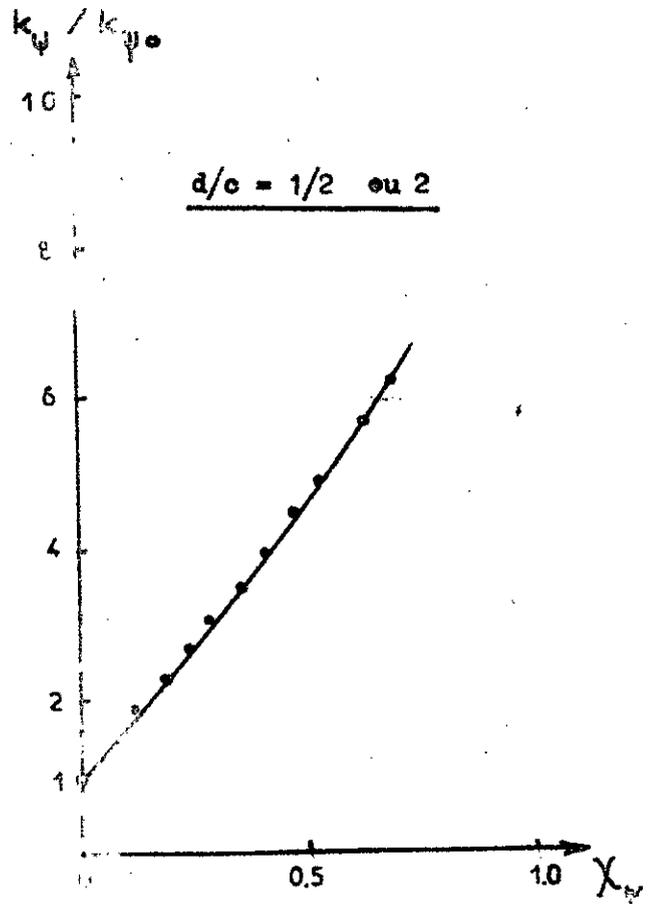
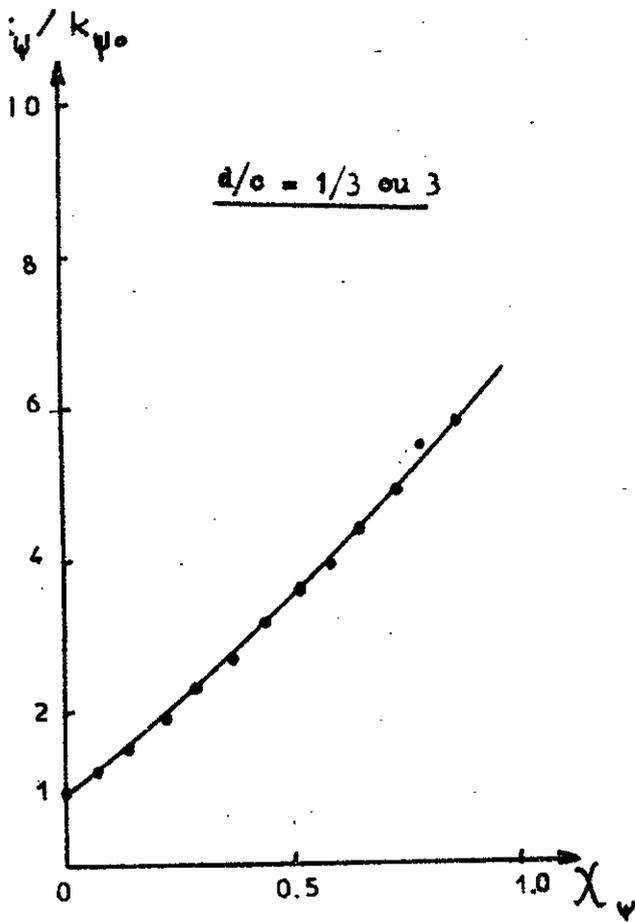


Fig: IV-3 b



avec

$\chi_{\theta} = \frac{p}{2d}$: coefficient d'enfoncement pour le mouvement de basculement

$\chi_{\psi} = \frac{p}{\sqrt{4cd}}$: coefficient d'enfoncement pour le mouvement de torsion

$2d$: dimension de la fondation parallèle au mouvement

p : profondeur de la fondation

Les équations IV-6 et IV-7 représentent les lois de variation des rigidités du sol en fonction de l'enfoncement ; cette variation est donnée pour chaque modèle de fondation et sens du mouvement de rotation . Afin d'établir une loi unique de variation des rigidités pouvant s'appliquer aux fondations rectangulaires enterrées , il est étudié la variation des coefficients directeurs α_{θ} et α_{ψ} des droites d'approximation (fig IV-5 et IV-6) en fonction du rapport de dimensions d/c comme l'indiquent les figures IV-7 et IV-8 . On peut proposer les lois empiriques suivantes :

$$\alpha_{\theta} = 1,6 \frac{d}{c} + 2,3 \quad (\text{IV-8})$$

$$\alpha_{\psi} = - 2,7 \left(\frac{d}{c} + \frac{c}{d} \right) + 13,6 \quad (\text{IV-9})$$

pour $0 \leq \chi_{\theta} ; \chi_{\psi} \leq 0,5$

En basculement α_{θ} augmente linéairement avec le rapport

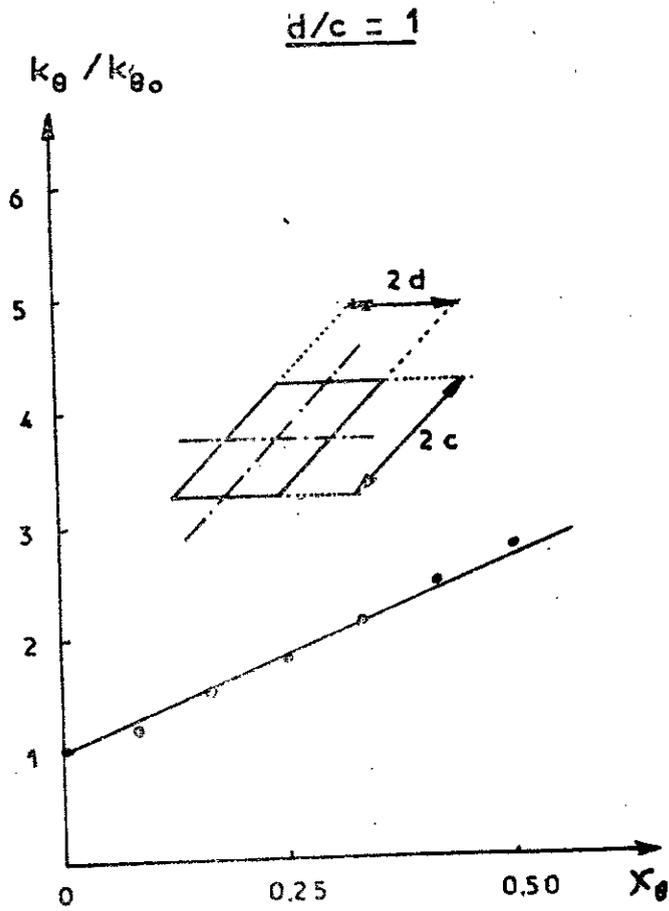
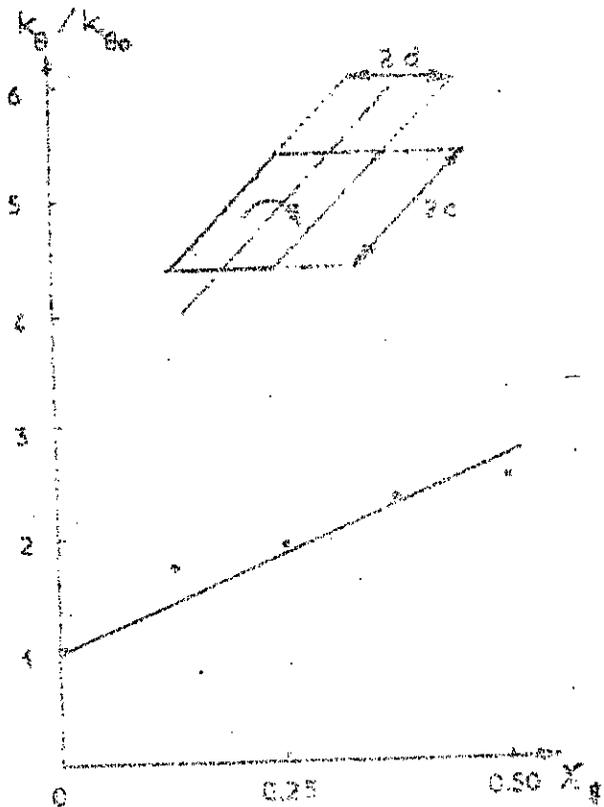


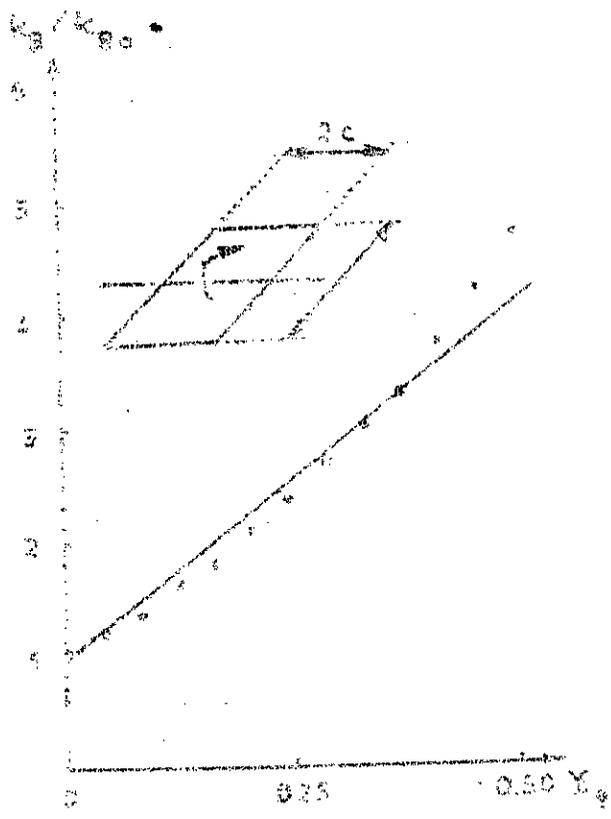
Fig IV-5 a

Droite d'approximation (basculement)

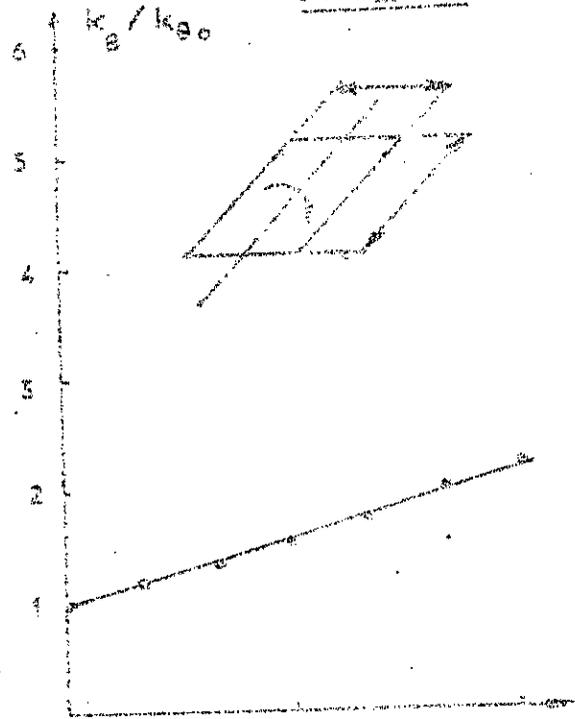
$d/c = 1/3$



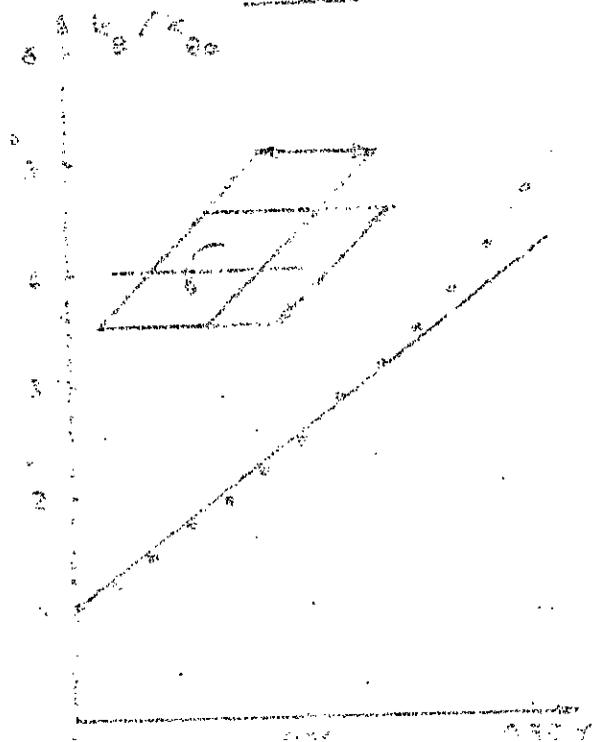
$d/c = 3$



$d/c = 1/2$



$d/c = 2$



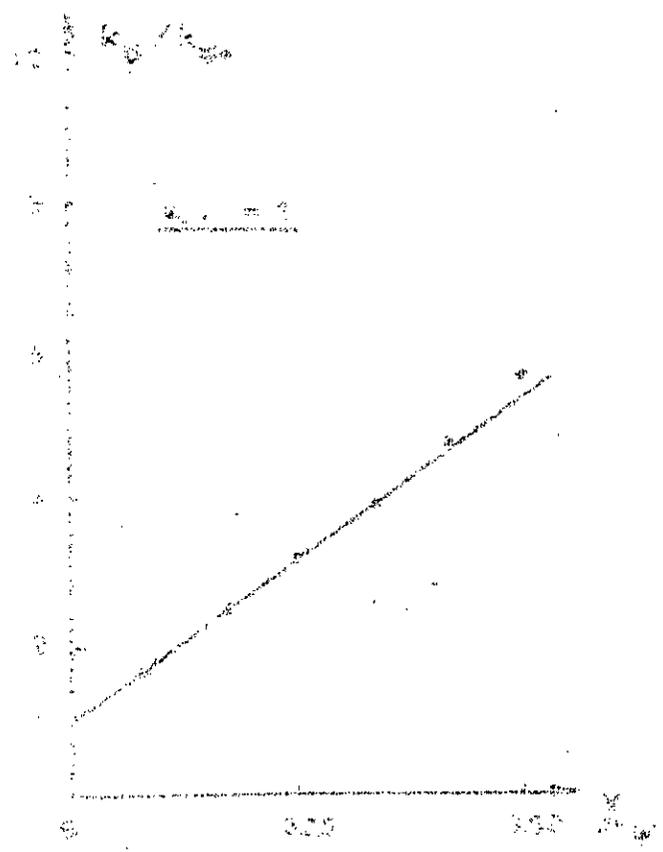
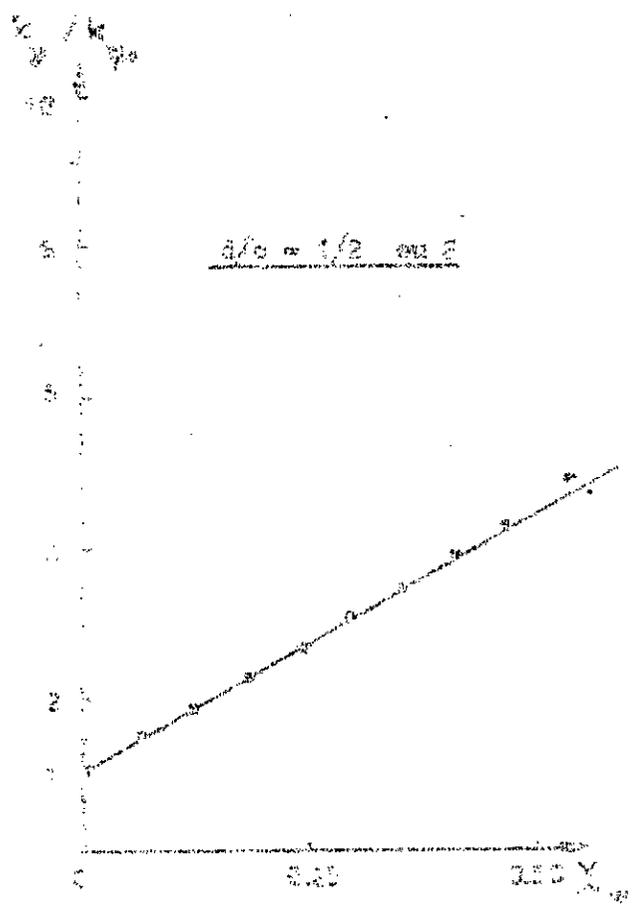
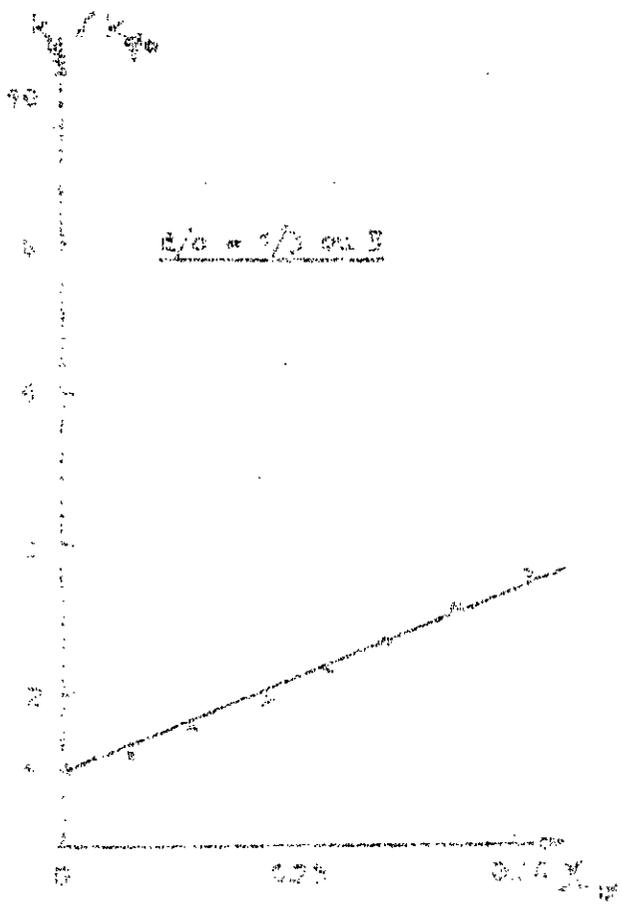
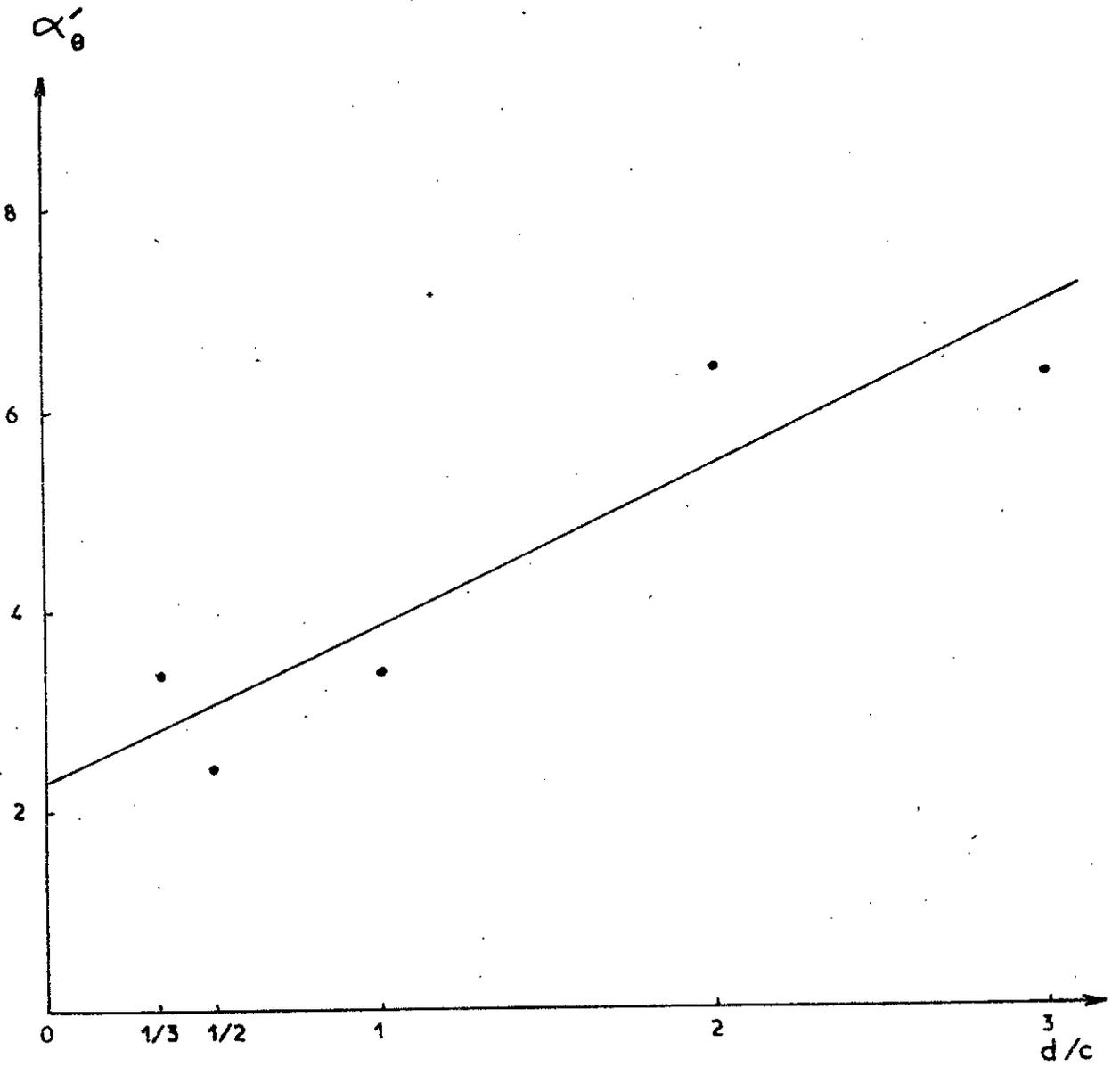


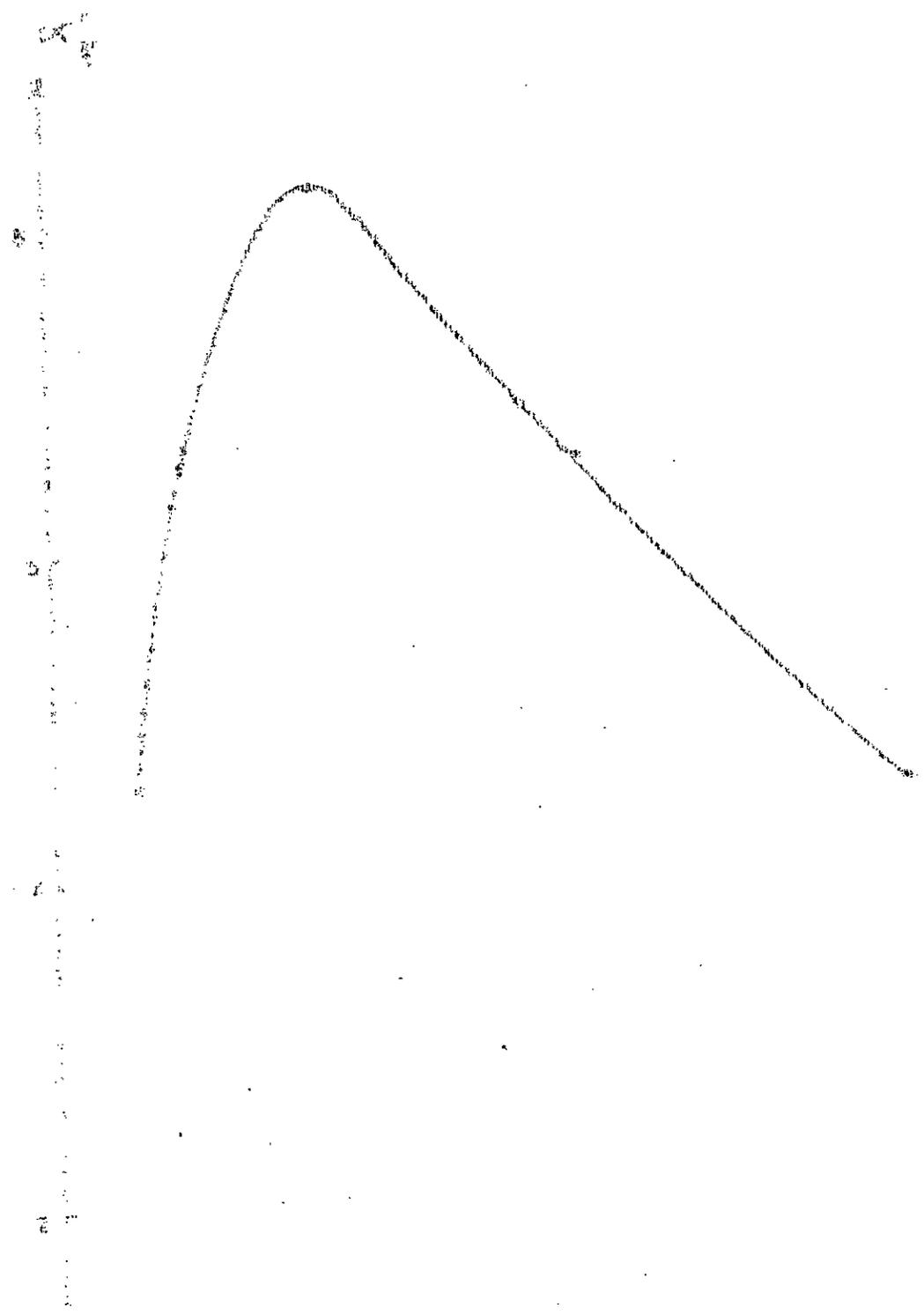
Fig. 10. Effect of approximation (continued)

Fig IV-7 : Variation des coefficients directeurs des droites d'approximation pour le basculement en fonction du rapport d/c



100

100



En torsion le coefficient directeur α'_ψ croit avec le rapport d/c en passant par un maximum pour $d/c = 1$; la dispersion des points expérimentaux par rapport à la formule proposée est inférieure à 1 % .

Les équations IV-5 et IV-6 données dans le tableau IV-4 montrent que les rigidités en rotation augmentent selon une loi linéaire en fonction du coefficient d'enfoncement χ , et admettent une équation de la forme soit :

$$\frac{k}{k_0} = \alpha' \chi + 1 \quad (IV-10)$$

En substituant les équations IV-8 et IV-9 dans l'équation IV-10, on obtient ainsi les lois de variation des rigidités du sol pour les fondations rectangulaires en fonction du coefficient d'enfoncement , et des dimensions de la fondation soient :

Pour le basculement

$$\frac{k_\theta}{k_{\theta_0}} = \left(1,6 \frac{d}{c} + 2,3 \right) \chi_\theta + 1 \quad (IV-11)$$

avec $\chi_\theta = \frac{p}{2d}$

Pour la torsion :

$$\frac{k_\psi}{k_{\psi_0}} = \left[- 2,7 \left(\frac{d}{c} + \frac{c}{d} \right) + 13,6 \right] \chi_\psi + 1 \quad (IV-12)$$

Basculement :

La formule I-5 proposée par Gorbunov-Possadov (5) (§ I-2) pour les fondations rectangulaires reposant sur un demi espace élastique donne les valeurs des rigidités suivantes pour les modèles réduits de la présente étude soient :

Tableau IV-6 . Rigidités superficielles expérimentales et théoriques selon Gorbunov-Possadov (5)
(kg.mm²/degr.)

d/c	rigidités expérimentales	rigidités selon Gorbunov-Possadov
I/3	125	89,28
3	420,21	455,33
I/2	230,11	210,92
2	590,21	582,55
I	119,21	125,55

Les valeurs des rigidités du tableau IV-6 sont données en fonction des dimensions de la surface de base des modèles de fondation; de façon à faire une comparaison plus générale , il sera étudié la variation des rapports k_{oexp}/cd^2 et $k_{othéo.}/cd^2$ en fonction des rapports de dimensions d/c (fig IV-9) ; leurs valeurs sont résumées dans le tableau IV-7 ci après

Tableau IV-7 : Rigidités superficielles rapportées à cd^2

en kg/mm.degr. (formule théorique par Gorbunov-Possadov)

d/c	d	c	$k_0 \text{ exp.}/cd^2$ $\times 10^{-3}$	$k_0 \text{ théo.}/cd^2$ $\times 10^{-3}$
I/3	20	60	5,2	3,7
3	60	20	5,8	6,3
I/2	30	60	4,3	3,9
2	60	30	5,5	5,4
I	30	30	4,4	4,7

La figure IV-9 montre que la variation de $k_0 \text{ exp.}/cd^2$ est sensiblement linéaire avec une dispersion des points par rapport à la droite inférieure à 2 %, celle de $k_0 \text{ théo.}/cd^2$ présente la même allure que la précédente avec une dispersion des points par rapport à la droite moyenne légèrement plus grande (inférieure à 9 %) sauf pour le modèle I/3 où cette dispersion est de l'ordre de 23 % ; cette dispersion sensiblement plus importante pour le cas du modèle I/3 provient du fait que pour une profondeur p nulle (en surface) , les déplacements sont plus importants pour une faible variation de la charge ; d'autant plus que l'inertie de la section est plus faible , de plus les forces de frottement de l'appareillage présentent une importance plus grande par rapport aux forces actives . Malgré cette dispersion , la concordance est assez bonne avec les valeurs calculées moins de 8 % ; il semble toutefois que le graphe expérimental moyen a un gradient légè-

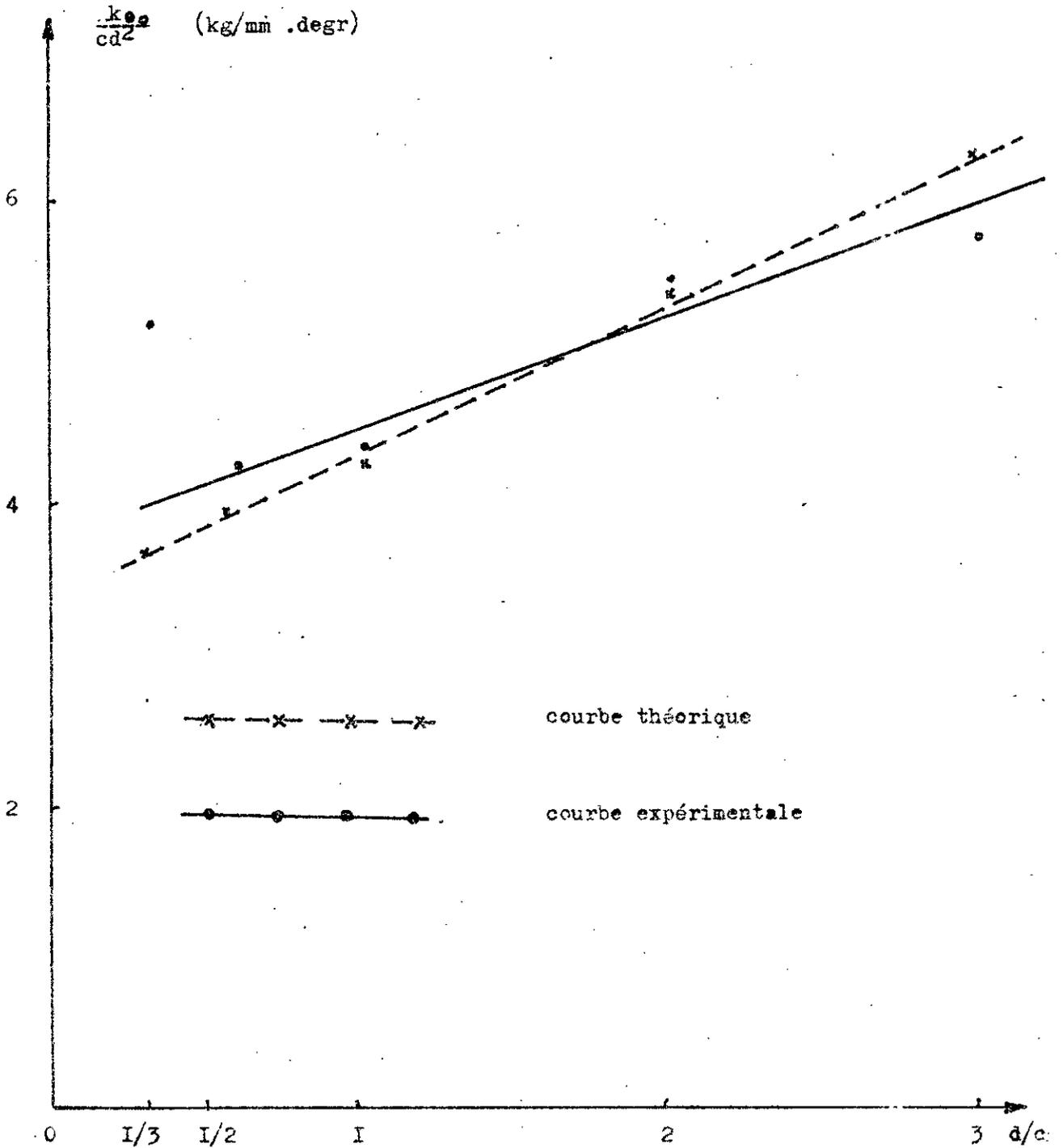


Fig IV-9 : Rigidités superficielles au basculement rapportées à cd^2 (formule théorique selon Gorbunov-Possadov)

sol fonctionne avec une bonne approximation comme un demi espace élastique lors des essais de basculement .

Une autre méthode (7) permet de calculer les rigidités superficielles au basculement en utilisant les coefficients de ballast du sol K_H et K_V horizontal et vertical respectivement ; la rigidité est donnée par la formule A_{III-I} , les calculs sont effectués pour une contrainte du sol de 1 kg/cm^2 étant donné que cette valeur n'a pas été atteinte lors des essais ; le choix de cette valeur du coefficient de ballast a permis de faire coïncider les courbes pour la valeur de d/c égale à $1/3$; le tableau IV-8 donne les valeurs des rigidités superficielles du sol pour les fondations rectangulaires selon le rapport des dimensions d/c :

Tableau IV-8 . Rigidités superficielles expérimentales et théoriques selon L. Terziov en $\text{kg.mm}^2/\text{degr.}$

d/c	rigidités expérimentales	rigidités théoriques
1/3	125	44,68
3	420,21	412,09
1/2	230,11	150
2	590,21	603,14
1	119,21	75,39

Il a été constaté précédemment que la variation du rapport $k_o \text{ exp.}/cd^2$ était linéaire ; afin de comparer les résultats expérimentaux avec ceux obtenus par cette méthode (L. Tzénov) , il sera étudié la variation du rapport $k_o \text{ théo.}/cd^2$ en fonction du rapport des dimensions de la surface de base de la fondation. Le tableau IV-9 résume ces calculs , la variation est donnée par le graphe (fig IV-10) .

Le graphe ainsi obtenu a une allure linéaire et croissante avec une dispersion des points par rapport à la droite moyenne ne dépassant pas 16 % ; cependant, il existe un écart assez important (46%) entre les droites expérimentale et de calcul , et de plus la droite de calcul présente un gradient plus élevé ; cet écart important provient du fait que la détermination du coefficient de ballast est purement empirique .

Tableau IV-9 . Rigidités superficielles rapportées à cd^2
en $kg/mm.degr.$ (formule théorique selon
L. Tzénov.)

d/c	a	c	$k_o \text{ exp.}/cd^2$ $\times 10^{-3}$	$k_o \text{ théo.}/cd^2$ $\times 10^{-3}$
1/3	20	60	5,2	1,9
3	60	20	5,8	5,6
1/2	30	60	4,3	2,8
2	60	30	5,5	5,6
1	30	30	4,4	2,8

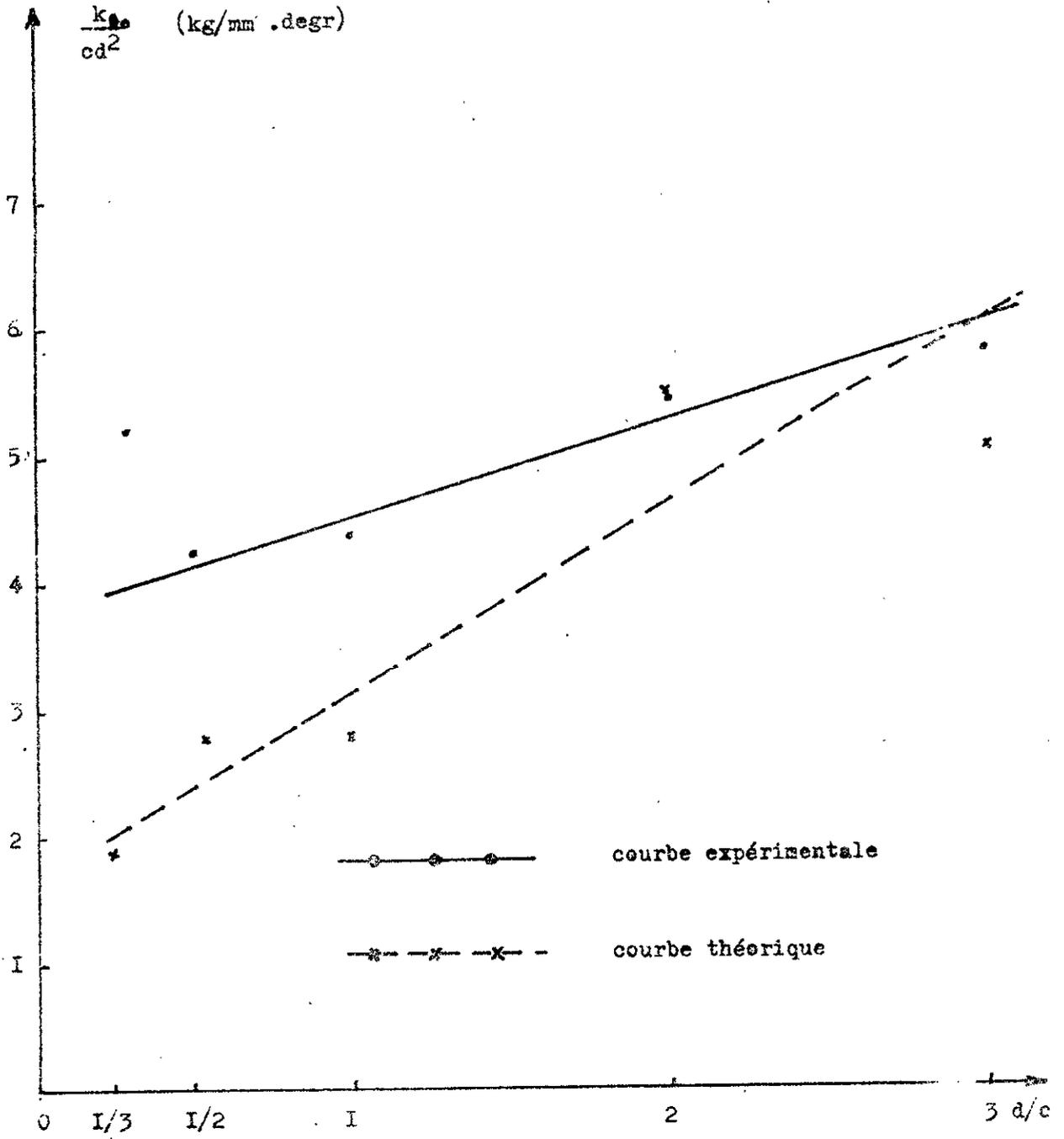


Fig IV-10 : Rigidités superficielles au basculement rapportées à cd^2 (formule théorique selon L. Tzénev)

Torsion:

Pour la comparaison des rigidités en torsion, on utilise uniquement de la formule de Barkan (6) (§ I-2) établie pour une fondation rectangulaire posée sur un milieu élastique et homogène. Les calculs sont donnés dans le tableau IV-10 ci-après :

Tableau IV-10 . Rigidités superficielles expérimentales et théoriques en $\text{kg.mm}^2/\text{degré}$ selon Barkan

d/c	rigidités théoriques	rigidités expérimentales
1/3	265,74	332,55
3	239,16	
1/2	332,86	370,38
2	326,20	
1	92,26	101,32

Le tableau IV-10 montre que les rigidités calculées par la formule I-6 de Barkan sont différentes pour un même modèle de fondation rectangulaire selon le rapport d/c (2 à 11 %) ; cette différence pour les modèles allongés provient du fait que la formule utilise des coefficients β_x et β_ψ dépendant des rapports des dimensions d/c (fig A_{III-1}) et montre un degré d'approximation

Dans le but de faire une comparaison, il est étudiée la variation des rigidités rapportées à une même surface cd en fonction de d/c ; le tableau IV-II résume ces calculs :

Tableau II-17. Rigidités superficielles rapportées

en Kg/degres

d/c	d	c	k_0 théor./cd	k_0 exp./cd
1/3	20	60	0,22	0,28
3	60	20	0,20	
1/2	30	60	0,18	0,21
2	60	30	0,18	
1	30	30	0,10	0,11

La figure V-22 montre que les courbes expérimentales et les courbes de calcul passent pratiquement par tous les points, et présentent la même allure de variation avec une bonne correspondance pour un rectangle peu allongé ; pour un rectangle très allongé, la rigidité expérimentale est sensiblement plus élevée environ 29 %. Cette différence provient éventuellement du fait que peut-être la formule utilisée n'est pas un calcul rigoureux selon un demi-espace élastique et les hypothèses simplificatrices peuvent expliquer la différence.

Par ailleurs, l'effet des conditions aux limites latérales du modèle de sol est peut-être plus sensible pour l'essai de torsion qui expliquerait une rigidité plus grande pour les modèles de plus grandes longueurs, et entraînerait également par la forme du contour en sous-face du modèle de sol un accroissement un peu plus rapide de la rigidité avec la profondeur. Par suite, les rigidités de torsion en profondeur déduites des modèles expérimentaux pourraient être une rigidité de calcul surestimée, ce qui est dans le cas de la

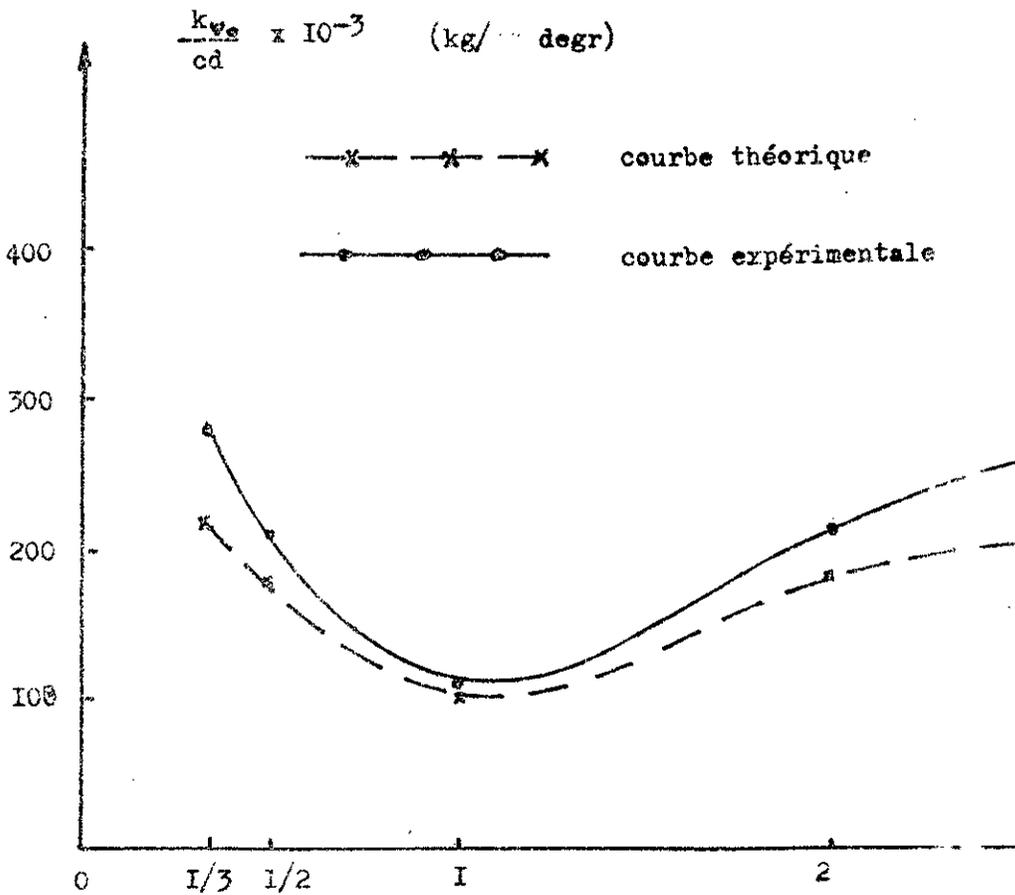


Fig IV-II : Rigidités superficielles rapportées à ... tonne
(formule théorique selon Barkan)

sécurité pour le fait des vérifications sismiques d.

IV-5-2. Influence de la profondeur :

Cette étude a pour but la détermination des lois de variation des rigidités du sol pour les fondations rectangulaires soumises à des mouvements de rotation (basculement).

Ce problème n'a pas été traité à présent, néanmoins une comparaison peut être faite à titre indicatif pour le cas de basculement avec les lois de variation des rigidités en profondeur établies dans le cas du bidimensionnel (8) ; cette loi est donnée par l'équation suivante soit :

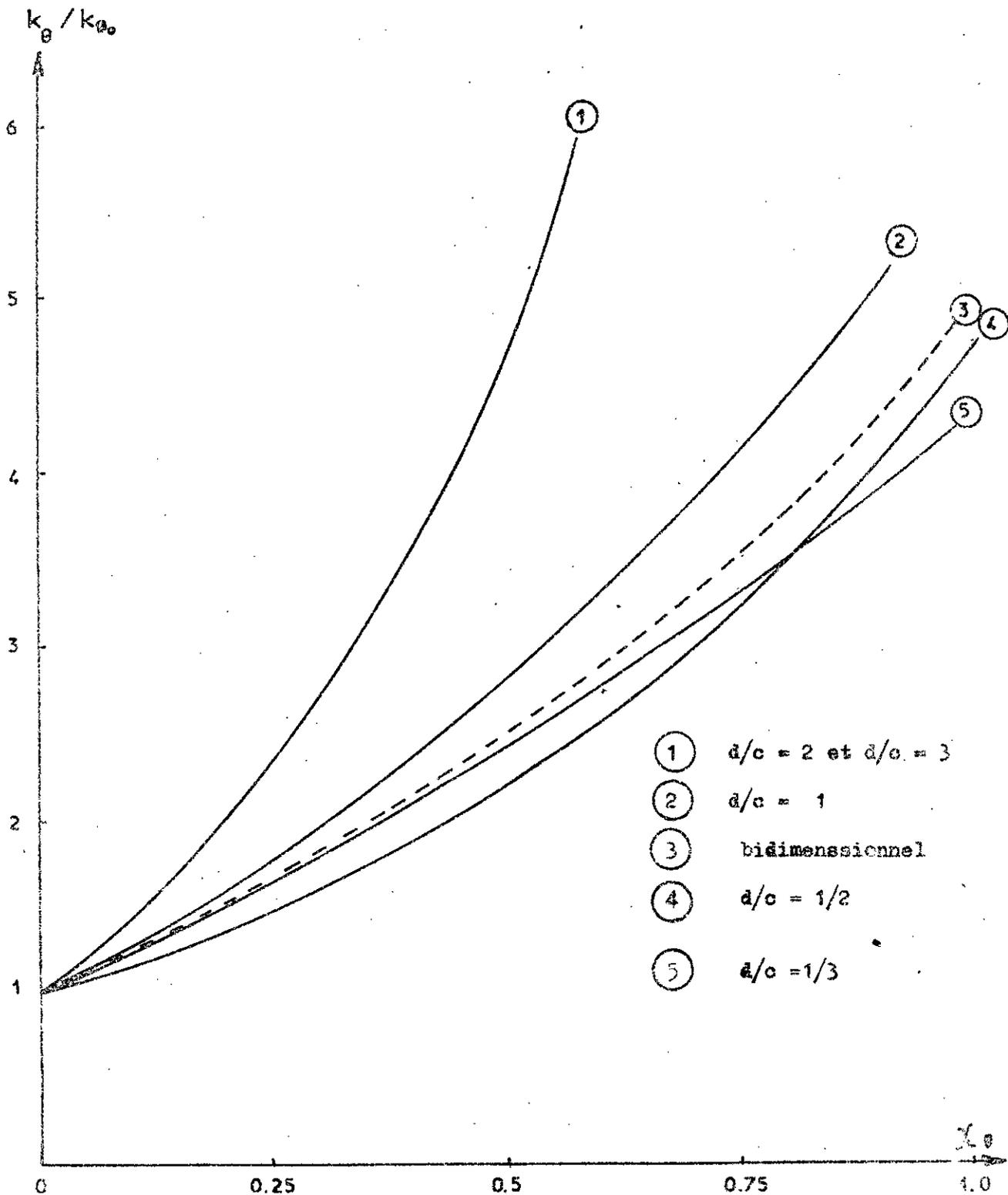
$$\frac{k_c}{k_{c0}} = 1,3\lambda^2 + 2,4\lambda + 1 \quad (I-7)$$

Dans le cas du tridimensionnel la rigidité du sol varie en fonction non seulement de la profondeur mais aussi des dimensions de la surface de contact de la fondation .

Le graphique IV-12 montre la position de la courbe bidimensionnelle par rapport à celles du tridimensionnel . Cette courbe est située sur le tracé des courbes des modèles de rapport de section d/c = 1/5 .

En raison de la dispersion existante entre les différents modèles (cf. § IV-6-1 ci-après) il n'est pas possible de parer avec précision avec la loi d'un modèle différent . Cependant constater que pour une section carrée , ou une section rectangulaire soumise en basculement dans le sens de la plus grande inertie la courbe reste très voisine de celle du modèle bidimensionnel (dont l'équation ci-dessus donne une approximation satisfaisante).

Fig IV-12 : Comparaison des rigidités rapportées aux rigidités en surface en fonction de l'enfoncement pour le basculement



Pour la section rectangulaire sollicitée dans le sens de la plus grande inertie , l'accroissement de rigidité avec la profondeur est plus rapide , et la formule IV-II ci dessus donnera une meilleure approche de la loi de variation (pour $\lambda_e \leq 0,5$) .

En ce qui concerne le mouvement de torsion , on ne dispose d'aucun moyen de comparaison .

IV-6 . Validité des résultats :

IV-6-I . Le modèle :

Hashiba et Whitman ont étudié comment la profondeur du sol de fondation affecte l'action réciproque sol-structure , leurs conclusions sont exprimées en fonction du rapport entre l'épaisseur de la couche de sol H et la demi largeur de la fondation carrée r ; selon Whitman (17) si H/r est supérieur à 4 le sol peut être considéré comme un demi espace élastique et l'amplification et l'interaction sont indépendantes l'une de l'autre .

Les dimensions des modèles utilisés dans le cadre de cette étude ont été choisis de façon à satisfaire l'hypothèse du demi espace élastique ; et la validité comme modèle représentatif du demi espace élastique est assez bien confirmée par la concordance entre les rigidités au basculement en surface calculée par les formules théoriques antérieures vu sur la base des essais (§ IV-5 ci-dessus) .

Cette concordance est un peu moins bonne en torsion , dans le sens d'une légère surestimation de la rigidité dans le cas de la fondation rectangulaire allongée , semblant indiquer une légère influence des conditions aux limites à distance finie pour les dimensions du modèle .

En dehors des conditions aux limites , le modèle peut se distinguer du demi espace par son mode d'exécution par assemblage de plaques . Il semble , après le soin apporté dans le collage des plaques ,

que la continuité du bloc fondation ait été bien assurée , comme le montre également la concordance des rigidités des fondations superficielles avec les calculs du demi espace , et , par ailleurs , la fidélité des mesures pour un même modèle de sol . Par contre il est probable que les plaques en caoutchouc naturel , de fabrication industrielle soignée ne présentaient pas cependant des caractéristiques rigoureusement identiques . Les essais sur le caoutchouc ne permettaient pas de tenir compte de ces différences (voir dispersion des essais de dureté § II-5) .

Les plaques étaient réalisées et utilisées à la plus grande dimension permise par le procédé de fabrication , d'où impossibilité de prélever des échantillons . Les échantillons étaient prélevés sur des plaques séparées , exécutées dans les mêmes conditions .

Le découpage des échantillons ne permettait pas de réaliser une section précise et régulière , d'où une obtention du module élastique avec une précision de 5 % seulement , suffisante pour les calculs comparatifs de rigidités en surface mais pas pour comparer les échantillons entre eux .

Par suite de cette dispersion entre les caractéristiques des plaques , ainsi que des conditions d'assemblage (pouvant modifier légèrement au niveau de chaque plaque les conditions de contact modèle sol-modèle fondation) , il est inévitable que les essais effectués sur les différents modèles de sol présentent entre eux une dispersion appréciable .

Il faut cependant remarquer que , dans une certaine mesure , la dispersion entre les modèles de sol , leur légère hétérogénéité par couches horizontales , les rendent plus proches des sols meubles réels les plus courants que le modèle théorique du demi espace élastique . Il serait illusoire de rechercher pour des sols réels une loi empirique trop précise , et les lois déduites des présents essais donnent en tous

cas une approche du comportement réel des sols aussi significative que le demi espace élastique rigoureux . Par ailleurs il y a lieu également de remarquer que les modèles de sol dont les dimensions en largeur sont deux fois plus grandes que la hauteur , ne représentent en fait qu'une profondeur de sol H de l'ordre de 5 à 6 fois le rayon moyen r de la base de la fondation . Comme mentionné ci-dessus , Whitcomb a indiqué que pour $H/r \geq 4$ le comportement des fondations superficielles était assimilable à un comportement sur demi espace , ce qui a été également vérifié en surface par les présents essais . Par contre , il n'est pas certain que cette règle reste applicable pour les fondations profondes ; on constate en effet que pour une profondeur de fondation égale à H la rigidité deviendrait infinie , mais , même pour des profondeurs modérées , ne dépassant pas $H/4$ comme dans les présents essais , l'augmentation de la rigidité due à la proximité de conditions limites d'encastrement en profondeur peut être sensible .

On peut en déduire que les lois de variation des rigidités selon la profondeur de la fondation établies à partir de ces essais sont valables pour des sols dont la profondeur n'est pas inférieure à 5 fois environ le rayon moyen de la fondation , et pour des profondeurs supérieures , et notamment dans l'hypothèse du demi espace élastique donnent une valeur approchée par excès de la rigidité en profondeur , ce qui est également sécuritaire pour les calculs dynamiques .

IV-6-2 L'expérience :

Les essais ont été effectués soigneusement de façon à éliminer au minimum les sources d'erreurs pouvant affecter les résultats et accroître la précision des mesures en particulier

- Éliminer le jeu entre la fondation et sa cavité (§ IV-4)
- Rendre le frottement négligeable entre la poulie et son axe (§ IV-4)
- Éliminer les glissements et soulèvements de la fondation lors

essais (§ II-4) .

- Mesurer les déplacements horizontaux au $1/100$ de mm .
- Faire varier la profondeur de la fondation de 5 en 5 mm .

IV-6-3 . Les résultats :

Les essais sont conduits pour de faibles déformations de façon à rester dans le domaine linéaire .

Les graphes efforts-déformations indiquent un très bon alignement des points expérimentaux pour un modèle de sol donné .

Toutes les courbes moyennes ont une allure très régulière avec un écart des points expérimentaux inférieur à 5 % pour un même modèle de sol .

La dispersion entre les différents modèles de sol est par contre plus importante . Les lois empiriques générales présentées pour le calcul des rigidités font apparaître un écart maximum de 10 % environ des points expérimentaux . Cette dispersion est bien de l'ordre de celle qui peut résulter de la nature physique différente des modèles examinés au § IV-6-1 ci-dessus . Une précision de 10 % est d'ailleurs suffisante pour une telle loi en vue d'applications pratiques pour lesquelles l'incertitude sur les caractéristiques réelles du sol (valeurs du module dynamique , homogénéité ...) sera toujours nettement plus élevée , en rappelant également , selon les observations faites au § IV-6-1 ci-dessus que les lois de variation des rigidités en profondeur sont applicables à des couches de sol sur fond dur dont l'épaisseur n'est pas inférieure à 5 fois environ le rayon moyen de la base de la fondation , et donne pour des profondeurs de sol plus grandes et pour le demi espace une valeur approchée par excès de la rigidité en profondeur .

Les essais , qui ont été effectués avec des déformations importantes (pour des rotations de l'ordre de 5 degrés) ont également

montré que , si des décollements sont apparus entre les parois latérales du modèle fondation et du modèle sol lors de l'augmentation de la charge , il n'en est résulté aucune discontinuité sur les graphes effort-déformation qui sont restés très sensiblement linéaire . On peut par suite , admettre que dans les calculs dynamiques d'ouvrages réels , On peut conserver sans erreur appréciable l'hypothèse de contact sol-fondation pour les parois latérales (sous réserve , bien sûr , d'une stabilité suffisante de l'ouvrage vis à vis d'un décollement en sous-face de la fondation) .

IV-7 . Extension au régime dynamique - Fonctions d'impédance:

IV-7-I . Introduction :

Les fonctions d'impédance d'une fondation représentent les caractéristiques dynamiques du sol (amortissement et rigidité) . Comme indiqué (§ I-2) ces fonctions d'impédance contiennent deux parties ; une imaginaire et l'autre réelle qui dépendent de la fréquence .

L'utilisation des fonctions d'impédance dans le calcul dynamique des structures permet de faire une analyse plus précise de la réponse dynamique que la méthode des "ressorts statiques " , en tenant compte , dans l'interaction sol-fondation , de l'influence de la pulsation .

Le problème des fondations rectangulaires n'a pas été traité à présent , cependant une proposition des fonctions d'impédance pour les fondations rectangulaires enterrées sera faite dans cette partie , en utilisant les lois de variation des rigidités obtenues dans le cadre de l'expérience statique (chap. IV) d'une part , et par comparaison aux résultats donnés par les différents auteurs concernant les fondations circulaires d'autre part .

IV-7-2 . Formulation du problème :

Lorsqu'une fondation est soumise à l'action d'une force extérieure dynamique d'amplitude F et de pulsation ω ; le mouvement de cette fondation peut être décrit par six coordonnées soient :

- Deux translations horizontales (Taxis) .
- Deux basculements (Roulis et Tangage) .
- Une translation verticale (Pompage) .
- Une torsion (Lacet) .

Ces degrés de libertés seront représentés par un déplacement généralisé de la forme $\{u\} e^{i\omega t}$, $\{u\}$ étant l'amplitude des déplacements harmoniques . Par suite les fonctions d'impédance de la fondation peuvent se'crire sous la forme soit :

$$\{F(\omega)\} e^{i\omega t} = \{K(\omega)\} \{u\} e^{i\omega t} + i \{C(\omega)\} \{u\} e^{i\omega t} \quad (\text{IV-13})$$

Il sont étudiés uniquement dans cette recherche les mouvements de rotation (basculement et torsion) .

$$\{F(\omega)\} = \begin{bmatrix} M_0 \\ M_\psi \\ M_\varphi \end{bmatrix} \quad (\text{IV-14}) \quad \{u(\omega)\} = \begin{bmatrix} \theta \\ \psi \\ \varphi \end{bmatrix} \quad (\text{IV-15})$$

$$\{K(\omega)\} = \begin{bmatrix} K_0 & 0 & 0 \\ 0 & K_\psi & 0 \\ 0 & 0 & K_\varphi \end{bmatrix} \quad (\text{IV-16}) \quad \{C(\omega)\} = \begin{bmatrix} c_\theta & 0 & 0 \\ 0 & c_\psi & 0 \\ 0 & 0 & c_\varphi \end{bmatrix} \quad (\text{IV-17})$$

IV-7-3 . Lois de variation des fonctions d'impédance pour les fondations circulaires enterrées :

Novak et Sach (15) ont proposé des lois de variation des

fonctions d'impédance pour les fondations circulaires encastrées dans un demi espace élastique ; ces lois sont établies pour les faibles fréquences (premier mode) , et sont de la forme suivante ;

Basculement :

$$\frac{k_{\theta}}{k_{\theta_0}} = 1 + \frac{p}{r} + 0,55 \left(\frac{p}{r} \right)^2 \quad (IV-18)$$

$$\frac{C_{\theta}}{C_{\theta_0}} = 1 + 4,2 \frac{p}{r} + 8,2 \left(\frac{p}{r} \right)^2 \quad (IV-19)$$

Torsion :

$$\frac{K_{\psi}}{K_{\psi_0}} = 1 + 2,38 \frac{p}{r} \quad (IV-20)$$

$$\frac{C_{\psi}}{C_{\psi_0}} = 1 + 7,7 \frac{p}{r} \quad (IV-21)$$

p : profondeur de la fondation

r : rayon de la fondation

IV-7-4 . Fonctions d'impédance pour les fondations rectangulaires ;

IV-7-4-I . Fondations superficielles :

- Rigidités :

Les résultats expérimentaux obtenus sont très proches de ceux donnés par Gorbunov-Possadov et Barkan (§ I-2) ; par suite les rigidités superficielles à prendre en compte seront celles données par ces auteurs (formules I-5 et I-6) .

- Amortissement :

Par analogie aux rigidités superficielles, les amortissements à prendre en compte seront ceux donnés pour les fondations circulaires, en considérant une surface de base circulaire équivalente; on admettra alors que l'erreur faite est de même ordre que celle des rigidités superficielles.

IV-7-4-2 . Fondations profondes :

- Rigidités :

En remplaçant le rayon de la fondation circulaire dans les équations IV-18 et IV-20 par le rayon équivalent correspondant aux mouvements de rotation; il a été constaté que ces lois de variation des rigidités donnaient des valeurs de rigidités du même ordre que celles obtenues expérimentalement par suite des lois de variation des rigidités à prendre en compte seront celles établies expérimentalement (§ IV-4 ci-dessus).

- Amortissement :

En faisant la même hypothèse que ci-dessus, on peut proposer des fonctions d'impédance suivantes, jusqu'à un enfoncement $\lambda \leq 0,5$ soient :

- Basculement :

$$\frac{K_{\theta}}{K_{\theta_0}} = 1 + \frac{P}{r} + 0,55 \left(\frac{P}{r_{\theta}} \right)^2 \quad (IV-21)$$

$$\frac{C_{\theta}}{C_{\theta_0}} = 1 + 4,2 \frac{P}{r} + 8,2 \left(\frac{P}{r_{\theta}} \right)^2 \quad (IV-22)$$

avec
$$r_{\theta} = (16 c d^3 / 3 \pi)^{1/4}$$

- Torsion :

$$\frac{K_{\psi}}{K_{\psi_0}} = 1 + 2,38 \frac{P}{r_{\psi}} \quad (IV-23)$$

$$\frac{C_{\psi}}{C_{\psi_0}} = 1 + 7,7 \frac{P}{r_{\psi}} \quad (IV-24)$$

avec
$$r_{\psi} = [8 c d (c^2 + d^2) / 3 \pi]^{1/4}$$

CONCLUSION

En vue d'étudier le comportement des fondations rectangulaires enterrées en sols profonds homogènes dans le domaine élastique, un modèle réduit tridimensionnel a été mis au point pour mesurer les rigidités de la fondation à l'égard des mouvements de rotation.

Les dimensions des modèles de sol utilisés dans le cadre de la présente recherche ont permis une représentation assez satisfaisante de ce type de sols, dans le cas de sols cohérents à coefficient de poisson élevé; la dispersion entre les modèles de sol, leur légère hétérogénéité par couche horizontale les rendent plus proches des sols meubles réels les plus courants que le modèle théorique du demi espace élastique.

Il a été établi à partir des résultats des essais des lois empiriques approchées de variation, en fonction de l'enfoncement, de la rigidité des fondations profondes rapportées à celles des fondations superficielles de même dimensions, dans le cas des mouvements de basculement et de torsion, et pour un coefficient d'enfoncement variant de 0 à 0,5; ce coefficient désigne le rapport de la profondeur à la longueur de la fondation dans le sens du mouvement de basculement, et le rapport de la profondeur à la racine carrée de la section de base pour la torsion; ces lois sont valables pour des sols meubles sur fond dur dont la profondeur n'est pas inférieure à 5 fois environ le rayon moyen de la fondation; pour des profondeurs supérieures, notamment dans l'hypothèse du demi espace élastique elles donnent une valeur approchée par excès de la rigidité en profondeur, ce qui est généralement sécuritaire pour les calculs dynamiques.

Les essais, qui ont été effectués avec des déformations importantes (pour des rotations de l'ordre de 5 degrés) ont montré que, si des déplacements sont apparus entre les parois latérales du modèle fondation et du modèle sol lors de l'augmentation de la charge, il n'en est résulté aucune

discontinuité sur les graphes effort-déformation qui sont restés très sensiblement linéaires . On peut par suite admettre que dans les calculs dynamiques d'ouvrages réels on peut conserver sans erreur appréciable l'hypothèse de contact sol-fondation pour les parois latérales .

Une extension de la méthode des " ressorts de sol " en rotation peut ainsi être faite à partir des rigidités des fondations superficielles pour les fondations rectangulaires enterrées . Les rigidités statiques ainsi obtenues à partir de ces lois empiriques approchées restent applicables selon les mêmes approximations que pour les " ressorts de sols " des fondations superficielles au cas des structures soumises à des sollicitations dynamiques de basses fréquences (premiers modes de vibration) .

Une analyse plus précise du comportement du sol pourrait être faite à partir de modèles dynamiques dont la conception serait basée sur celles des modèles statiques utilisés dans la présente recherche . Par ailleurs , de nombreuses recherches restent encore à faire sur le comportement des fondations enterrées concernant notamment: l'influence du coefficient de poisson (sols peu cohérents) , l'influence de l'épaisseur de la couche de sol , le cas des fondations non rectangulaires ...etc .

ANNEXE " I "

TABLEAUX DE MESURES ET GRAPHES POUR LE MOUVEMENT DE BASCULEMENT

Modèle carré :

- Tableaux de mesures et calculs :..... " A_{I-1}" à " A_{I-5}"
- Graphes $M_{\theta} = f(\theta)$:..... " A_{I-12}"

Modèle rectangulaire (60 x 120) d/c = 1/2 et 2

- Tableaux de mesures et calculs:..... " A_{I-4}" à " A_{I-7}"
- Graphes $M_{\theta} = f(\theta)$:..... " A_{I-13}"

Modèle rectangulaires (40 x 120) d/c = 1/3 et 3

- Tableaux de mesures et calculs : " A_{I-8}" à " A_{I-11}"
- Graphes $M_{\theta} = f(\theta)$: " A_{I-14}"

Grandeurs utilisées dans les tableaux ci-après

- F : Force appliquée horizontalement pour provoquer le mouvement de basculement , exprimée en kg
- Δ_1, Δ_2 : Déplacements horizontaux lus sur les comparateurs :
exprimés en mm
- θ : Angle de basculement calculé à partir de la relation
(III-4-2) , exprimé en degré
- M_0 : Moment de basculement calculé à partir de la relation
(III-4-1) , exprimé en kg mm
- p : Profondeur de la fondation , exprimée en mm
- OO' : Cote de la position du centre de basculement par rapport
à la base de la fondation , exprimée en mm
- l : Distance du centre de rigidité horizontale au point d'application de la force , exprimée en mm

Tableau A_{I-2} : Mesures et calculs (modèle 60 x 60)

F		1	2	3	4	5	
P = 15	I = 140,12	M ₀	141,02	282,08	423,12	564,16	705,20
		Δ ₁	1,16	2,90	4,06	5,51	-
		Δ ₂	3,60	9,01	12,61	17,12	-
		θ	0,40	1,00	1,40	1,90	-
		00'	3,84	3,86	3,88	3,90	-
P = 20	I = 142,93	M ₀	144,30	288,60	432,90	577,20	721,50
		Δ ₁	1,12	2,29	3,95	5,35	-
		Δ ₂	3,50	7,18	12,38	16,78	-
		θ	0,39	0,80	1,38	1,87	-
		00'	5,46	6,00	6,03	6,14	-
P = 25	I = 147,08	M ₀	146,12	292,24	438,36	584,48	730,60
		Δ ₁	1,01	2,30	3,74	4,78	6,30
		Δ ₂	3,21	7,31	11,86	15,17	19,98
		θ	0,36	0,82	1,33	1,70	2,24
		00'	9,26	9,30	8,90	8,95	8,94
P = 30	I = 149,43	M ₀	149,02	298,04	447,06	596,08	745,10
		Δ ₁	0,97	2,33	3,61	4,89	6,11
		Δ ₂	3,11	7,46	11,55	15,64	19,55
		θ	0,35	0,84	1,30	1,76	2,20
		00'	11,21	11,08	10,92	10,86	10,95
P = 35	I = 152,88	M ₀	152,40	304,80	457,20	609,60	762,00
		Δ ₁	0,74	1,78	2,90	4,03	5,15
		Δ ₂	2,39	5,75	9,38	13,01	16,54
		θ	0,227	0,65	1,06	1,47	1,88
		00'	12,97	13,10	13,27	12,96	13,10

Tableau A_{I-3} ; Mesures et calculs (modèle 60 x 60)

F		I	2	3	4	5	
P = 40	I = 155,84	M _θ	155,48	310,96	466,44	621,92	777,40
		Δ ₁	0,70	1,73	2,87	3,92	5,03
		Δ ₂	2,29	5,64	9,34	12,78	16,40
		θ	0,26	0,64	1,06	1,45	1,86
		00'	15,74	15,13	14,89	15,14	15,11
P = 45	I = 160,16	M _θ	159,82	319,64	479,46	639,28	799,10
		Δ ₁	0,59	1,45	2,31	3,17	4,03
		Δ ₂	1,94	4,75	7,57	10,38	13,20
		θ	0,22	0,54	0,86	1,18	1,50
		00'	16,34	16,15	16,11	16,10	16,10
P = 50	I = 164,45	M _θ	162,72	325,44	488,16	650,88	813,60
		Δ ₁	0,56	1,38	2,26	3,13	4,01
		Δ ₂	1,84	4,56	7,45	10,34	13,23
		θ	0,21	0,52	0,85	1,18	1,51
		00'	17,21	17,95	17,67	18,04	17,88
P = 55	I = 166,76	M _θ	165,56	331,12	496,68	662,24	827,80
		Δ ₁	0,50	1,18	1,89	2,59	3,30
		Δ ₂	1,66	3,93	6,28	8,64	11,00
		θ	0,19	0,45	0,72	0,99	1,26
		00'	19,22	19,76	19,61	20,12	19,96
P = 60	I = 169,57	M _θ	168,86	337,52	506,28	675,04	843,80
		Δ ₁	0,49	1,22	1,82	2,52	3,07
		Δ ₂	1,65	4,09	6,10	8,45	10,28
		θ	0,19	0,47	0,70	0,97	1,18
		00'	22,24	21,28	21,04	21,16	20,95

Tableau A_{I-4}: Mesures et calculs (modèle 60 x I20)

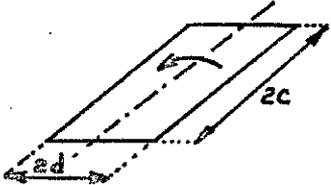
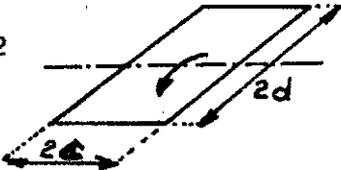
		d/c = 1/2					d/c = 2				
											
F		0,48	0,72	0,96	1,20	1,44	0,48	0,72	0,96	1,20	1,44
P=0	M _θ	62,88	94,32	125,76	157,20	188,64	62,88	94,32	125,76	157,20	188,64
	Δ ₁	0,15	0,53	0,74	1,48	1,93	0,06	0,24	0,39	0,53	0,74
	Δ ₂	0,45	1,63	2,27	4,54	5,90	0,18	0,73	1,16	1,63	2,27
	θ	0,05	0,18	0,25	0,50	0,65	0,02	0,08	0,13	0,18	0,25
	OO'	-1,89	1,30	0,41	-0,42	-0,12	-1,89	-1,89	-1,89	1,30	0,41
P=5	M _θ	64,68	97,03	129,37	161,71	194,05	64,68	97,03	129,37	161,71	194,05
	Δ ₁	0,12	0,59	0,86	1,42	1,50	0,06	0,18	0,32	0,44	0,59
	Δ ₂	0,36	1,81	2,63	4,35	4,62	0,18	0,54	1,00	1,36	1,81
	θ	0,04	0,20	0,29	0,48	0,51	0,02	0,06	0,11	0,15	0,20
	OO'	-1,89	0,98	0,09	0,50	1,49	-1,89	-1,89	3,32	1,93	0,98
P=10	M _θ	66,94	100,41	133,88	167,35	200,82	66,94	100,41	133,88	167,35	200,82
	Δ ₁	0,06	0,47	0,88	1,18	1,47	0,03	0,15	0,29	0,39	0,50
	Δ ₂	0,18	1,45	2,72	3,62	4,53	0,09	0,45	0,91	1,16	1,54
	θ	0,02	0,16	0,30	0,40	0,50	0,01	0,05	0,10	0,13	0,17
	OO'	-1,89	1,69	1,93	0,98	1,55	-1,89	-1,89	3,64	-1,89	1,48

Tableau A_{I-5} : Mesures et calculs (modèle 60 x 120)

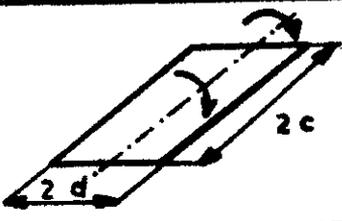
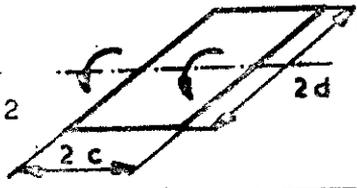
$d/c = 1/2$ 						$d/c = 2$ 					
F	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	
$l = 140,12$ $p = 15$	M_0	140,26	280,52	420,78	561,04	701,30	140,26	280,52	420,78	561,04	701,30
	Δ_1	1,01	2,02	3,17	4,32	5,62	0,32	0,72	1,12	1,53	1,93
	Δ_2	3,15	6,29	9,89	13,49	17,53	0,99	2,25	3,51	4,76	6,02
	θ	0,35	0,70	1,10	1,50	1,95	0,11	0,25	0,39	0,53	0,67
	∞'	4,66	4,67	4,90	5,03	4,93	3,32	4,99	5,46	4,60	4,96
$l = 142,93$ $p = 20$	M_0	143,28	286,56	429,84	573,12	716,40	143,28	286,56	429,84	573,12	716,40
	Δ_1	0,85	1,85	2,99	4,13	5,26	0,26	0,63	1,00	1,37	1,74
	Δ_2	2,69	5,82	9,40	12,99	16,57	0,81	1,97	3,13	4,29	5,46
	θ	0,30	0,65	1,05	1,45	1,85	0,09	0,22	0,35	0,48	0,61
	∞'	7,66	6,93	6,86	6,84	7,15	4,48	5,93	6,30	6,47	6,57
$l = 147,08$ $p = 25$	M_0	147,17	294,34	441,51	588,68	735,85	147,17	294,34	441,51	588,68	735,85
	Δ_1	0,65	1,56	2,43	3,31	4,19	0,23	0,57	0,88	1,19	1,50
	Δ_2	2,06	4,91	7,69	10,46	13,23	0,71	1,79	2,77	3,75	4,74
	θ	0,23	0,55	0,86	1,17	1,48	0,08	0,20	0,31	0,42	0,53
	∞'	8,08	7,49	8,12	7,93	7,83	5,27	6,71	7,36	7,66	7,85
$l = 149,43$ $p = 30$	M_0	150,40	300,80	451,20	601,60	752,00	150,40	300,80	451,20	601,60	752,00
	Δ_1	0,64	1,51	2,32	3,13	3,94	0,22	0,53	0,81	1,09	1,37
	Δ_2	2,05	4,81	7,39	9,97	12,55	0,71	1,69	2,58	3,47	4,36
	θ	0,23	0,54	0,83	1,12	1,41	0,08	0,19	0,29	0,39	0,49
	∞'	10,57	9,79	9,86	9,90	9,93	12,44	10,18	9,97	9,87	9,81

Tableau A_{I-5} : Mesures et calculs (modèle 60 x 120)

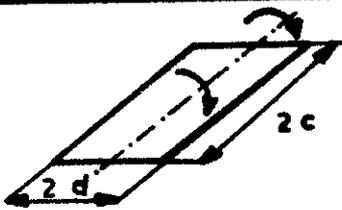
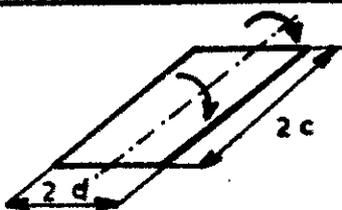
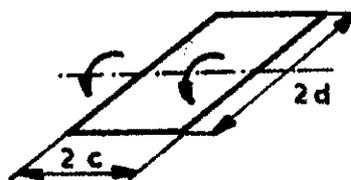
$d/c = 1/2$ 						$d/c = 2$ 					
F	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	
$P = 15$ $l = 140,12$	M_0	140,26	280,52	420,78	561,04	701,30	140,26	280,52	420,78	561,04	701,30
	Δ_1	1,01	2,02	3,17	4,32	5,62	0,32	0,72	1,12	1,53	1,93
	Δ_2	3,15	6,29	9,89	13,49	17,53	0,99	2,25	3,51	4,76	6,02
	θ	0,35	0,70	1,10	1,50	1,95	0,11	0,25	0,39	0,53	0,67
	∞'	4,66	4,67	4,90	5,03	4,93	3,32	4,99	5,46	4,60	4,96
$P = 20$ $l = 142,93$	M_0	143,28	286,56	429,84	573,12	716,40	143,28	286,56	429,84	573,12	716,40
	Δ_1	0,85	1,85	2,99	4,13	5,26	0,26	0,63	1,00	1,37	1,74
	Δ_2	2,69	5,82	9,40	12,99	16,57	0,81	1,97	3,13	4,30	5,46
	θ	0,30	0,65	1,05	1,45	1,85	0,09	0,22	0,35	0,48	0,61
	∞'	7,66	6,93	6,86	6,84	7,15	4,48	5,93	6,30	6,47	6,57
$P = 25$ $l = 147,08$	M_0	147,17	294,34	441,51	588,68	735,85	147,17	294,34	441,51	588,68	735,85
	Δ_1	0,65	1,56	2,43	3,31	4,19	0,23	0,57	0,88	1,19	1,50
	Δ_2	2,06	4,91	7,69	10,46	13,23	0,71	1,79	2,77	3,75	4,74
	θ	0,23	0,55	0,86	1,17	1,48	0,08	0,20	0,31	0,42	0,53
	∞'	8,08	7,49	8,12	7,93	7,83	5,27	6,71	7,36	7,66	7,85
$P = 30$ $l = 149,43$	M_0	150,40	300,80	451,20	601,60	752,00	150,40	300,80	451,20	601,60	752,00
	Δ_1	0,64	1,51	2,32	3,13	3,94	0,22	0,53	0,81	1,09	1,37
	Δ_2	2,05	4,81	7,39	9,97	12,55	0,71	1,69	2,58	3,47	4,36
	θ	0,23	0,54	0,83	1,12	1,41	0,08	0,19	0,29	0,39	0,49
	∞'	10,57	9,79	9,86	9,90	9,93	12,44	10,18	9,97	9,87	9,81

Tableau A_{I-6} : Mesures et calculs (modèle 60 x 120)

$d/c = 1/2$



$d/c = 2$



		F	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
P = 35	M_0	153,12	306,24	459,36	612,48	765,60	153,12	306,24	459,36	612,48	765,60	
	Δ_1	0,50	1,21	1,99	2,76	3,53	0,17	0,41	0,69	0,97	1,24	
	Δ_2	1,60	3,90	6,38	8,87	11,35	0,53	1,33	2,22	3,10	3,99	
	θ	0,18	0,44	0,72	1,00	1,28	0,06	0,15	0,25	0,35	0,45	
	∞'	10,85	12,44	11,65	11,88	12,02	7,66	13,39	11,86	11,21	12,13	
P = 40	M_0	157,01	314,02	471,03	628,04	785,05	157,01	314,02	471,03	628,04	785,05	
	Δ_1	0,49	1,15	1,81	2,55	3,10	0,19	0,41	0,66	0,90	1,18	
	Δ_2	1,59	3,72	5,84	8,23	10,00	0,62	1,33	2,12	2,92	3,81	
	θ	0,18	0,42	0,66	0,95	1,13	0,07	0,15	0,24	0,33	0,43	
	∞'	14,03	13,12	12,88	12,91	12,84	14,48	13,39	12,44	13,74	12,77	
P = 45	M_0	160,36	320,72	481,08	641,44	801,80	160,36	320,72	481,08	641,44	801,80	
	Δ_1	0,41	1,03	1,57	2,14	2,71	0,14	0,35	0,57	0,78	1,00	
	Δ_2	1,32	3,35	5,11	6,96	8,81	0,44	1,15	1,85	2,56	3,26	
	θ	0,15	0,38	0,58	0,79	1,00	0,05	0,13	0,21	0,29	0,37	
	∞'	13,39	14,70	14,90	14,80	14,74	9,57	15,74	14,48	15,90	15,15	
P = 50	M_0	163,20	326,40	489,60	652,80	816,00	163,20	326,40	489,60	652,80	816,00	
	Δ_1	0,37	0,91	1,47	2,00	2,59	0,11	0,32	0,51	0,75	0,96	
	Δ_2	1,23	2,98	4,83	6,58	8,52	0,35	1,05	1,67	2,46	3,16	
	θ	0,14	0,34	0,55	0,75	0,97	0,04	0,12	0,19	0,28	0,36	
	∞'	16,58	16,55	16,87	17,22	17,03	12,44	17,21	16,21	16,53	17,21	

Tableau A_{I-7} : Mesures et calculs (modèle 60 x I20)

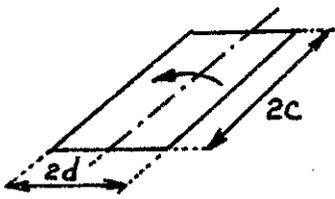
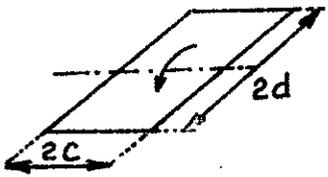
d/c = 1/2						d/c = 2					
											
F	I	2	3	4	5	I	2	3	4	5	
p = 55	M _θ	167,03	334,06	501,09	668,12	835,15	167,03	334,06	501,09	668,12	835,15
	Δ ₁	0,32	0,77	1,25	1,75	2,20	0,11	0,29	0,48	0,66	0,90
	Δ ₂	1,05	2,54	4,12	5,78	7,27	0,35	0,96	1,58	2,19	2,98
	θ	0,12	0,29	0,47	0,66	0,83	0,04	0,11	0,18	0,25	0,34
	OO'	17,21	17,87	17,62	18,09	18,14	18,44	18,95	17,21	18,74	18,34
p = 60	M _θ	169,21	338,42	507,63	676,84	846,05	169,21	338,42	507,63	676,84	846,05
	Δ ₁	0,31	0,73	1,14	1,56	1,98	0,11	0,26	0,31	0,52	0,70
	Δ ₂	1,05	2,44	3,83	5,23	6,62	0,35	0,87	1,05	1,74	2,35
	θ	0,12	0,28	0,44	0,60	0,76	0,04	0,10	0,12	0,20	0,27
	OO'	21,99	20,62	21,55	21,04	20,74	12,44	21,03	21,99	21,03	21,46

Tableau A_{I-8} : Mesures et calculs (modèle 40 x I20)

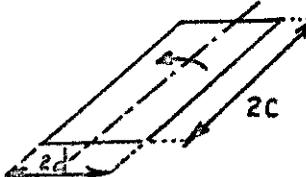
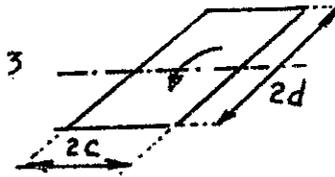
d/c = 1/3 						d/c = 3 					
F	0,48	0,72	0,96	1,20	1,44	0,48	0,72	0,96	1,20	1,44	
A = 131,00 p = 0	M _θ	62,88	94,32	125,20	157,20	188,64	62,88	94,32	125,20	157,20	188,64
	Δ ₁	0,15	0,59	1,19	1,69	2,26	0,06	0,27	0,50	0,74	0,95
	Δ ₂	0,45	1,82	3,63	5,17	6,90	0,18	0,82	1,54	2,27	2,90
	θ	0,05	0,20	0,40	0,57	0,76	0,02	0,09	0,17	0,25	0,32
	OO'	-1,89	0,98	-0,45	0,13	-0,37	-1,89	-1,89	1,48	0,41	0,10
A = 134,67 p = 5	M _θ	64,64	96,96	129,28	161,60	193,92	64,64	96,96	129,28	161,60	193,92
	Δ ₁	0,12	0,65	1,06	1,53	1,92	0,03	0,27	0,47	0,59	0,77
	Δ ₂	0,36	1,99	3,26	4,71	5,89	0,09	0,82	1,45	1,81	2,36
	θ	0,04	0,22	0,36	0,52	0,65	0,01	0,09	0,16	0,20	0,26
	OO'	-1,89	0,72	1,30	1,42	0,76	-1,89	-1,89	1,69	0,98	0,32
A = 139,14 p = 10	M _θ	66,79	100,18	133,57	166,97	200,36	66,79	100,18	133,57	166,97	200,36
	Δ ₁	0,09	0,59	1,00	1,47	2,06	0,06	0,24	0,44	0,59	0,74
	Δ ₂	0,27	1,81	3,08	4,54	6,34	0,18	0,72	1,36	1,81	2,26
	θ	0,03	0,20	0,34	0,50	0,70	0,02	0,08	0,15	0,20	0,25
	OO'	-1,89	0,98	1,48	1,55	1,40	-1,89	-1,89	1,93	0,98	0,41

Tableau A_{I-9} : Mesures et calculs (modèle 40 x I20)

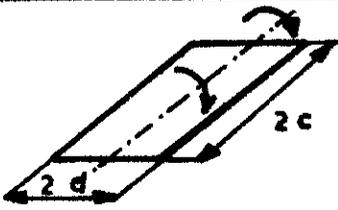
$d/c = 1/3$ 						$d/c = 3$ 					
F	I	2	3	4	5	I	2	3	4	5	
$P = 15$ $l = 140,12$	M_{θ}	140,12	280,24	420,36	560,48	700,60	140,12	280,24	420,36	560,48	700,60
	Δ_1	1,12	2,74	3,74	5,19	6,34	0,46	1,01	1,58	2,16	2,74
	Δ_2	3,51	8,54	11,69	16,18	19,70	1,44	3,15	4,94	6,74	8,54
	θ	0,39	0,95	1,30	1,80	2,20	0,16	0,35	0,55	0,75	0,95
	∞'	5,46	4,76	5,19	4,85	4,97	5,28	4,66	5,41	5,00	4,76
$P = 20$ $l = 142,93$	M_{θ}	142,93	285,86	428,79	571,72	714,65	142,93	285,86	428,79	571,72	714,65
	Δ_1	1,00	2,42	3,61	4,98	5,98	0,37	0,97	1,42	1,88	2,33
	Δ_2	3,13	7,61	11,37	15,67	18,81	1,16	3,04	4,48	5,91	7,34
	θ	0,35	0,85	1,27	1,75	2,10	0,13	0,34	0,50	0,66	0,82
	∞'	6,30	6,89	7,16	7,00	6,92	6,93	6,54	7,28	6,80	7,21
$P = 25$ $l = 147,08$	M_{θ}	147,08	294,16	441,24	588,32	735,40	147,08	294,16	441,24	588,32	735,40
	Δ_1	0,85	1,98	3,22	4,47	5,71	0,31	0,79	1,24	1,70	2,15
	Δ_2	2,68	6,26	10,19	14,12	18,06	0,98	2,50	3,93	5,36	6,79
	θ	0,30	0,70	1,14	1,58	2,02	0,11	0,28	0,44	0,60	0,76
	∞'	7,66	7,94	8,19	7,94	8,11	8,53	8,35	8,53	7,67	7,92
$P = 30$ $l = 149,43$	M_{θ}	149,53	298,86	448,29	597,72	747,15	149,53	298,86	448,29	597,72	747,15
	Δ_1	0,78	1,83	2,86	3,89	4,91	0,31	0,69	1,11	1,53	1,94
	Δ_2	2,49	5,86	9,15	12,44	15,73	0,98	2,22	3,55	4,89	6,22
	θ	0,28	0,66	1,03	1,40	1,77	0,11	0,25	0,40	0,55	0,70
	∞'	10,39	11,14	10,92	10,83	11,11	8,53	11,86	11,01	10,62	11,22

Tableau A_{I-10} : Mesures et calculs (modèle 40 x I20)

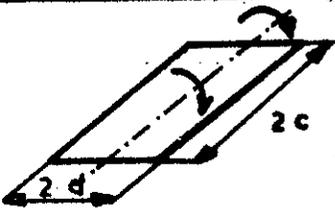
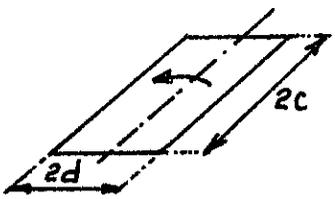
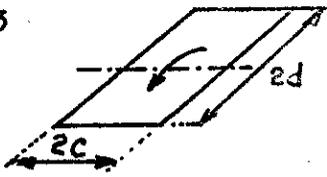
$d/c = 1/3$ 						$d/c = 3$ 					
F	I	2	3	4	5	I	2	3	4	5	
P = 152,88	M_0	152,88	305,76	458,64	611,52	764,40	152,88	305,76	458,64	611,52	764,40
	Δ_1	0,60	1,48	2,44	3,40	4,36	0,25	0,58	0,93	1,29	1,64
	Δ_2	1,95	4,78	7,88	10,97	14,07	0,80	1,86	3,01	4,16	5,31
	θ	0,22	0,54	0,89	1,24	1,59	0,09	0,21	0,33	0,47	0,60
	σ	13,74	12,97	12,93	12,92	12,92	10,85	11,76	13,28	12,74	13,40
P = 155,80	M_0	155,80	311,60	467,40	623,20	779,00	155,80	311,60	467,40	623,20	779,00
	Δ_1	0,57	1,43	2,25	3,06	3,87	0,24	0,54	0,89	1,22	1,54
	Δ_2	1,85	4,67	7,32	9,96	12,61	0,79	1,76	2,91	3,97	5,02
	θ	0,21	0,53	0,83	1,13	1,43	0,09	0,20	0,33	0,45	0,57
	σ	14,48	15,41	14,69	14,87	14,97	17,21	15,30	15,48	14,67	15,21
P = 160,16	M_0	160,16	320,32	480,48	640,64	800,80	160,16	320,32	480,48	640,64	800,80
	Δ_1	0,49	1,19	2,06	2,65	3,38	0,22	0,49	0,78	1,14	1,46
	Δ_2	1,39	3,88	6,70	8,64	11,02	0,71	1,59	2,64	3,70	4,76
	θ	0,18	0,44	0,76	0,98	1,25	0,08	0,18	0,30	0,42	0,54
	σ	14,03	15,04	14,71	15,08	15,10	12,44	14,03	15,30	14,49	15,09
P = 164,45	M_0	164,45	328,90	493,35	657,80	822,25	164,45	328,90	493,35	657,80	822,25
	Δ_1	0,43	1,07	1,71	2,35	2,67	0,19	0,43	0,69	0,96	1,23
	Δ_2	1,40	3,51	5,62	7,73	8,78	0,61	1,40	2,28	3,16	4,04
	θ	0,16	0,40	0,64	0,88	1,00	0,07	0,16	0,26	0,36	0,46
	σ	15,02	16,74	16,92	17,01	17,04	14,48	16,02	17,95	17,21	16,80

Tableau A_{I-II} : Mesures et calculs (modèle 40 x I20)

d/c = 1/3						d/c = 3					
											
F	I	2	3	4	5	I	2	3	4	5	
p = 55	M _θ	166,76	333,52	500,28	667,04	833,80	166,76	333,52	500,28	667,04	833,80
	Δ ₁	0,40	0,98	1,55	2,13	2,71	0,16	0,40	0,63	0,87	1,11
	Δ ₂	1,31	3,24	5,16	7,08	9,01	0,52	1,31	2,10	2,89	3,67
	θ	0,15	0,37	0,59	0,81	1,03	0,06	0,15	0,24	0,33	0,42
	OO'	17,21	18,25	19,48	19,34	19,27	17,21	17,21	19,60	18,95	18,58
p = 60	M _θ	169,57	339,14	508,71	678,28	847,45	169,57	339,14	508,71	678,28	847,45
	Δ ₁	0,36	0,88	1,38	1,87	2,37	0,13	0,36	0,60	0,83	1,01
	Δ ₂	1,22	2,96	4,62	6,27	7,99	0,44	1,22	2,00	2,79	3,40
	θ	0,14	0,34	0,53	0,72	0,91	0,05	0,14	0,23	0,32	0,39
	OO'	22,67	21,71	20,80	21,20	20,79	21,03	22,67	20,53	21,39	21,62

$d/c = 1$

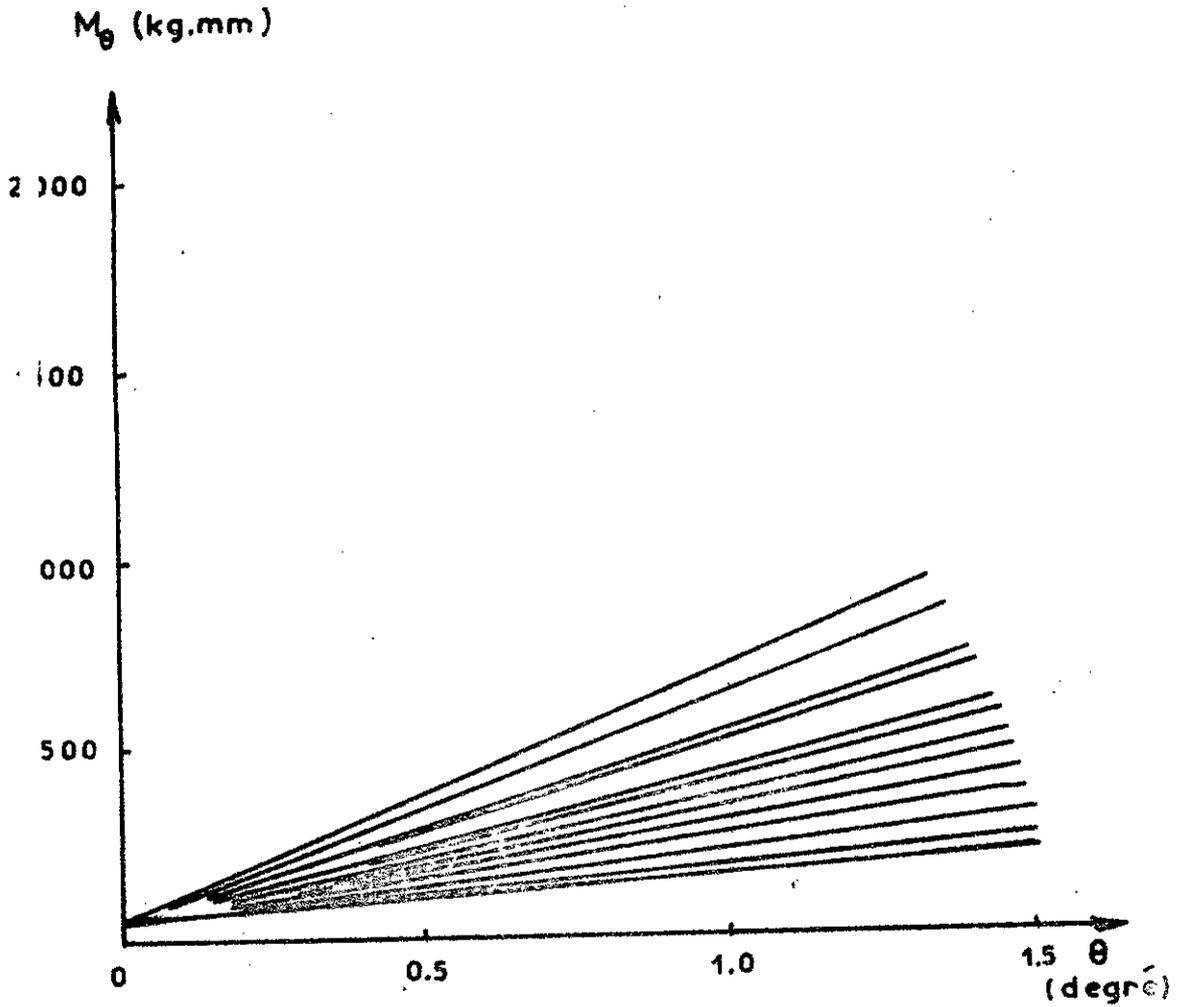


fig A_{I-I2} M

Moment de basculement en fonction de l'angle
(Modéle 60X60).

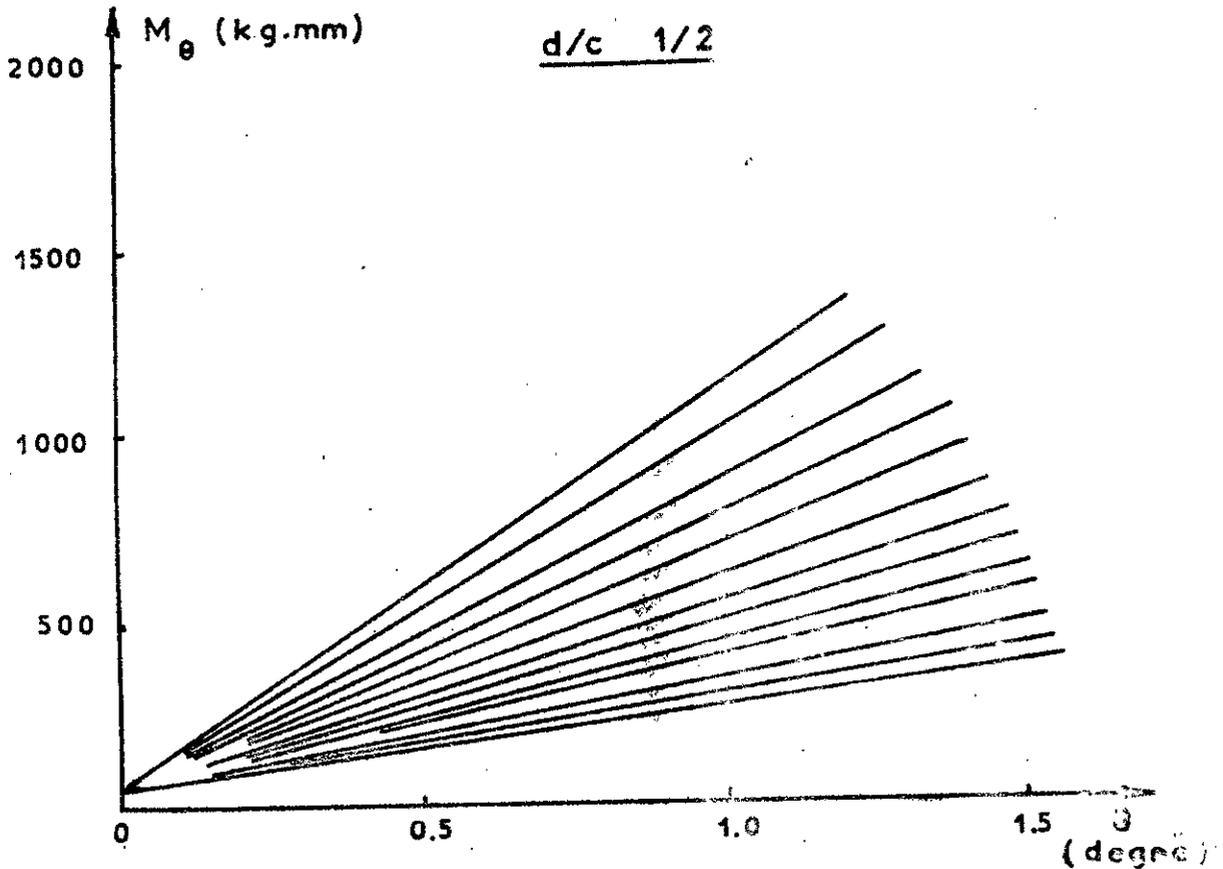
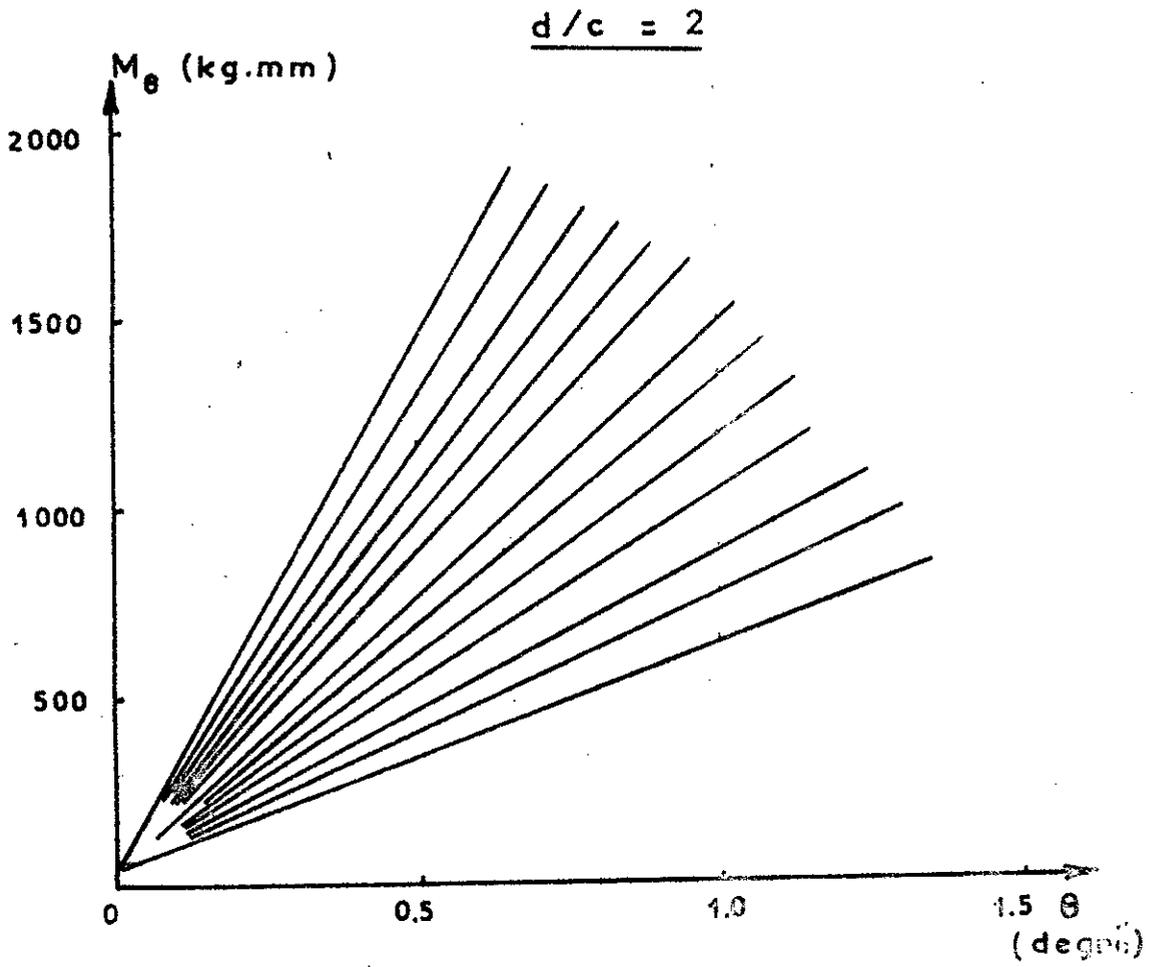


Fig A_{I-13}: Moment de basculement en fonction de l'angle
(Modèle 60X120).

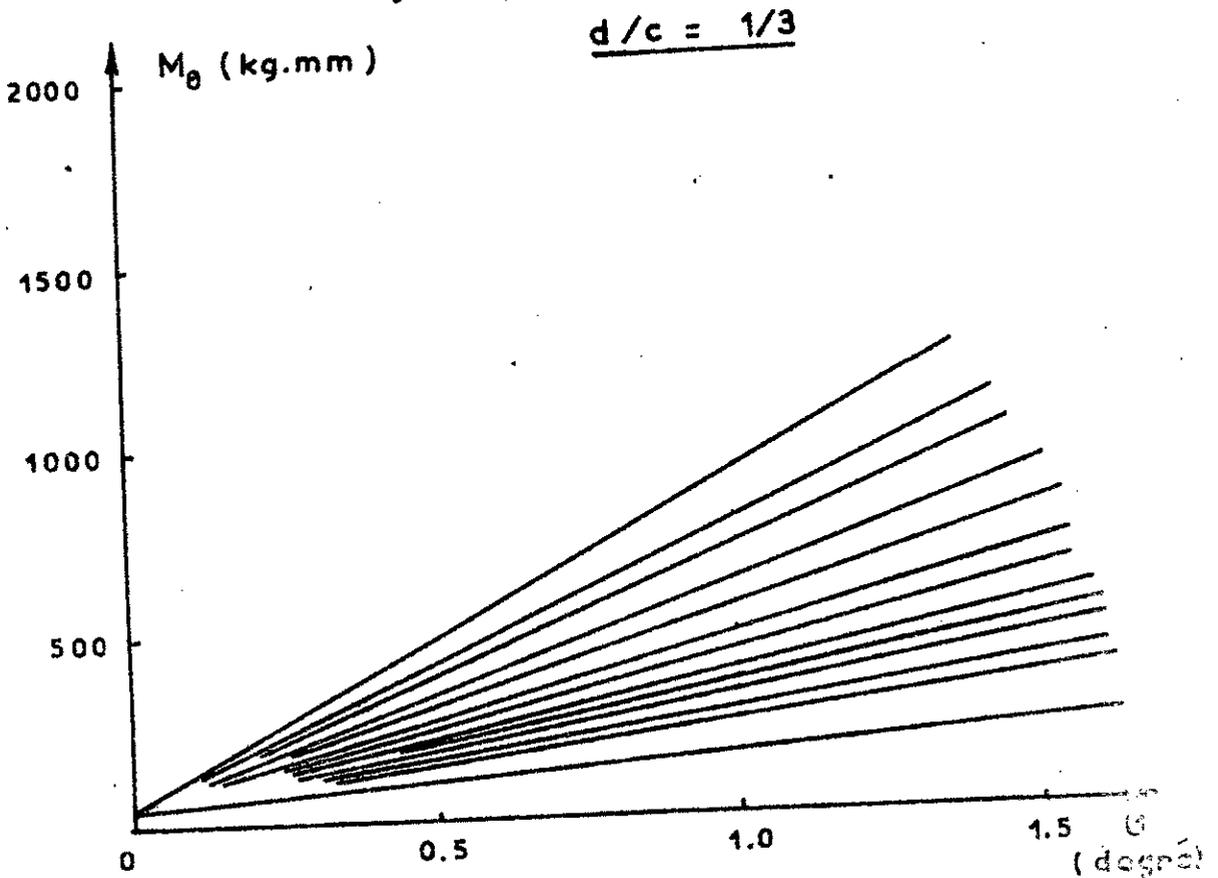
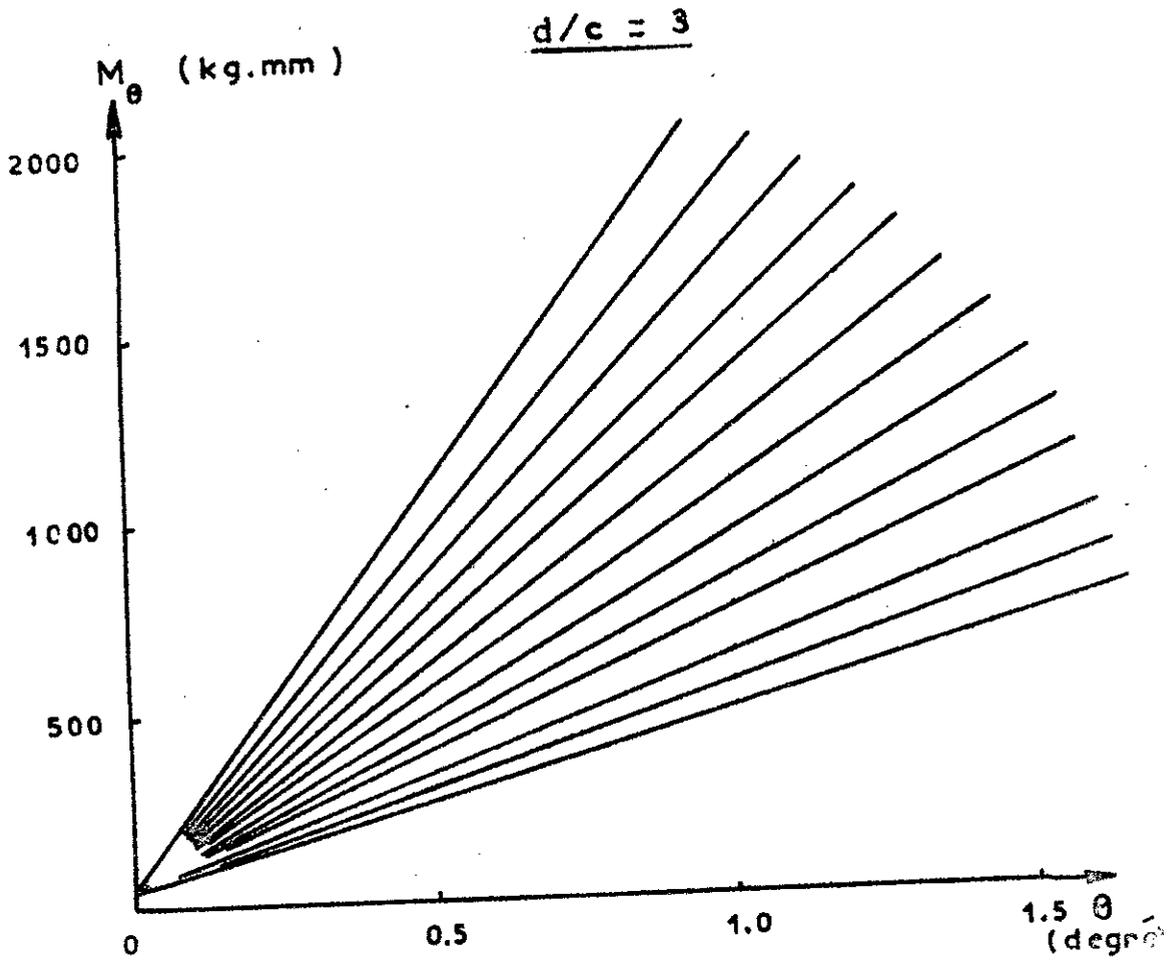


Fig A_I-I4 Moment de basculement en fonction de l'angle
(Modèle 40X120).

ANNEXE " II "

TABLEAUX DE MESURES ET GRAPHES POUR LE MOUVEMENT DE TORSION

Modèle carré

- Tableaux de mesures et calculs : " A_{II-1}" à " A_{II-3}"
- Graphes $M_{\psi} = f(\psi)$: " A_{II-10}"

Modèle rectangulaire (60 x I20)

- Tableaux de mesures et calculs : " A_{II-4}" à " A_{II-6}"
- Graphes $M_{\psi} = f(\psi)$: " A_{II-11}"

Modèle rectangulaire (40 x I20)

- Tableaux de mesures et calculs : " A_{II-7}" à " A_{II-9}"
- Graphes $M_{\psi} = f(\psi)$: " A_{II-12}"

Grandeurs utilisées dans les tableaux ci-après

- F : Force appliquée horizontalement pour provoquer le mouvement de torsion , exprimée en kg
- $\Delta_1; \Delta_2$: Déplacements horizontaux lus sur les comparateurs , exprimés en mm
- M_ψ : Moment de torsion calculé à partir de la relation (III-4-1) exprimé en kg.mm
- ψ : Angle de torsion calculé à partir de la relation (III-4-2) exprimé en degré
- p : Profondeur de la fondation , exprimée en mm

Tableau A_{II-I} : Mesures et calculs (modèle 60 x 60)

F		0,240	0,480	0,720	0,960	1,200	1,440
M _ψ		61,20	122,40	183,60	244,80	306,00	367,20
P = 0	Δ ₁	1,05	2,07	3,05	4,11	5,24	6,37
	Δ ₂	2,09	4,15	6,14	8,25	10,41	12,59
	ψ	0,60	1,19	1,77	2,37	2,96	3,56
P = 5	Δ ₁	0,65	1,29	1,92	2,57	3,20	3,91
	Δ ₂	1,29	2,58	3,82	5,13	6,45	7,82
	ψ	0,37	0,74	1,09	1,47	1,86	2,24
P = 10	Δ ₁	0,42	0,84	1,27	1,71	2,16	2,58
	Δ ₂	0,84	1,68	2,54	3,42	4,31	5,18
	ψ	0,24	0,48	0,73	0,98	1,23	1,49

Tableau A_{II-2} : Mesures et calculs (modèle 60 x 60)

F		1	2	3	4	5	6
	M _ψ	255	510	765	1020	1275	1530
p = 15	Δ ₁	1,40	2,85	4,23	5,64	7,44	-
	Δ ₂	2,79	5,70	8,47	11,28	14,87	-
	ψ	0,80	1,63	2,43	3,23	4,25	-
p = 20	Δ ₁	1,12	2,26	3,37	4,60	5,95	7,54
	Δ ₂	2,24	4,53	6,73	9,18	11,93	15,09
	ψ	0,64	1,30	1,92	2,62	3,42	4,32
p = 25	Δ ₁	0,93	1,92	2,81	3,82	4,71	5,60
	Δ ₂	1,86	3,84	5,64	7,67	9,42	11,19
	ψ	0,53	1,10	1,62	2,20	2,70	3,20
p = 30	Δ ₁	0,77	1,55	2,40	3,15	3,97	4,84
	Δ ₂	1,53	3,10	4,79	6,29	7,93	9,68
	ψ	0,44	0,89	1,37	1,80	2,27	2,77
p = 35	Δ ₁	0,68	1,40	2,04	2,74	3,46	4,19
	Δ ₂	1,37	2,79	4,08	5,48	6,91	8,36
	ψ	0,39	0,80	1,17	1,57	1,98	2,39
p = 40	Δ ₁	0,57	1,18	1,75	2,33	2,97	3,57
	Δ ₂	1,15	2,39	3,54	4,67	5,92	7,15
	ψ	0,33	0,67	1,02	1,34	1,69	2,05
p = 45	Δ ₁	0,52	1,09	1,63	2,18	2,76	3,35
	Δ ₂	1,04	2,17	3,26	4,34	5,52	6,69
	ψ	0,30	0,62	0,93	1,24	1,58	1,91

Tableau AII-3 : Mesures et calculs (modèle 60 x 60)

F		1	2	3	4	5	6
	M_{ψ}	255	510	765	1020	1275	1530
P = 50	Δ_1	0,47	0,96	1,45	1,92	2,45	3,04
	Δ_2	0,94	1,92	2,90	3,84	4,91	6,06
	ψ	0,27	0,55	0,83	1,10	1,41	1,73
P = 55	Δ_1	0,42	0,84	1,28	1,69	2,08	2,58
	Δ_2	0,84	1,67	2,55	3,36	4,16	5,19
	ψ	0,24	0,48	0,73	0,96	1,19	1,50
P = 60	Δ_1	0,38	0,75	1,12	1,40	2,02	2,29
	Δ_2	0,77	1,50	2,23	2,79	3,84	4,57
	ψ	0,22	0,43	0,64	0,80	1,10	1,31

Tableau A_{II-4} : Mesures et calculs (modèle 60 x 120)

F		0,240	0,480	0,720	0,960	129,600	1440
M _ψ		61,20	122,40	183,60	244,80	306,00	367,20
p = 0	Δ ₁	0,26	0,52	0,84	1,06	1,26	1,62
	Δ ₂	0,52	1,05	1,68	2,13	2,51	3,25
	ψ	0,15	0,30	0,48	0,61	0,72	0,93
p = 5	Δ ₁	0,19	0,38	0,58	0,75	0,96	1,13
	Δ ₂	0,38	0,77	1,15	1,50	1,92	2,27
	ψ	0,11	0,22	0,33	0,43	0,55	0,65
p = 10	Δ ₁	0,14	0,30	0,47	0,61	0,77	0,93
	Δ ₂	0,28	0,59	0,96	1,22	1,54	1,85
	ψ	0,08	0,17	0,27	0,35	0,44	0,53

Tableau A_{II-5} : Mesures et calculs (modèle 60 x 120)

F		1	2	3	4	5	6
	M_{ψ}	255	510	765	1020	1275	1530
p = 15	Δ_1	0,51	1,08	1,59	2,15	2,71	3,40
	Δ_2	1,01	2,16	3,18	4,29	5,41	6,81
	ψ	0,29	0,62	0,91	1,23	1,55	1,95
p = 20	Δ_1	0,44	0,93	1,36	1,78	2,30	2,74
	Δ_2	0,87	1,85	2,72	3,56	4,61	5,48
	ψ	0,25	0,53	0,78	1,02	1,32	1,57
p = 25	Δ_1	0,38	0,79	1,17	1,57	2,08	2,43
	Δ_2	0,77	1,57	2,34	3,14	4,15	4,85
	ψ	0,22	0,45	0,67	0,90	1,19	1,39
p = 30	Δ_1	0,33	0,72	1,06	1,38	1,71	2,11
	Δ_2	0,66	1,43	2,13	2,76	3,42	4,22
	ψ	0,19	0,41	0,61	0,79	0,98	1,21
p = 35	Δ_1	0,30	0,61	0,91	1,24	1,55	1,87
	Δ_2	0,59	1,22	1,82	2,48	3,11	3,74
	ψ	0,17	0,35	0,52	0,71	0,89	1,07
p = 40	Δ_1	0,28	0,58	0,84	1,13	1,38	1,69
	Δ_2	0,56	1,15	1,68	2,27	2,76	3,39
	ψ	0,16	0,33	0,48	0,65	0,79	0,97
p = 45	Δ_1	0,24	0,49	0,75	0,98	1,26	1,50
	Δ_2	0,49	0,98	1,50	1,95	2,51	3,00
	ψ	0,14	0,28	0,43	0,56	0,72	0,86

Fig A III-2 : Fonction de déplacement (Deleuze)

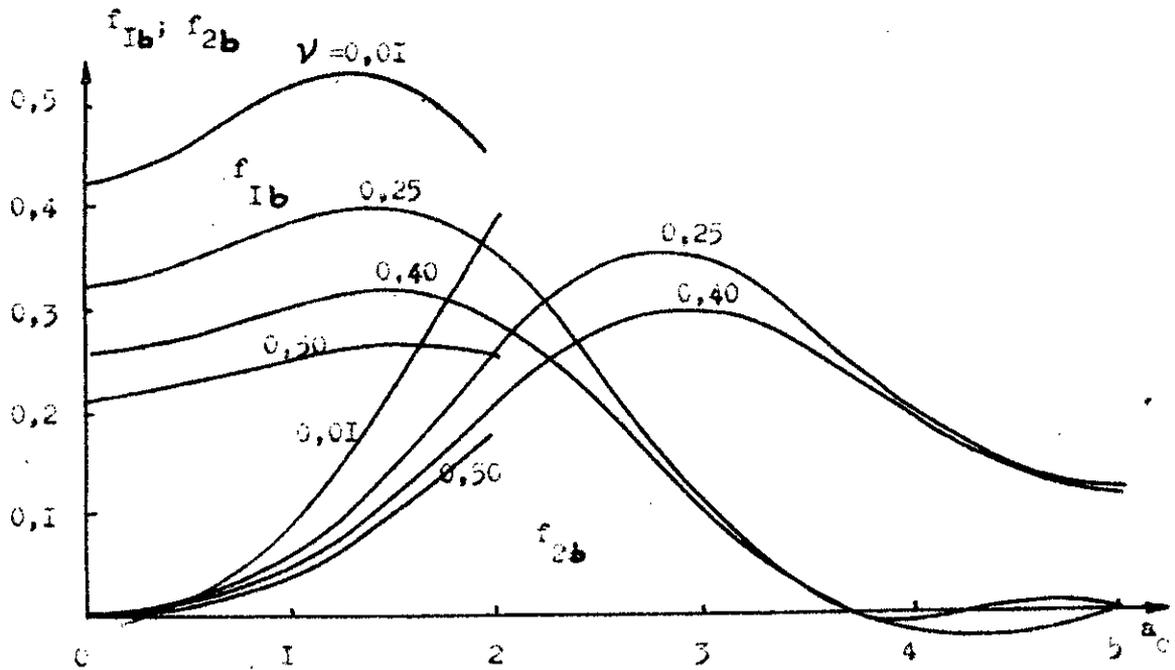


Fig A III-3 : Valeurs de K_2 et C_2 (Veletsos et Wei)

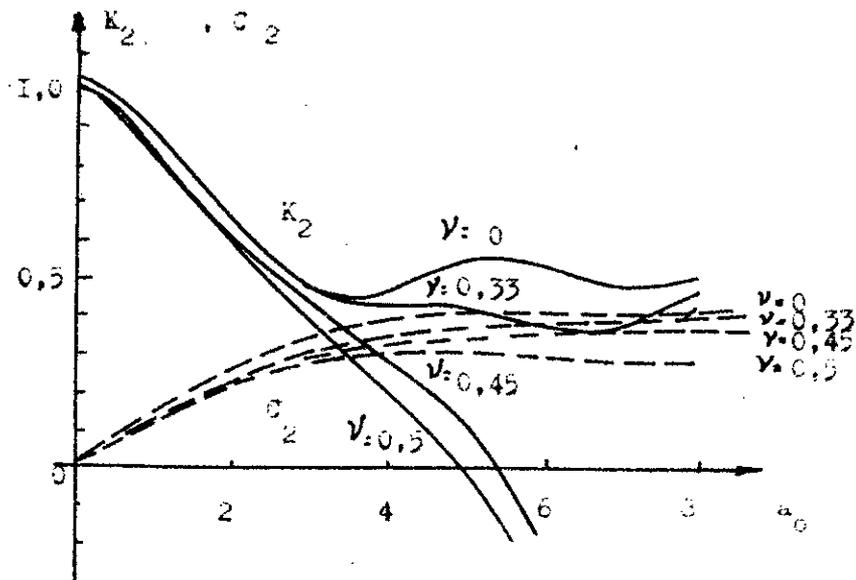


FIG A III-5 : Valeurs de f_{I_t} et f_{Z_t} (Luco et Westmann)

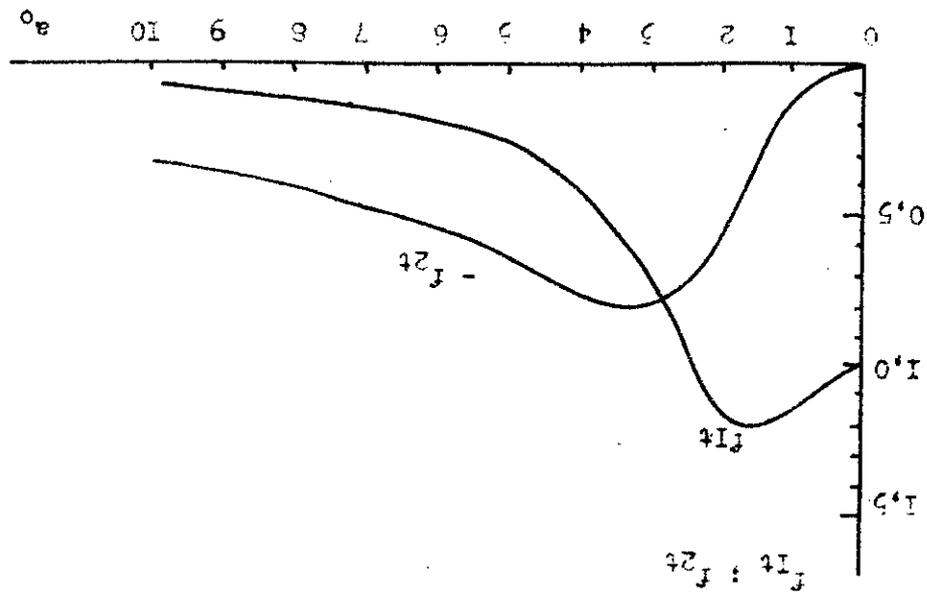


FIG A III-4 : Valeurs de f_{I_p} et f_{Z_p} (Luco et Westmann)

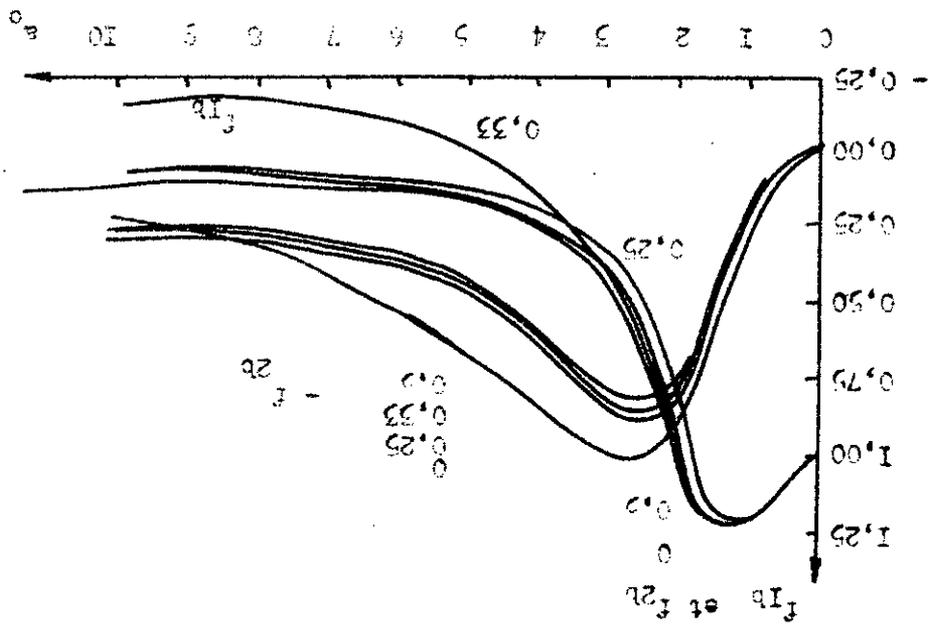
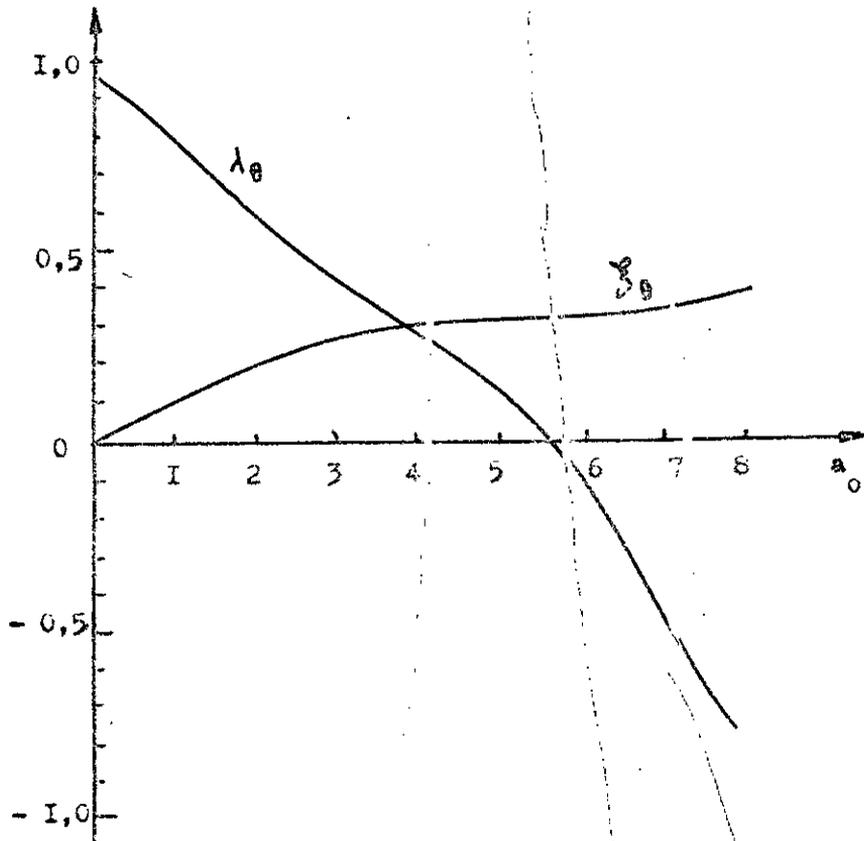
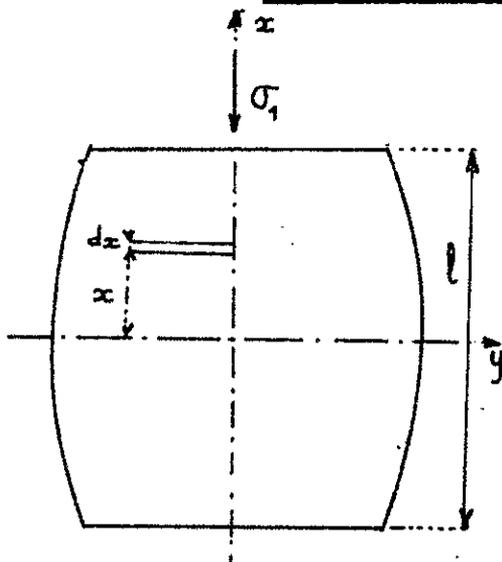


Fig A III-6 : Valeurs de λ_θ et ξ_θ (Veletsos et Jethro)



Calcul simplifié de la déformation " en tonneau " d'un

échantillon de caoutchouc



En supposant un bombement parabolique, on a pour chaque tranche horizontale une contrainte moyenne verticale σ_1 , et pour contrainte moyenne transversale σ_2 .

La déformation longitudinale est donnée par la formule A_{III-20} ci-après

établie selon la théorie d'élasticité soit :

$$e_l = - \frac{\sigma_1}{E} + 2\nu \frac{\sigma_2}{E} \quad (A_{III-20})$$

avec

ν : coefficient de Poisson

E : module d'élasticité

L'équilibre d'une tranche horizontale de faible épaisseur montre que la contrainte horizontale moyenne σ_2 est due au cisaillement différentiel horizontal de x à $x + dx$, donc proportionnelle à la déviation le long des faces latérales $\frac{dy}{dx}$ en admettant une dilatation uniforme.

En section milieu $\frac{dy}{dx} = 0$ pour $x = 0$ par suite, la contrainte transversale sur l'axe $\sigma_2 = 0$

Comme la déformation latérale est supposée parabolique, on admet une équation de la forme $y = A x^2 + B$ d'où $\frac{dy}{dx} = 2Ax$.

La dérivé varie linéairement de $x = 0$ à $x = \frac{1}{2}$ σ_2
 varie également selon une loi linéaire de 0 à $\sigma_{2 \text{ max}}$ pour $x = \frac{1}{2}$.

Or, sur les faces extrêmes, la dilatation latérale $e_I = e_2 = 0$
 d'où

$$e_2 = -\frac{\sigma_2}{E} + \nu \frac{(\sigma_1 + \sigma_2)}{E} \quad (A_{III-21})$$

d'où

$$\sigma_2(1-\nu) = \nu \sigma_1 \quad (A_{III-22})$$

et avec

$$\nu = 0,5 \quad \sigma_2 = \sigma_1 \quad (A_{III-23})$$

Donc σ_2 varie linéairement de 0 sur les faces extrêmes à
 au milieu, d'où la dilatation

$$e_I = -\frac{\sigma_1}{E} + \frac{2\nu}{E} \sigma_2 \quad \text{varie également linéairement avec pour}$$

valeur moyenne $e_{I \text{ moy}} = -\frac{1-\nu}{E} \sigma_1 = -\frac{\sigma_1}{2E} \quad (A_{III-24})$

avec $\nu = 0,5$

Déplacement total du plateau :

$$\Delta l = 2 \int_0^{1/2} e_I dx \quad (A_{III-25})$$

comme e_I varie linéairement, on peut prendre

$$e_{I \text{ moy}} = -\frac{\sigma_1}{2E} \quad (A_{III-26})$$

$$\Delta l = -2 \frac{1}{2} \frac{\sigma_1}{2E} = -\frac{l \sigma_1}{2E} \quad \text{d'où} \quad E = \frac{1}{2} \frac{|\sigma_1|}{\Delta l/l} \quad (A_{III-27})$$

Le module d'élasticité réel est ainsi sensiblement égal à la moitié du
 module apparent $\sigma_1/e_{I \text{ moy}}$.

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

- 1 . BUZDUCAN "Dynamique des fondations de machines"
Edition Eyrolles ;:.....Paris 1972
- 2 . G. N. BYCROFT "Forced vibrations of a rigid circular plate on a semi
infinite élastique space and on an élastique stratum " 1956
Philosophical trans royal société , London vol. 248 pp 327
- 3 . T. K. HSIEN "Foundation vibrations "
Proc. Instit. of Gen. Civ. Eng. Vol. 221962
- 4 . E. REISNER & H. P. SAGOZI " Forced torsional oscillation of an élas-
tic half space "
J. of Appl. Phys. Vol. 15 pp 652-662:.....1944
- 5 . M. I. GORBUNOV-POSSADOV " Design of structures upon élastique fonda-
tions "
Proc. 5 th ICSMFE Vol. I pp 643-648.....1961
- 6 . D. D. BARKAN - " Dynamics of bases and foundations "
Mc Graw-Hill Book Co N. Y. U.S.A.....1962
- 7 . P. BONNEVILLE & L. TZENOV - " Calcul des structures parasismiques"
S.N.E.D. (édition en cours)
- 8 . Z. DJILLALI BERKANE-- " Influence du deuxième mode de vibration sur
le comportement sismique des structures rigides sur sol
meuble élastique "
Thèse de magister E.N.P.A./.....1964
- 9 . J. E. LUCO , H. L. WONG & M. D. TRIFUNAC - " A note on dynamic res-
ponse of rigid embedded foundations "
Earth. Eng. and Struc. Dyn. Vol 4 pp 119-127 U.S.A. 1975
10. Y. O. BEREDUGO & M. NOVAK - "Coupled horizontal and rocking vibration
of embedded footings "
Canadian géotéchnical journal vol. 91972

11. F. E. RICHART , J. R. HALL & R. D. WOODS - "Vibrations of soil and foundations "
Prentice Hall N. J. :.....U.S.A. ...1970
12. A. S. VELETSOS & Y. T. WEI - "Latéral and rocking vibration of footings "
J. of the soil mécha. and found. div. :.....1971
13. B. LUCO & R. A. WESTMAN - "Dynamic response of circular footings"
A.S.C.E. J. Eng. Méch. Div. EM 5 /.....1971
14. A. VELETSOS & JETHRO , W. MEEK - "Dynamic behaviour of building foundation système "
Earth. Eng. and Struc. Dyn. Vol. 3 pp 121-138 ...1974
15. M. NOVAK & K. SACHA - "Torsional and coupled vibrations of embedded footings "
J. Earth. Eng. Struc. Dyn. :.....1973
16. G. DELEUZE - "Réponse à un mouvement sismique d'un édifice posé sur un sol élastique "
Suppl. Ann. I.T.B.T.P. N° 154 :.....1967
17. R. V. WHITMAN AND F. E. JR. RICHART -"Design procedures for dynamically loaded foundations "
J. Soil Mech. and Found. Dyn. SM 6 V 93 :1967
18. FILLIAT - "La pratique des sols et fondations " ch . 19 & 20
19. J. LYSMER - " Vertical motion of rigid footings "
Dépt. of civil eng. univ. of Michigan :.....1966
20. J. LYSMER & F. E. RICHART - " Dynamic response of footings to vertical loading "
J. Soil Mech. and Found. Vol. 92 SM I :.....1966
21. I. A. ROBERTSON - " Forced vertical vibration on a rigid circular disk on a semi infinite élastic solid "
Pro. Cambridge Philos. Society Vol . 621966

22. A. S. VELETSOS & VEBRIC - " Vibration of viscoélastic foundations "
Earth. Eng. and Struc. Dyn. Vol. 2 :.....1973
23. J. E. LUCO - " Impédance function for a rigid foundation on a layered médium "
Nucléar Eng. and Désign:1974
24. N. M. NEWMARK & E. ROSENBLUTH - " Fondamentals of earthquake engineering "
Prentice Hall :1971
25. J. E. LUCO & A. H. HADJIAN & H. D. BOSS - " The dynamic modéling of the half plane by finite éléments "
Nucléar Eng. and Design 38 :.....1974
26. M. GHAFFAR ZADEH - " Modèles de fonctions d'impédance constantes "
Thèse Dr. Ing. E.C.P. :.....1982
27. J. E. LUCO - " Torsional response of structures to obliquely incident seismic SH waves "
Earth. Eng. and Struc. Dyn. Vol. 4 :1976
28. J. R. HALL - " Coupled rocking and sliding oscillation of rigid circular footings "
Int. Symp. on waves propagation and dynamic properties of Earth. Mat. Mexico :1967
29. A. H. HADJIAN & G. E. HOWARD & C. B. SMITH - " A comparaison of expérimental and théoretical investigations of embedment effects on seismic response "
SMIRT :.....1975
30. A. CAPRA & V. DAVIDOVICI " " Calcul dynamique des structures en zone sismique "
Edition Eyrolles :.....1980
31. R. W. CLOUTH & J. PENZIEN - " Dynamique des structures "
Edition Pluralis ;.....1980

32. F. CHAPEL - "Application de la méthode des équations intégrales à
la dynamique des sols-structures sur pieux "

Thèse Dr. Ing. E.C.P. :.....1961

33. A. CHERRARED - " Etude expérimentale des rigidités du sol pour les
fondations rectangulaires enterrées soumises à des mou-
vements de translation "

Thèse de magister E.N.P. :.....1966