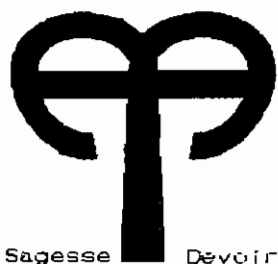


REPUBLIQUE DU SENEGAL
UNIVERSITE CHEIKH ANTA DIOP
ECOLE POLYTECHNIQUE DE THIES
DEPARTEMENT DU GENIE CIVIL



GC.0176

PROJET DE FIN D'ETUDES
en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur de conception

TITRE : TOITURE SPHERIQUE EN GEOBETON

AUTEUR : Coffi Clément SOUDE

DIRECTEUR INTERNE : M. Moustapha NDIAYE

DATE : Août 1993

DEDICACE

A tous ceux qui ont fait de moi ce que je suis

REMERCIEMENTS

Je remercie sincèrement tous ceux qui m'ont aidé dans la réalisation de ce projet.

SOMMAIRE

Ce rapport commence en introduction par l'origine du GÉOBÉTON et l'intérêt du choix de la toiture sphérique.

Nous avons présenté au chapitre I, la théorie de base qui sous-tend le développement de l'élément coque à effet de membrane.

Le chapitre II de ce rapport est consacré à une revue des propriétés géotechniques de la latérite, qui est la principale composante du géobéton. Les conditions limites d'utilisations de cette forme de toiture et dans ce type de matériau, sont déterminées, entre autres paramètres, en fonctions des résistances mécaniques du géobéton : **rupture par traction , par compression ou encore par flambage.**

Le chapitre III concerne l'analyse semi-automatique de l'ossature du bâtiment qui est composée de **quatre poutres circulaires** supportant directement la toiture et qui reposent, quant à elles, sur **quatre autres poteaux.**

Au chapitre IV nous avons essayer de rendre cette analyse plus facile avec un **Programme d'ordinateur écrit en langage TURBO Pascal.** nous y avons présenter également le mode d'utilisation très simple de ce programme.

Le chapitre V présente un bref aperçu du logiciel **IMAGES-3D : logiciel de calcul de structures par la Méthode des Eléments Finis.**

Le chapitre VI traite du dimensionnement complet d'un cas de bâtiment que nous avons choisit.

Ce rapport est terminé au chapitre VII par une conclusion et des recommandations sur le géobéton, et la technique de construction de la technique sphérique.

T A B L E D E S M A T I E R E S

MATIÈRESPAGES

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

0.1	DE LA LATÉRITE AU GÉOBÉTON	1
0.2	COUPOLE SPHERIQUE SOUS CHARGES	2
0.21	coupole et arc	3
0.22	coupole surbaissée	3
0.23	coupole surhaussée	4

C H A P I T R E I : T H E O R I E D E S E F F O R T S M E M B R A N A I R E S

1-2	GÉOMETRIE DES COQUES	6
1.3	CHARGEMENTS INTERNES	7
1.4	CHARGEMENTS EXTERNES	9
1.5	CONDITIONS D'ÉQUILIBRE	10
1.6	EQUATIONS SPECIFIQUES A LA SPHERE	13
1.7	RESOLUTION POUR LES EFFORTS MEMBRANAIRES	14

C H A P I T R E I I : C A R A S T E R I S T I Q U E S M E C A N I Q U E S D U G E O B E T O N

2.1	LES PROPRIÉTÉS DU GÉOBÉTON	17
2.2	LES PROPRIÉTÉS DE LA LATÉRITE	17

2.2.1	Teneur en eau à l'optimum PROCTOR (w_{opt})	17
2.2.2	Analyse granulométrique	18
2.2.3	Les limites de consistance d'ATTERBERG	19
2.2.4	Essai Los Angeles	20
2.2.5	Récapitulation des propriétés.....	20
	de la latérite brune de THIES	
2.3	RESISTANCE A LA COMPRESSION ET A LA TENSION DU GÉOBETON	20
2.4	RELATIONS ENTRE LES RESISTANCES DU GÉOBETON ET LES PARAMETRES DU DOME SPHERIQUE	22
2.4.1	Stabilité.....	23
2.5	EXEMPLE DE CALCUL.....	25
CHAPITRE III : ANALYSE STRUCTURALE DU BATIMENT		
3.1	DEFINITION DU BATIMENT.....	26
3.2	CHARGEMENT DES POUTRES.....	27
3.2.1	Relation entre ϕ et α	27
3.2.2	Relation entre θ et α	28
3.2.3	Détermination du poids propre (α).....	28
3.2.4	Chargement de la poutre de rayon a	28
3.3	ANALYSE STRUCTURALE.....	30
3.3.1	Equations d'équilibre	32
3.3.1.1	Système de coordonnées globales (X Y Z).....	32
3.3.1.2	Système de coordonnées locales.....	35

3.3.1.2 a	Poutre a.....	35
3.3.1.2.b	Poteaux.....	38
3.3.2	Application du théorème de CASTIGLIANO.....	40
3.3.3	Détermination des réactions.....	44
3.3.4	Détermination des efforts internes	45
	dans les poutres et poteaux	

CHAPITRE IV : PROGRAMMATION

4.1	BUT DE LA PROGRAMMATION.....	46
4.2	MODE D'UTILISATION DU PROGRAMME.....	47
4.2.1	Menu Principal.....	47
4.2.1.1	Fichiers	47
4.2.1.1.1	Spécification sur le fichier des données.....	48
4.2.1.2	Propriétés du matériau de la	49
	toiture dôme	
4.2.1.3	Propriété du matériau	49
	des poutres et poteaux	
4.2.2.4	La Géométrie du dôme.....	50
4.2.2.5	Propriétés de section de la poutre	50
	sur la longueur du bâtiment	
4.2.2.6	Propriétés de section de la poutre	51
	sur la largeur du bâtiment	
4.2.2.7	Propriétés de section des poteaux	51

4.2.2.8	EXECUTION.....	51
---------	----------------	----

CHAPITRE V : BREF APERCU SUR IMAGES 3D

5.1	INTRODUCTION.....	52
5.2	GEOMETRIE.....	53
5.2.1	Créer/Editer une Geometrie.....	53
5.2.1.1	Définir les propriétés du matériau.....	54
5.2.1.2	Définir les noeuds.....	54
5.2.1.3	Définir les éléments.....	55
5.2.1.3.1	Définir les poutres.....	55
5.2.1.3.2	Définir les éléments plaques.....	56
5.2.1.4	Définir les propriétés de section.....	57
5.2.1.5	Définir les conditions d'appuis.....	59
5.3	ANALYSE STATIQUE.....	60
5.3.1	Définir les chargements.....	60
5.3.1.1	Définir le numéro du chargement.....	60
5.3.1.2	Titrer les chargements.....	61
5.3.1.3	Définir les charges concentrées.....	61
5.3.2	Matrice de rigidité.....	62
5.3.3	Déplacements.....	62
5.3.4	Calcul des Efforts, Contraintes, et Réactions.....	62

CHAPITRE VI : DIMENSIONNEMENT

CHAPITRE VI : DIMENSIONNEMENT

6.1	DONNEES.....	63
6.2	Résultats de l'analyse du Poids Propre par le programme TOITSD	64
6.3	Détermination des efforts due à la surcharge	65
6.4	CALCUL D'ARMATURES DES POUTRES.....	66
6.4.1	Armature de flexion.....	66
6.4.1.1	Moment M_x	66
6.4.1.2	Moment M_y	67
6.4.1.3	Effort tranchant.....	68
6.4.1.4	Effort normal.....	69
6.5	CALCUL D'ARMATURES DU POTEAU.....	71
6.5.1	élancement.....	71
6.5.2	Vérification du type de poteau.....	71
6.5.3	utilisation du diagramme d'interaction.....	71
6.5.4	Vérification des étriers.....	72
6.6	CALCUL D'ARMATURES DES SEMELLES.....	73
6.6.1	Effort de compression.....	73
6.6.2	Calcul de la surface de semelle requise.....	73
6.6.3	Calcul de la pression q_s	74
6.6.4	Calcul du moment fléchissant et de l'armature requise	75
	Schéma de ferrailage d'ensemble.....	77

CHAPITRE VII: CONCLUSION ET RECOMMANDATION

7.1 Conclusion et recommandations.....78

ANNEXE A

Listing du programme TOITSD.....A1-A35

Listing du programme CHARGESD.....A36-A44

ANNEXE B

Résultats de CHARGESD.....B1-B5

Résultats de TOITSD.....B6-B9

ANNEXE C

Tableaux de dimensionnements.....C1-C6

ANNEXE D

Propriétés de la latérite.....D1-D2

Résultats de IMAGES-3D.....D3-D12

REFERENCES.....

LISTE DES FIGURES ET TABLEAUX

- Fig 0.21 : Contraintes sur les méridiens d'une coupole.
- Fig 0.22 : Déformation d'une coupole surbaissée.
- Fig 0.23 : Déformation sous poids propre d'une coupole surhaussée.
- Fig 1.11 : Définition d'une coque; épaisseur et surface moyenne.
- Fig 1.12 : Coque de révolution.
- Fig 1.31 : Contraintes dans un élément de coque.
- Fig 1.41 : Composantes du poids propre.
- Fig 1.51a : Efforts membranaires.
- Fig 1.51b : Élément différentiel de coque.
- Fig 1.51c : Les forces internes dans un élément différentiel de coque.
- Fig 1.52 : Sections de coque de révolution montrant les forces.
- Fig 1.71 : Diagramme des efforts membranaires.
- Fig 2.211 : Courbe de compactage.
- Fig 2.223 : Les limites d'Atterberg.
- Fig 2.251 : Les caractéristiques de la latérite et du géobéton.
- Fig 2.41 : Angle ϕ_v .
- Fig 3.1 : Toiture en coupole surbaissée.
- Fig 3.21 : Relation entre α et ϕ .
- Fig 3.22 : Relation entre α et θ .
- Fig 3.241 : Chargement résultant sur la poutre A.
- Fig 3.31a : Efforts tranchants dus à f_1 .
- Fig 3.31b : Efforts tranchants dus à q_1 .

-
- Fig 3.32 : Idérialisation complète de l'ossature.
- Fig 3.312a : Efforts internes dans la poutre A.
- Fig 3.312b : Efforts internes dans la poutre B.
- Fig 3.312c : Effort internes dans le poteau.
- Fig 4.224 : Plus grande hauteur du mur sur la largeur.
- Fig 4.225 : Section de poutre.
- Fig 5.2131 : Définition d'un élément poutre.
- Fig 5.2132 : Définition d'un élément plaque.
- Fig 5.214 : Détermination de J et C_{tors} .
- Fig 5.215 : Types d'appuis.
- Fig 5.41 : Effort dans un arc encastré.
- Fig 5.42 : Armature des poutres.
- Fig 5.51 : Armature des poteaux.
- Fig 5.61 : Armature des semelles.

LISTE DES SYMBOLES

(on trouvera dans le texte, la définition des autres symboles utilisés et qui ne figure pas dans cette liste).

CHAPITRE I

N_{θ} : effort membranaire suivant un parallèle

N_{ϕ} : effort membranaire suivant un méridien

$N_{\phi\theta}$: cisaillement suivant un méridien

$N_{\theta\phi}$: cisaillement suivant un parallèle

P_x : composante du poids propre dans la direction X

P_y : composante du poids propre dans la direction Y

P_z : composant du poids propre dans la direction Z

dA : élément différentiel de surface

R : rayon de la sphère

P : charge par m^2

CHAPITRE II

w_{opt} : teneur en eau à l'optimum Proctor

$w\%$: teneur en eau naturelle

w_L : limite de liquidité

w_p : limite de plasticité

I_L : indice de liquidité

R_T : résistance à la traction du géobéton

R_C : résistance à la compression du géobéton

ϕ_{θ} : indique le plus bas parallèle

CHAPITRE III

α : position sur la poutre A

β : position sur la poutre B

a : rayon de la poutre A

b : rayon de la poutre B

f_1 (resp. f_2)

g_1 (resp. g_2)

h_1 (resp. h_2)

N_i : effort axial au noeud i

V_i : effort tranchant suivant Y au noeud i

Q_i : effort tranchant suivant Z au noeud i

M_{z_i} : moment autour de Z au noeud i

M_{y_i} : moment autour de Y au noeud i

M_{x_i} : moment autour de X au noeud i

N_a, N_b, N : effort axial dans les repères locaux des poutres A, et B et du poteau

V_a, V_b, V : effort tranchant suivant Y dans les repères locaux des poutres A, et B et du poteau

Q_a, Q_b, Q : effort tranchant suivant Z dans les repères locaux des poutres A, et B et du poteau

M_{az}, M_{bz}, M_z : Moment autour de Z dans les repères locaux des poutres A et B et du poteau

M_{ay}, M_{by}, M_y : Moment autour de Y dans les repères locaux des poutres A et B et du poteau

M_{ax}, M_{bx}, M_x : Moment autour de X dans les repères locaux des poutres A et B et
du poteau

CHAPITRE VI

N_f : effort axial pondéré

V_f : effort tranchant pondéré

M_f : moment fléchissant pondéré

A_s : section d'armature

A_g : section totale de béton

q_a : pression admissible sur le sol

f_c : valeur de la résistance à la compression du béton à 28 jours

f_y : valeur de la résistance à la traction de l'acier

l_d : longueur de développement

INTRODUCTION

0.1 DE LA LATÉRITE AU GÉOBÉTON

L'AFRIQUE est un continent qui regorge d'immenses gisements de latérites. Mais cette ressource naturelle n'était utilisée jusqu'à une époque récente que dans les villages ou par les populations à faibles revenus. Ce comportement trouve aisément son explication quand on fait une analyse de la capacité mécanique du matériau à résister à certains types de sollicitations tel la **FLEXION** dont le corollaire indésirable est la **TRACTION**. En effet la gâchée de **Latérite Brute** ne peut répondre que de façon catastrophique à une sollicitation en flexion. Par contre lorsque ce matériau est sollicité en compression, il offre une capacité résistante non négligeable. L'histoire montre que nos arrière-grands-parents ne l'utilisaient pour la plus part, que pour réaliser les murs de leur "case" qui ne supportent d'ailleurs que de la paille ou encore quelques feuilles de tôles ondulées avec l'avènement des colonisateurs.

Cette pratique consistant à utiliser la latérite comme matériau de construction ne constitue actuellement que la seule alternative envisageable pour de nombreuses régions sur le globe.

L'on perçoit dès lors l'importance de la latérite qui, ces dernières années, a fait l'objet de nombreuses recherches parmi lesquelles son utilisation un peu plus "osée" après stabilisation : ce qui donne le **GÉOBÉTON**.

Le géobéton consiste donc en une amélioration du comportement de la latérite pour une plus grande utilisation.

Si de plus on donne une forme adaptée aux structures réalisées dans ce matériau, elles acquièrent davantage de résistance.

Les formes les plus appropriées qui sont connues pour ces structures à résistance de forme sont:

les coupôles sphériques, les ellipsoïdes et paraboloides de révolutions, les paraboloides elliptiques pour ne citer que celles-là.

Le but ce projet de fin d'études, est d'étudier l'utilisation de la coupôlé sphérique comme toiture de bâtiment. Pour mieux comprendre le choix de cette forme de surface, nous expliquerons brièvement les mécanismes par lesquelles, elle résiste aux charges qui lui sont appliquées.

0.2 COUPOLE SPHERIQUE SOUS CHARGES

L'action structurale d'une coupôle sphérique supportée sur la totalité de son pourtour et soumise à l'action de charges verticales **symétriques** par rapport à son axe (comme par exemple le poids propre) est une conséquence de ces caractéristiques géométriques. Dans ces voiles à axe de **symétrie**, les sections méridiennes et les sections perpendiculaires aux méridiens sont à la fois les sections de courbure principale et les sections de contrainte principale. Les contraintes sur ces sections sont des contraintes de traction simple ou de compression simple, réparties uniformément à travers leur faible épaisseur.

La figure 0.21 représenté les contraintes développées au droit d'un parallèle ; ce sont des contraintes de **compression** dans la direction du méridien, constantes

le long du parallèle parce que coupole et charges sont symétriques par rapport à l'axe. Chaque méridien se comporte comme s'il était l'arc funiculaire des charges appliquées, c'est-à-dire qu'il transfère les charges sans développer de contraintes de flexion.

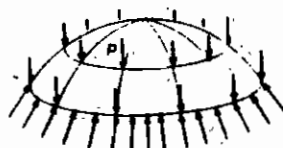


Fig D.21 : Contraintes sur les
méridiens d'une coupole.

0.21 COUPOLE ET ARC

Alors que les arcs ne sont funiculaires que pour une seule série de charges, les méridiens d'une coupole sont au contraire, funiculaires pour une série quelconque de charges symétriques. Cette différence essentielle dans le comportement structural est due au fait que, alors que les arcs isolés ne possèdent aucun appui latéral, les méridiens de la coupole sont soutenus par les parallèles qui freinent leur mouvement latéral en développant des contraintes de frettage. Par suite de son comportement funiculaire sous l'action d'une série quelconque de charges symétriques, une coupole ne change pas de forme pour s'adapter à des variations de charges.

0.22 COUPOLE SURBAISSEE

La participation des parallèles dans le comportement funiculaire de la coupole est mise en évidence par les déformations des méridiens sous l'action de la charge. Dans une coupole surbaissée, ou à faible hauteur sous clé, les méridiens

s'infléchissent sous la charge et, ce faisant, se déplacent vers l'intérieur c'est-à-dire vers l'axe de la coupole (fig 0.22).

Ce mouvement s'accompagne d'un raccourcissement des parallèles dont le rayon diminue. Les parallèles sont comprimés et leur résistance restreint fortement la liberté de mouvement des méridiens vers l'intérieur. Autrement dit, une coupole surbaissée à axe de symétrie peut être considérée comme jouant le rôle d'une série d'arcs funiculaires méridiens supportés de façon élastique par les parallèles. Elle développe des contraintes de compression à la fois le long des méridiens et, en théorie tout au moins, peut être construite avec des matériaux incapables, comme de la maçonnerie ou de brique, de développer des contraintes de traction.

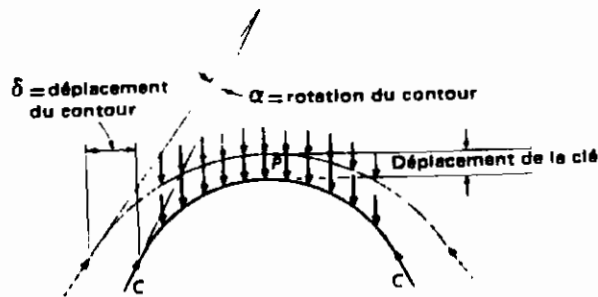


Fig 0.22 : Déformation d'une coupole surbaissée.

0.23 COUPOLE SURHAUSSEE

Lorsque la coupole est surhaussée, les points de sa partie supérieure se meuvent vers l'intérieur sous l'action des charges, mais ceux de sa partie inférieure se déplacent vers l'extérieur, c'est-à-dire s'éloignent de l'axe (fig 0.23). Les parallèles de la partie haute se raccourcissent tandis que ceux de la partie basse s'allongent et développent des contraintes de traction qui à nouveau limitent

le mouvement des méridiens. Selon le type de charge, un certain parallèle ne subit pas de modification de longueur alors que tous ceux situés au-dessus développent une compression et tout ceux au-dessous une traction, comme nous le verrons dans le chapitre I.

Dans une coupole sphérique soumise à son poids propre, le parallèle faisant un angle de 52° par rapport à l'axe ne change pas de longueur.

Sous une charge répartie uniformément sur la projection horizontale de la coupole, le parallèle ne subissant pas de contrainte se trouve à 45° par rapport à l'axe.

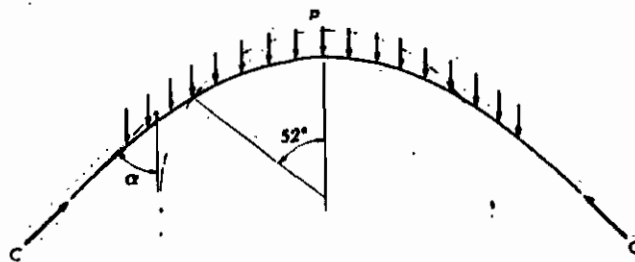


Fig 0.23 : Déformation sous poids propre d'une coupole surhaussée.

Puisque les contraintes développées par une coupole sont purement des contraintes de compression et de traction avec de faible déformation, les coupoles sphériques ont une rigidité particulièrement élevée.

La rigidité des coupoles sphériques explique pourquoi leur épaisseur peut être ramenée à des valeurs faibles; des rapports portée/épaisseur de l'ordre de 300 ou davantage sont courants.

CHAPITRE I :

THEORIE DES EFFORTS MEMBRANAIRES

1-2 GEOMETRIE DES COQUES

La géométrie d'une coque est entièrement définie par la spécification de la forme de sa surface moyenne et de son épaisseur en tout point (voir figure 1.11).

Pour décrire la forme de la surface de référence, il est nécessaire de présenter quelques unes des propriétés géométriques d'une surface de révolution.

(Pour plus de détails consulter un manuel d'analyse vectoriel)

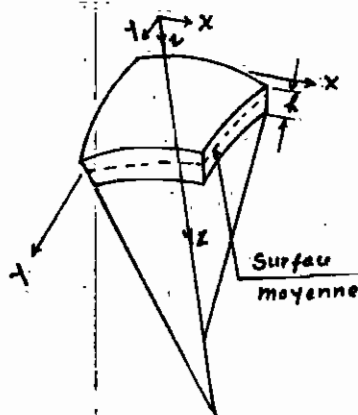


Fig 1.11 : Définition d'une coque: épaisseur et surface moyenne.

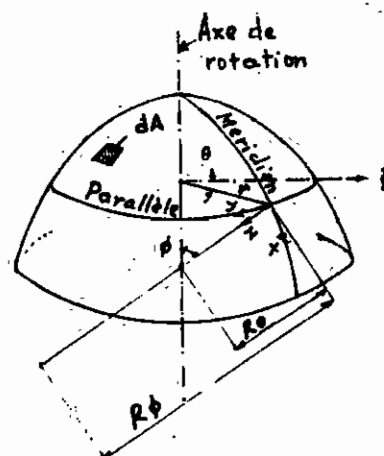


Fig 1.12 : Coque de révolution.

Dans l'ingénierie des coques minces, la coque dont la surface de référence est une surface de révolution a été largement étudiée. La présente discussion est consacrée à ce type de coque en vue d'en déduire le cas de la coupole sphérique qui est l'objet de ce projet.

Une surface de révolution est obtenue par la rotation d'une courbe plane par rapport à un axe inscrit dans le plan de la courbe. Cette courbe est appelée le

MERIDIEN et son plan, le plan du méridien.

Les intersections de sa surface avec les plans perpendiculaires à l'axe de rotation sont des courbes parallèles et sont appelées, les PARALLELES.

Pour une telle coque, ses principales courbures sont ses méridiens et parallèles. (voir figure 1.12)

ϕ = angle entre l'axe de la coque et la normale au point considéré de la surface moyenne.

θ = angle entre deux points sur le même parallèle, par rapport à l'axe de rotation

R_ϕ = rayon de courbure du méridien.

R_θ = longueur de la normale entre l'axe de rotation et un point de la surface moyenne

r = rayon de courbure des parallèles : $r = R_\theta \sin \phi$.

R_ϕ et R_θ sont les principaux rayons de courbures de la surface.

h est l'épaisseur de la coque.

1.3 CHARGEMENTS INTERNES

Considérons la figure 1.31:

Le calcul sera illustré par la détermination de N_ϕ .

Coupons une tranche d'épaisseur dz parallèlement à la surface de référence de l'élément différentiel de coque à la position z dans la direction perpendiculaire à la surface moyenne comme indiqué sur la figure.

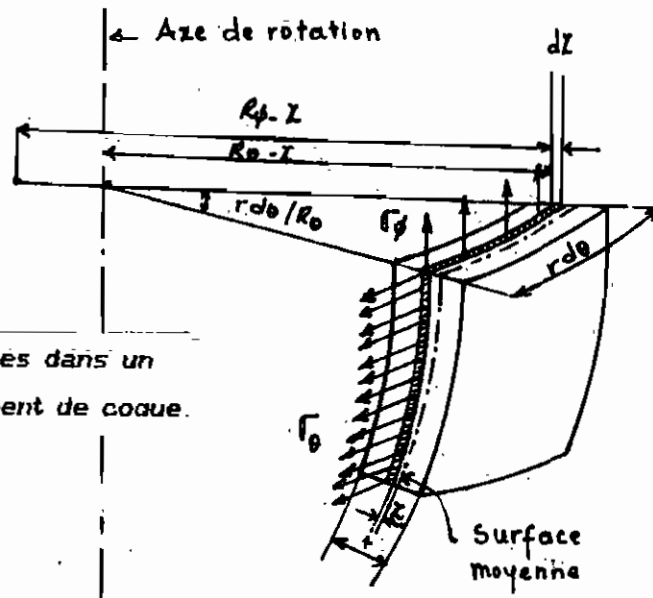


Fig 1.31 : Contraintes dans un élément de coque.

Cet élément est vu sous l'angle

$$\frac{r \, d\theta}{R_0}$$

$r \, d\theta$ étant la longueur d'arc externe de l'élément différentiel de coque.

La distance de l'axe de rotation à la tranche étant :

$$R_0 - z,$$

la longueur d'arc de la tranche est alors :

$$\sigma_\phi (R_0 - z) \frac{r \, d\theta}{R_0}$$

L'intégrale de la résultante sur toute l'épaisseur de l'élément différentiel de coque et par unité de longueur (c'est-à-dire en divisant par $ds = R_0 \, d\theta$) donne :

$$N_\phi = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_\phi (R_0 - z) \frac{r \, d\theta}{R_0} dz \quad (1.1)$$

Dans le cas des coques minces, l'épaisseur étant petite par rapport aux autres dimensions,

$\frac{z}{R_\theta}$ est négligeable, et N_ϕ devient :

$$N_\phi = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_\phi dz \quad (1.2a)$$

D'une manière analogue on trouve respectivement (1.2b), (1.2c), (1.2c) :

$$N_\theta = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_\theta dz \quad ; \quad N_{\theta\phi} = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_{\theta\phi} dz \quad ; \quad N_{\phi\theta} = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_{\phi\theta} dz$$

1.4 CHARGEMENTS EXTERNES

Le chargement externe consiste au poids propre de l'élément différentiel. (La surcharge sera considérée distribuée de la même manière que le poids propre; une règle de trois incluant les résultats de l'analyse du poids propre, permettra alors d'évaluer son effet.)

L'aire de l'élément différentiel de coque est :

$$dA = (r d\theta \times R_\phi d\phi)$$

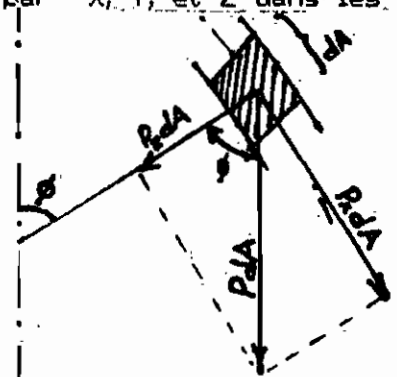
Les composantes du chargement externe sont désignées par X, Y, et Z dans les directions x, y, et z respectivement.

$$Z = P_z dA = P_z (r d\theta \times R_\phi d\phi) \quad (1.3a)$$

$$X = P_x dA = P_x (r d\theta \times R_\phi d\phi) \quad (1.3b)$$

$$Y = P_y dA = P_y (r d\theta \times R_\phi d\phi) \quad (1.3c)$$

Fig 1.41 : Composantes du poids propre.



TOITURE SPHERIQUE EN GEBETON

1.5 CONDITIONS D' EQUILIBRE.

Dans ce paragraphe, nous allons déterminer les conditions d'équilibre de l'élément différentiel de coque sous charges externes.

Pour déterminer les efforts membranaires, les équations d'équilibre

$$\sum F_x = 0, \sum F_y = 0, \sum F_z = 0, \sum M_x = 0, \sum M_y = 0, \sum M_z = 0 \quad (1.5)$$

suffissent, l'élément étant alors statiquement déterminé.

Les efforts membranaires sont représentés sur la figure suivante

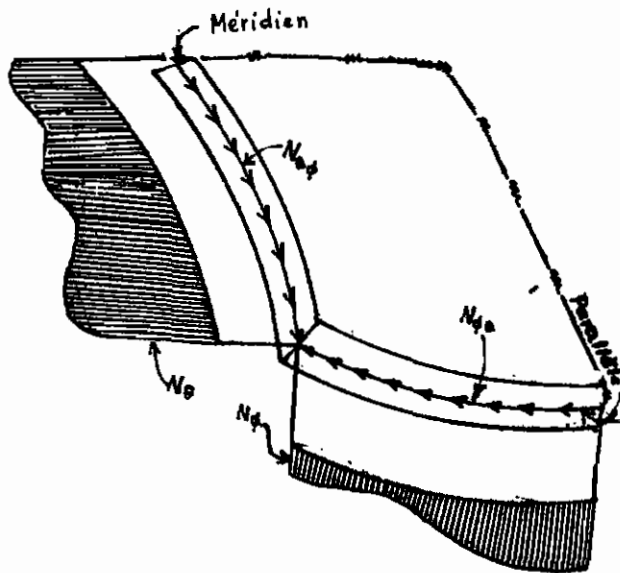


Fig 1.51a : Efforts membranaires

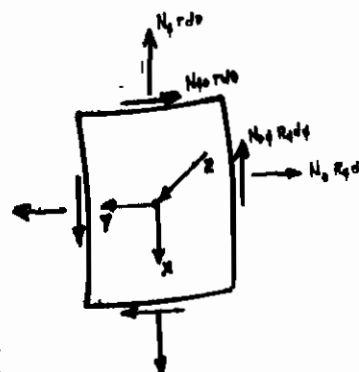


Fig 1.51c : Les forces internes dans un élément différentiel de coque.

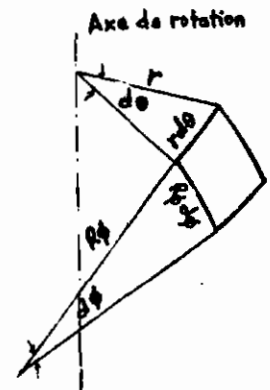


Fig 1.51b : Elément différentiel de coque.

Les équations $\sum M_x = 0$ et $\sum M_y = 0$ sont toujours satisfaites, car il n'y a pas de forces qui produisent de moments autour des axes x et y.

$$\sum M_z = 0 \Rightarrow N_{\phi r} d\theta R_f d\phi - N_{\theta f} r d\theta R_f d\phi = 0$$

en négligeant les différences d'ordre supérieur 1.

$$\Rightarrow N_{\phi\theta} = N_{\theta\phi} \quad (1.6)$$

$$\begin{aligned} \sum F_x = 0 &= N_{\phi r} d\theta + N_{\phi r} d\theta + \frac{\partial}{\partial \phi} (N_{\phi r} d\theta) d\phi \\ &= N_{\theta\phi} R_f d\phi + N_{\theta\phi} R_f d\phi + \frac{\partial}{\partial \theta} (N_{\theta\phi} R_f d\phi) d\theta \\ &= N_{\theta} R_f d\phi d\theta \cos\phi + P_x r d\theta R_f d\phi = 0; \end{aligned} \quad (1.7)$$

ce qui conduit à :

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \phi} (N_{\phi r} d\theta) d\phi + \frac{\partial}{\partial \theta} (N_{\theta\phi} R_f d\phi) d\theta \\ N_{\theta} R_f d\phi d\theta \cos\phi + P_x r d\theta R_f d\phi = 0; \end{aligned} \quad (1.8)$$

La figure 151 explique l'origine du troisième terme de cette dernière équation

$$\begin{aligned} \sum F_y = 0 &= N_{\theta} R_f d\phi + N_{\theta} R_f d\phi + \frac{\partial}{\partial \theta} (N_{\theta} R_f d\phi) d\theta \\ &= N_{\phi\theta} r d\theta + N_{\phi\theta} r d\theta + \frac{\partial}{\partial \phi} (N_{\phi\theta} r d\theta) d\phi + \end{aligned}$$

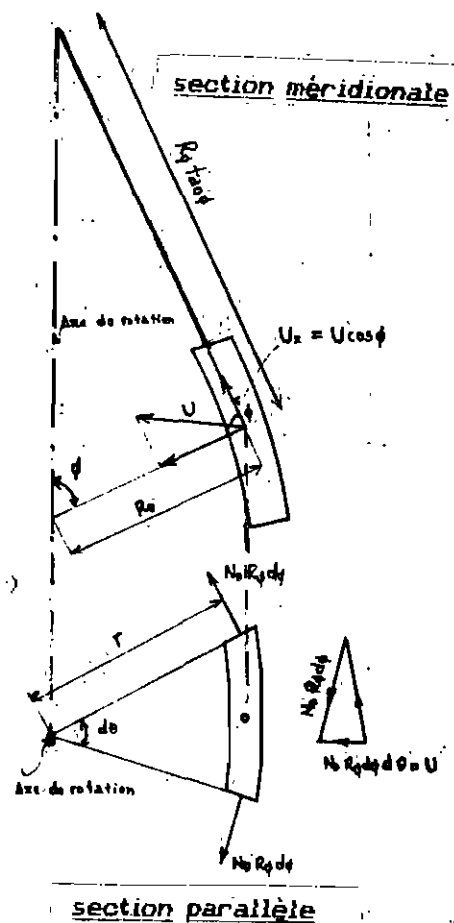


Fig 152 : Sections de coque de révolution montrant les forces.

$$N_{\theta\phi} R_{\phi} + \frac{r}{R_{\theta}} \frac{d\theta}{\tan\theta} + P_{\phi r} d\theta R_{\phi} d\phi = 0;$$

ce qui conduit à :

$$\frac{\partial}{\partial\theta} (N_{\theta} R_{\phi} d\phi) d\theta + \frac{\partial}{\partial\phi} (N_{\phi} r d\theta) d\phi +$$

$$N_{\theta\phi} R_{\phi} + \frac{r}{R_{\theta}} \frac{d\theta}{\tan\theta} + P_{\phi r} d\theta R_{\phi} d\phi = 0;$$

(1 8)

La figure 1.52 explique l'origine du troisième terme de l'équation précédente.

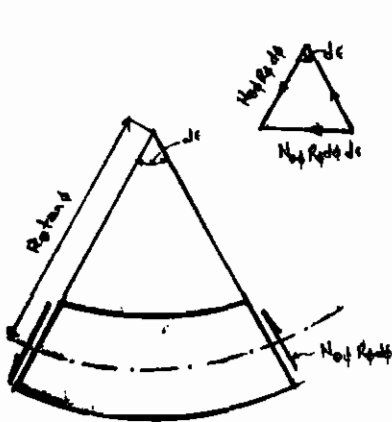


Fig 1.53a :

élément de coque avec les forces de cisaillement

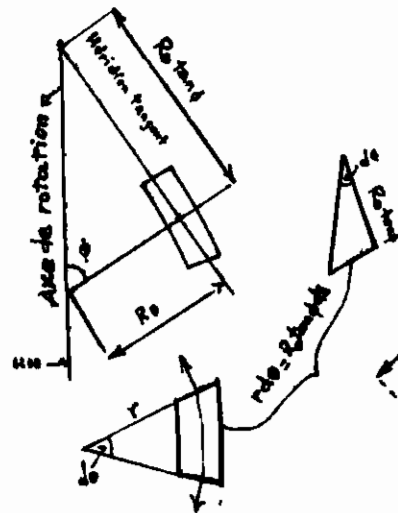


Fig 1.53b : signification géométrique de $r d\theta$

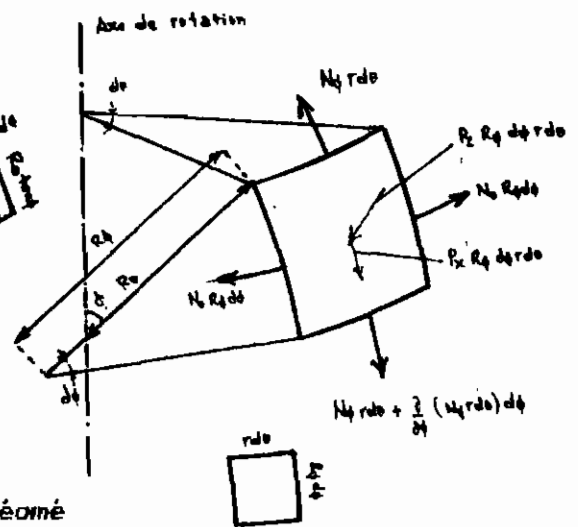


Fig 1.53c : forces membranaires

sur un élément de coque de révolution

$$\sum F_z = 0 \Rightarrow$$

$$N_{\phi} r d\theta d\phi + N_{\theta} R_{\phi} d\phi d\theta \sin\theta + P_{\phi r} d\theta R_{\phi} d\phi = 0 \quad (2.0)$$

En divisant les équations (1.7), (1.8), et (1.9) par $d\phi$ $d\theta$ et, en introduisant

$$N_{\phi\theta} = N_{\theta\phi} \text{ et } r = R_{\theta} \sin\phi$$

On obtient les équations finales (1.10 a, c, d) suivantes qui donnent les efforts membranaires pour les coques de révolutions. soit

$$\frac{\partial}{\partial\phi} (N_{\phi} R_{\theta} \sin\phi) + \frac{\partial}{\partial\theta} (N_{\theta\phi}) R_{\theta} - N_{\theta} R_{\phi} \cos\phi + P_x R_{\phi} R_{\theta} \sin\phi = 0; \quad (a)$$

$$\frac{\partial N_{\theta}}{\partial\theta} R_{\phi} + \frac{\partial}{\partial\phi} (N_{\phi\theta} R_{\theta} \sin\phi) + N_{\phi\theta} R_{\phi} \cos\phi + P_y R_{\phi} R_{\theta} \sin\phi = 0; \quad (b)$$

$$N_{\phi} R_{\theta} + N_{\theta} R_{\phi} + P_z R_{\phi} R_{\theta} = 0; \quad (c)$$

Ces trois équations permettent de déterminer les efforts membranaires.

On remarquera que ces efforts ne dépendent pas des propriétés de rigidité du matériau, l'élément étant statiquement déterminé.

1.6 EQUATIONS SPECIFIQUES A LA SPHERE

Dans le cas de la sphère, nous avons une symétrie de révolution ce qui annule toute dérivée par rapport à θ de termes purement géométriques.

Le poids propre étant symétrique par rapport à l'axe de rotation, toutes les dérivées de contraintes internes par rapport à θ s'annulent. Ces deux propriétés

font que la deuxième équation disparaît le poids propre n'ayant pas de composante dans la direction y . ($Q = 0$).

Les équations (1.10a) et (1.10c) prennent les formes suivantes:

$$\frac{d}{d\phi} (N_{\phi} R_{\theta} \sin\phi) - N_{\theta} R_{\phi} \cos\phi + P_x R_{\phi} R_{\theta} \sin\phi = 0; \quad (1.11a)$$

$$N_{\phi} R_{\theta} + N_{\theta} R_{\phi} + P_z R_{\phi} R_{\theta} = 0; \quad (1.11b)$$

1.7 RESOLUTION POUR LES EFFORTS MEMBRANAIRES

De (1.11b) on tire:

$$N_{\theta} = - R_{\theta} \left(\frac{N_{\phi}}{R_{\phi}} + P_z \right); \quad (1.12)$$

Remplaçons (1.12) dans (1.11a), avec $R_{\theta} \sin\phi = r$ on a:

$$\frac{d}{d\phi} (N_{\phi} r) + \frac{r}{\sin\phi} \left(\frac{N_{\phi}}{R_{\phi}} + P_z \right) \cdot R_{\phi} \cos\phi + P_x R_{\phi} r = 0; \quad (1.13)$$

multiplions les deux membres de l'équation (1.13) par $\sin\phi$ et prenons l'intégrale membre à membre par rapport à ϕ ; ceci donne:

$$\int_0^{\phi} \sin\phi \frac{d}{d\phi} (N_{\phi} r) d\phi + \int_0^{\phi} N_{\phi} r \cos\phi d\phi = - \int_0^{\phi} (P_x \sin\phi + P_z \cos\phi) R_{\phi} r d\phi \quad \text{soit:}$$

$$\sin\phi N_\phi r = - \int_0^\phi (P_x \sin\phi + P_z \cos\phi) R_f r d\phi$$

$$N_\phi = - \frac{1}{r \sin\phi} \int_0^\phi (P_x \sin\phi + P_z \cos\phi) R_f r d\phi$$

en remplaçant, r par sa valeur, on trouve:

$$N_\phi = - \frac{1}{R_\theta \sin^2\phi} \int_0^\phi (P_x \sin\phi + P_z \cos\phi) R_f R_\theta \sin\phi d\phi \quad (1.14)$$

Pour la sphère, $R_\theta = R_f$ et les composantes du poids propre dans les directions x et z sont respectivement:

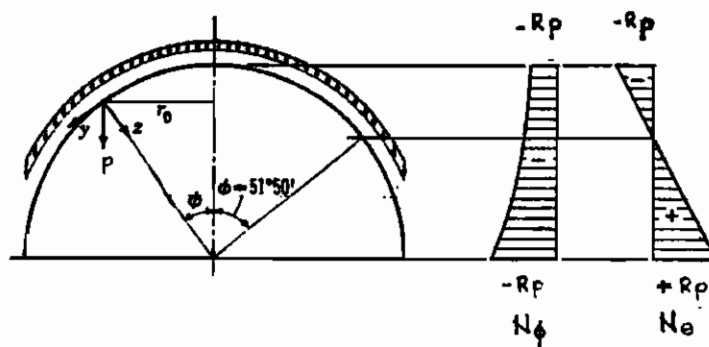
$$P_x = p \sin\phi \quad \text{et} \quad P_z = p \cos\phi \quad (p \text{ charge/m}^2) \quad (1.15)$$

d'où les valeurs des efforts membranaires suivant le MÉRIDIEN et le PARALLELE:

$$N_\phi = - \frac{pR}{1+\cos\phi} \quad N_\theta = pR \left(\frac{1}{1+\cos\phi} - \cos\phi \right) \quad (1.16)$$

La figure 1.71 montre le diagramme des efforts membranaires suivant les méridiens et les parallèles.

Fig 1.71 : Diagramme des efforts membranaires.



TOITURE SPHERIQUE EN GEBETON

CHAPITRE II :

CARACTERISTIQUES MECANQUES DU GEObETON

Le dôme résistera aux efforts de compression et de traction qui naissent en son sein pour autant qu'ils ne dépassent pas les résistances internes à la compression et à la traction du matériau qui le constitue : Il s'agit ici du GEOBETON dont nous déterminerons l'essentiel des caractéristiques dans le chapitre suivant.

2.1 LES PROPRIETES DU GEObETON

Le géobéton est un mélange de latérite et de stabilisants.

Les propriétés de ce matériau dépendent fortement de celles de la latérite et du stabilisant utilisé. Il existe plusieurs stabilisants, mais le plus utilisé et sur lequel a porté notre investigation est le CIMENT. La famille des latérites est vaste du fait de la dispersion de ses propriétés selon les régions climatiques et les modes de mises en places. Les propriétés de la latérite brune de THIES qui a fait l'objet du projet de fin d'étude cité à la référence N°14, sont prises ici comme valeurs de base; cependant nous tenterons de définir chacune des propriétés géotechniques de la latérite susceptibles d'influencer les résistances à la compression et à la traction du géobéton.

2.2 Les propriétés de la latérite.

2.2.1 Teneur en eau à l'optimum PROCTOR (w_{opt})

La compaction permet de contrôler jusqu'à un certain point, les propriétés géotechniques d'un sol et d'en faire un matériau de construction. Pour améliorer la capacité portante d'un sol, pour diminuer les effets de gonflement et de retrait, il faudra le compacter à sa teneur en eau optimale ou à une teneur en eau proche de celle-ci. L'essai de compactage permet de connaître la teneur en eau optimale pour un effort de compactage donné. Des études ont montré qu'on

améliore la résistance à la compression lorsque la teneur en eau du mélange est voisine de l'optimum proctor.

Pour la latérite brune de THIES; $w_{opt} = 15,2\%$ (voir courbe de compactage à la figure N°2.2.1.1 à l'annexe C).

2.2.2 Analyse granulométrique.

Les propriétés géotechniques sont fortement influencées par la granulométrie. L'analyse granulométrique permet de connaître la distribution des tailles des différents grains qui composent un sol. Cette analyse permet de tracer la courbe granulométrique qui est la courbe cumulée donnant pour un certain diamètre le pourcentage en poids des particules inférieures à ce diamètre.

(voir figure N°2.2.2.1 à l'annexe C).

On définit les coefficients d'uniformité et de courbure respectivement par:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad \text{et} \quad C_c = \frac{(D_{30})^2}{(D_{10})(D_{60})} \quad (2.1)$$

où D_{10} = diamètre des grains (en mm) correspondant à 10% de passant

D_{30} = diamètre des grains (en mm) correspondant à 30% de passant

D_{60} = diamètre des grains (en mm) correspondant à 60% de passant

2.2.3 Les limites de consistance d'ATTERBERG

Les limites d'Atterberg concernent la partie fine de la latérite. La présence de l'eau dans les pores d'un sol à grains fins peut modifier son comportement de façon significative. Il importe non seulement de connaître la quantité d'eau présente dans un dépôt naturel (teneur en eau naturelle) mais aussi de situer cette teneur en eau sur une échelle. Les limites de consistance ou limites d'Atterberg permettent d'atteindre cet objectif et constituent un indice important en géotechnique. En comparant la teneur en eau d'un échantillon donné aux limites d'Atterberg, on obtient des indications significatives sur son comportement sous sollicitations. Ces teneurs en eau constituent des limites pour certains comportements critiques. Elles constituent donc, avec la teneur en eau naturelle une donnée importante pour la classification des sols à grains fins ; de plus on peut les relier à diverses propriétés géotechniques dont il faut tenir compte dans la conception d'ouvrages. Ces teneurs en eau sont :

*limite de liquidité (w_L) : teneur en eau pour laquelle le sol passe de l'état liquide à l'état plastique.

*limite de plasticité (w_P) : teneur en eau pour laquelle le sol passe de l'état plastique à l'état liquide.

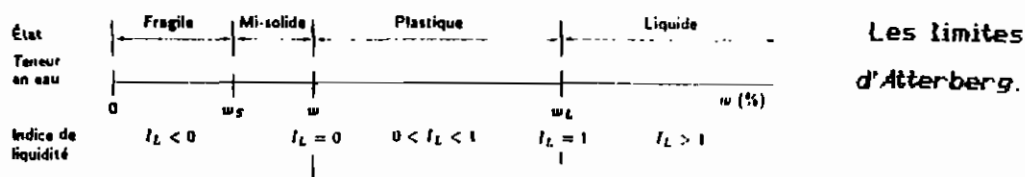
*indice de plasticité ($I_P = w_L - w_P$) : c'est la gamme des teneurs en eau pour lesquelles le sol a un comportement plastique.

*indice de liquidité ($I_L = \frac{w_n - w_P}{I_P}$) : échelle absolue utilisée pour situer la teneur

en eau naturelle d'un échantillon de sol. (w_n = teneur en eau naturelle).

Pour la latérite brune de THIES, $w_L\% = 44$ et $w_P = 24.46$

Fig 2.223 :



2.2.4. Essai Los Angeles

Cet essai est effectué dans le but de mesurer la durabilité des grains grossiers de la latérite. il est évident que le comportement à l'essai Los Angeles affecte les résistances à la compression et à la traction du géobéton.

Pour la latérite brune de THIES, après abrasion on trouve une perte de 53% , ce qui témoigne de la friabilité du matériau par rapport aux graviers

2.2.5 récapitulation des propriétés de la latérite brune de THIES

Sur la base des valeurs des propriétés énumérées ci-haut, nous identifions clairement de quelle latérite sera fait notre géobéton dont les caractéristiques mécaniques seront utilisées dans le dimensionnement. Nous tenions à définir chacun de ces termes afin que les résultats des propriétés mécaniques du géobéton ne soient pas prises pour des valeurs standards. En effet ils dépendent surtout de la latérite et du stabilisant utilisés.

2.3 Résistance à la compression et à la tension du géobéton.

Pour mieux apprécier l'amélioration des caractéristiques mécaniques, la

latérite est stabilisée avec du ciment à différents pourcentages. La teneur en eau du mélange ne devant pas être loin de l'optimum Proctor majorée.

Les essais de compression peuvent se faire sur des éprouvettes cylindriques ou prismatiques compactées à l'aide d'un pilon (entre 25 et 35 coups).

Les temps de cures sont en générale de 7, 14 ou 28 jours.

Pour déterminer la résistance à la tension des éprouvettes, c'est l'essai brésilien qui a été fait.

Fig 2.251 :

LATERITE										
γ_d opt	W% opt	D ₆₀	D ₁₀	C _u	C _c	W _L	W _p	IP	M	% R _s - Sant 200
1.88	15.2	4.8	1.2	4.98	0.44	44.0	24.46	19.59	6	<5%
GEOBETON (6% CIMENT)										
R _c = 1500 kN/m ²						R _t = 135 kN/m ²				

Les caractéristiques de la latérite et du géobéton.

Au vu des résultats, on peut constater que la résistance à la tension est d'environ 9% de la résistance à la compression du géobéton. Notons que ce rapport est de 10% environ pour le béton classique.

La valeur de la résistance à la compression de la latérite pure obtenue est d'environ 7 daN/cm².

2.4 Relations entre les résistances du géobéton et les paramètres du dôme sphérique.

Les efforts membranaires internes au dôme sphérique étaient déterminés par les équations (1.16) et leurs variations montrées à la figure N° 1.71

Pour que le dôme ne rompe pas par compression il faut que la compression maximale le sollicitant soit inférieure à la résistance à la compression du géobéton :

$$R \alpha \frac{1}{1+\cos\phi_b} < \Phi_{Gb} \bar{R}_c \quad (2.2)$$

Pour que le dôme ne rompt pas par traction il faut que la tension maximale le sollicitant soit inférieure à la résistance à la traction du géobéton.

$$R \alpha \left(\cos\phi_b - \frac{1}{1+\cos\phi_b} \right) < \Phi_{Gb} \bar{R}_t \quad \text{où :} \quad (2.3)$$

R est le rayon du dôme ,

ϕ_b est montré sur la figure N°2.41. :

$$\cos\phi_b = \frac{Hq}{R} \quad (2.31)$$

$q = \gamma h$ est la charge par m^2 du dôme,

γ est le poids volumique du géobéton et h son épaisseur;

$\Phi_{Gb} = 0.6$ est un facteur de réduction appliqué aux valeurs des résistances du géobéton pour tenir compte des incertitudes sur le comportement du matériau.

\bar{R}_t est la résistance à la traction du géobéton.

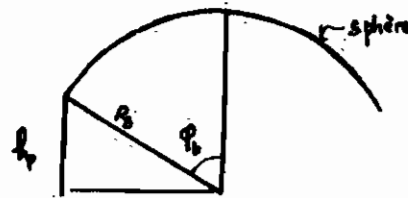


Fig 2.41 : Angle ϕ_b .

La résolution de (2.2) et (2.31) donne:

$$\text{en posant } Rot = \frac{\phi_{gb} \bar{R}_t}{\gamma} \quad (2.4)$$

$$R < \frac{Rot + Hp}{2} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4Hp}{Hp + Rot}} \right) \quad (2.5)$$

La résolution de (2.3) et (2.31) donne:

$$\text{en posant } Roc = \frac{\phi_{gb} \bar{R}_c}{\gamma} \quad (2.6)$$

$$R < \frac{Roc}{2} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4Hp}{Roc}} \right) \quad (2.7)$$

H_p = hauteur des poteaux.

2.4.1 Stabilité

La valeur théorique de la pression extérieure qui crée le flambage du dôme hémisphérique de rayon R et d'épaisseur h est:

$$P_{cr} = \frac{2}{\sqrt{3(1-\nu^2)}} E \left(\frac{h}{R} \right)^2 = 1.16 E \left(\frac{h}{R} \right)^2, \quad (\nu = 0). \quad (2.8)$$

E est le module de Young .

Des expériences ont montré que pour une calotte sphérique, le coefficient numérique est beaucoup plus petit que 1.16 et ne dépend pas essentiellement des conditions aux limites. La baisse du coefficient est due aux imperfections du matériau constituant le dôme et par dessus tout, aux déviations par rapport à la vraie surface sphérique lors de la construction.

Pour les dômes avec une ouverture voisine de 90°, la théorie non linéaire et les expériences ont montré que la valeur de la pression extérieure critique qui cause le flambement est:

$$P_{cr} = \alpha E \left(\frac{h}{R} \right)^2, \quad \text{avec } \alpha = 0.3. \quad (2.9)$$

Un facteur de sécurité de 2 à 3 est suggéré sur la pression P_{cr} .

Les valeurs de la surcharge et du poids propre critiques sont habituellement approximées par celles de la pression extérieure.

Alors pour ne pas avoir de flambement, le poids propre doit respecter l'inéquation suivante:

$$P_{cr} = \alpha E \left(\frac{h}{R} \right)^2 > \gamma h \phi_{SF} \quad \text{ce qui revient à :} \quad (2.10)$$

$$R < \sqrt{\frac{\alpha E h}{\phi_{SF} \gamma}} \quad (2.11)$$

2.5 Exemple de calcul.

Pour la latérite brune de THIES stabilisée à 6% de ciment, les valeurs suivantes des propriétés sont suggérées:

$$\bar{R}_C = 1500 \text{ kN/m}^2, \quad \bar{R}_t = 135 \text{ kN/m}^2, \quad E = 250000 \text{ kN/m}^2,$$

$$\gamma = 22 \text{ kN/m}^3, \quad h = 0.08 \text{ m}, \quad \phi_{Gb} = 0.6, \quad \phi_{Sp} = 3, \quad \alpha = 0.3$$

$$H_{poteau} = 2.24 \text{ m},$$

$$R_{ot} = \frac{0.6 \times 135}{22} = 3.68 \text{ m};$$

$$R_{oc} = \frac{0.6 \times 1500}{22} = 40.91 \text{ m},$$

¶ vis à vis de la traction

$$R < \frac{3.68 + 2.24}{2} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4 \times 2.24}{2.24 + 3.68}} \right) = 4.69 \text{ m},$$

¶ vis à vis de la compression

$$R < \frac{40.91}{2} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4 \times 2.24}{40.91}} \right) = 22.58 \text{ m},$$

¶ vis à vis du flambement

$$R < \sqrt{\frac{0.3 \times 250000 \times 0.08}{3 \times 22}} = 9.53 \text{ m}$$

Il devient évident que la condition sur la traction gouverne; d'où le rayon du dôme de l'exemple ne dépassera pas 4.69 m.

CHAPITRE III :

ANALYSE STRUCTURALE DU BATIMENT

3.2 CHARGEMENT DES POUTRES

Pour charger les poutres circulaires, il s'agira de déterminer à chaque position α sur ces dernières la valeur de l'angle ϕ correspondant de la toiture sphérique. Cette valeur de ϕ , injectée dans les équations (1.16) donnant les efforts membranaires, fournit le chargement à la position α sur la poutre circulaire. Le cas de figure est le suivant :

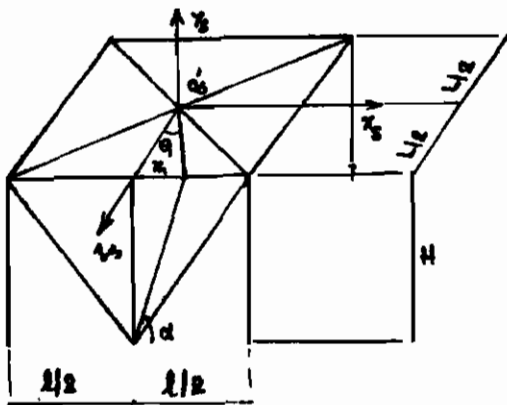


Fig 3.22 : Relation entre α et θ .

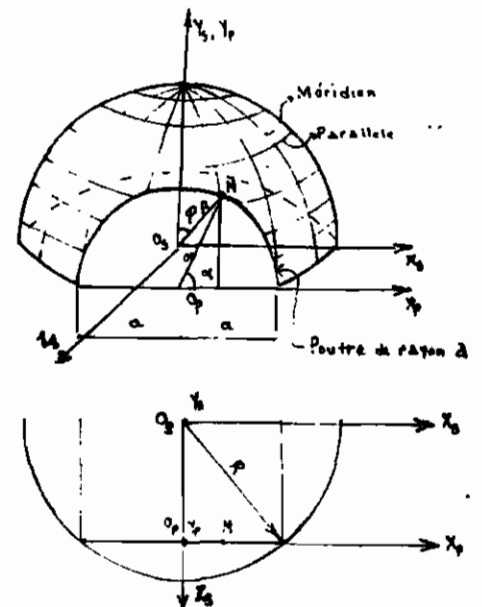


Fig 3.21 : Relation entre α et ϕ .

3.2.1 Relation entre ϕ et α .

*1 Dans le repère de la sphère, (O_s, X_s, Y_s, Z_s)

Pour un angle ϕ la cote d'un point de la sphère est donnée par :

$$z = R \cos \phi \quad (3.1)$$

*2 Dans le repère de la poutre, (O_p, X_p, Y_p)

Pour un angle α la cote du même point, est donnée par :

$$z = R \sin \alpha \quad (3.2)$$

Ce qui nous donne avec 3.1 et 3.2 la relation fondamentale entre les angles ϕ et α

$$\cos\phi = \frac{a}{R} \sin\alpha \quad (3.3)$$

3.2.2. Relation entre θ et α .

$$\operatorname{tg}\theta = \frac{x}{l/2} \quad (3.4)$$

$$x = H \operatorname{tg}\alpha \quad \text{d'où :}$$

$$\operatorname{tg}\theta = \frac{H \operatorname{tg}\alpha}{l/2} \quad \text{et} \quad \theta = \operatorname{Arctg} \left(\frac{H \operatorname{tg}\alpha}{l/2} \right) \quad (3.5)$$

3.2.3. Détermination du poids propre (q).

le poids propre est défini par :

$$q = \gamma \cdot e, \quad (3.6)$$

où γ et e sont respectivement le poids spécifique et l'épaisseur de la toiture.

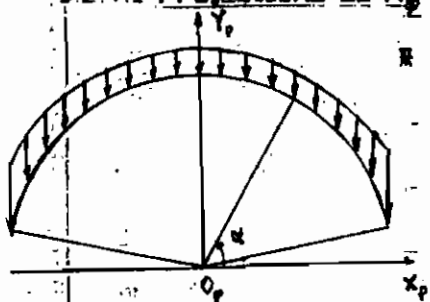
3.2.4. Chargement de la poutre de rayon a.

Les équations (1.16) donnant N_x , N_θ et (3.3) donnant ϕ en fonction de α conduisent aux chargements suivants sur les poutres circulaires illustrés par le cas de la poutre A :

$$N_x = -R\gamma e \frac{1}{1 + \frac{a}{R} \sin\alpha} \quad \text{et} \quad N_\theta = R\gamma e \left(\frac{1}{1 + \frac{a}{R} \sin\alpha} - \frac{a}{R} \sin\alpha \right) \quad (3.7)$$

Les projections verticales, horizontale et perpendiculaire au plan de figure sont montrées respectivement sur les figures : 3.241a, 3.241b, 3.241c.

3.2.4.1 Projections de N_ϕ et N_θ



** Projections de N_ϕ

- sur l'axe des X : $N_\phi \cos\phi \sin\theta$
- sur l'axe des Y : $N_\phi \sin\phi$ (3.8)
- sur l'axe des Z : $N_\phi \cos\phi \cos\theta$

Fig 3.241a: projection sur Y

** Projections de N_θ

- sur l'axe des X : $N_\theta \cos\theta$
- sur l'axe des Y : 0 (3.9)
- sur l'axe des Z : $-N_\theta \sin\theta$ Avec:

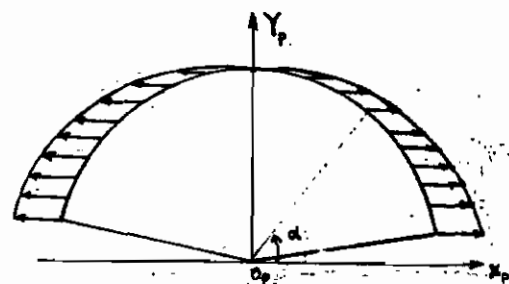


Fig 3.241b: projection sur X

$\phi = \text{Arccos} \left(\frac{a}{R} \sin\alpha \right)$ et $\theta = \text{Arctg} \left(\frac{H \text{tg}\alpha}{1/2} \right)$

** Chargement résultant sur la poutre A

- sur l'axe des X : $N_\phi \cos\phi \sin\theta + N_\theta \cos\theta$
- sur l'axe des Y : $N_\phi \sin\phi$ (3.10)
- sur l'axe des Z : $N_\phi \cos\phi \cos\theta - N_\theta \sin\theta$

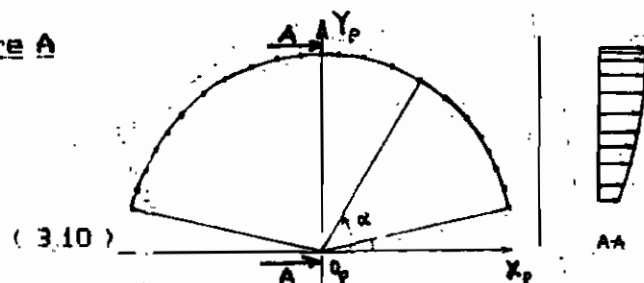


Fig 3.241c: projection sur Z

Appelons respectivement f_1 , g_1 , et h_1 ces charges résultantes sur la poutre.

3.3 ANALYSE STRUCTURALE

Du fait de la double symétrie de géométrie et de chargement, la structure idéalisée sera le quart du bâtiment comme représentée à la figure 3.3.

Sur la structure entière nous pouvons remarquer les comportement d'efforts suivants:

Au milieu des poutres circulaires (i.e à l'extrémité libre des poutres circulaires sur la structure idéalisée) :

- l'effort tranchant est nul du fait de la symétrie du chargement ;

(voir fig 3.3.1a) ;

$$V_1 = V_2 = 0 \quad (3.11)$$

- le cisaillement suivant l'axe Z est nul du fait de la symétrie du chargement

(voir fig 3.3.1b) ;

$$Q_{z1} = Q_{z2} = 0 \quad (3.12)$$

- en ce point nous allons négliger la torsion

$$M_{x1} = M_{x2} = 0 \quad (3.13)$$

- le déplacement relatif en ce point est nul .

Pour l'analyse, nous allons supposer le poteau rotulé en bas, ce qui n'est pas loin de la réalité car il serait pratiquement impossible de réaliser un encastrement parfait entre les matériaux en présence : le béton et le sol. Ainsi nous avons à la base des poteaux:

$$M_x = M_y = M_z = 0 \quad (3.14)$$

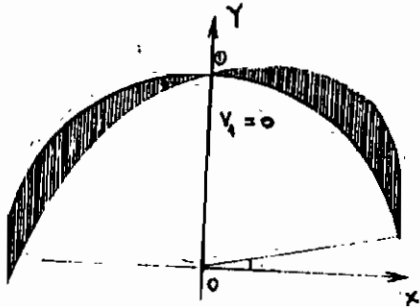


Fig 3.31a : Efforts tranchants dus à f_1 .

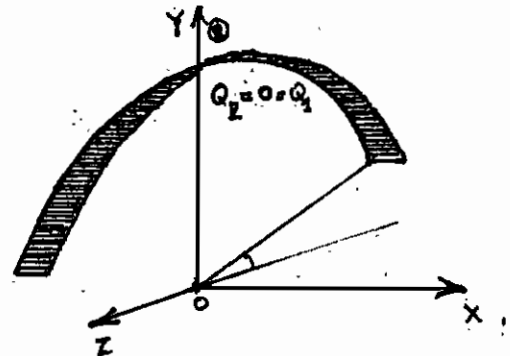


Fig 3.31b : Efforts tranchants dus à q_1 .

L'idéalisation complète de la structure est représentée à la figure 3.3.2.

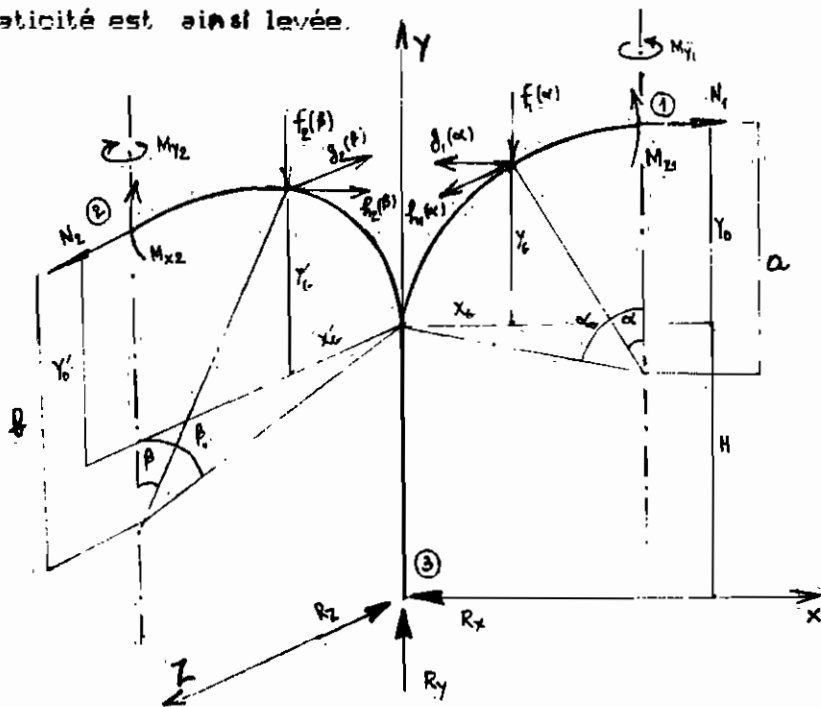
Nous avons alors 9 inconnues et disposons de 6 équations (équations d'équilibres)

Pour rendre la structure isostatique, nous allons extérioriser 3 efforts :

(N_1 , N_2 et M_{z1}) et appliquer le théorème de CASTIGLIANO pour obtenir trois équations supplémentaires. Ce qui nous donnera un système de 9 équations à 9 inconnues et l'hyperstaticité est ainsi levée.

Fig 3.32 :

Idéalisation complète de l'ossature.



TOITURE SPHERIQUE EN GEBETON

$$\begin{aligned}
 * \sum_3 M_y = 0 & \Rightarrow \\
 - \int_0^{\alpha_0} x_G h_1 ds_1 + \int_0^{\beta_0} z_G h_2 ds_2 + M_{y1} - M_{y2} & = 0 \quad (3.19)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 * \sum_3 M_z = 0 & \Rightarrow \\
 - \int_0^{\alpha_0} x_G f_1 ds_1 + \int_0^{\alpha_0} (H + y_G) g_1 ds_1 - \\
 \int_0^{\beta_0} (H + y'_G) h_2 ds_2 - (z_1 + H) N_1 + M_{z1} & = 0 \quad (3.21)
 \end{aligned}$$

$$x_G = a (\sin \alpha_0 - \sin \alpha) , \quad y_G = a (1 - \cos \alpha) , \quad (3.22)$$

$$z_G = b (\sin \beta_0 - \sin \beta) , \quad y'_G = b (1 - \cos \beta) , \quad (3.23)$$

$$y_0 = a (1 - \cos \alpha_0) , \quad y'_0 = b (1 - \cos \beta_0) , \quad (3.24)$$

$$ds_1 = a da \quad ds_2 = b d\beta \quad (3.25)$$

où a et b sont respectivement les rayons des poutres circulaires,

α , α_0 , β et β_0 indiquent les positions.

Les équations 3.15 à 3.21 deviennent:

$$\begin{aligned}
 N_1 - R_x + E_1 &= 0 & M_{z1} - E_7 N_1 + E_4 &= 0 \\
 N_2 - R_x + E_2 &= 0 & M_{xz} - E_9 N_2 + E_5 &= 0 \quad (3.26) \\
 R_y - E_3 &= 0 & M_{y1} - M_{yz} + E_6 &= 0
 \end{aligned}$$

3.3.1.2 Système de coordonnées locales

3.3.1.2 a Poutre a

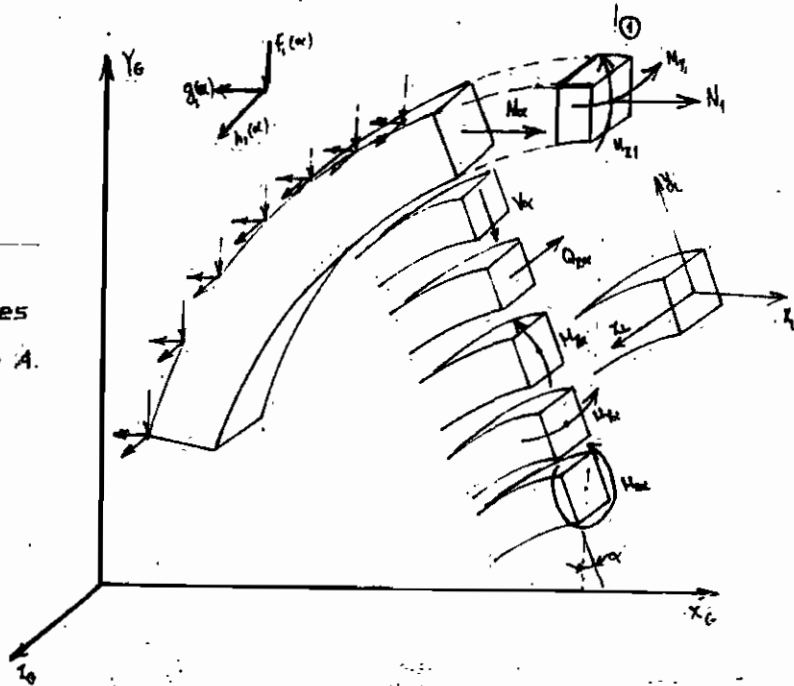


Fig 3.312a :

Efforts internes
dans la poutre A.

$$* \sum F_x = 0 \Rightarrow$$

$$- N_\alpha \cos \alpha - \sin \alpha V_\alpha + N_1 - \int_0^s q_1 ds_1 = 0 \quad (3.26)$$

$$* \sum F_y = 0 \Rightarrow$$

$$-N_\alpha \sin \alpha + \cos \alpha V_\alpha - \int_0^\alpha f_1 ds_1 = 0 \quad (3.27)$$

$$* \sum F_z = 0 \Rightarrow$$

$$Q_{z\alpha} + \int_0^\alpha h_1 ds_1 = 0 \quad (3.28)$$

$$* \sum M_x = 0 \Rightarrow$$

$$M_{x\alpha} - \left(\int_0^\alpha x_L h_1 ds_1 \right) \sin \alpha - \left(\int_0^\alpha y_L h_1 ds_1 \right) \cos \alpha = 0 \quad (3.29)$$

$$* \sum M_y = 0 \Rightarrow$$

$$M_{y\alpha} - M_{y1} + \left(\int_0^\alpha x_L h_1 ds_1 \right) \cos \alpha - \left(\int_0^\alpha y_L h_1 ds_1 \right) \sin \alpha = 0 \quad (3.30)$$

$$* \sum M_z = 0 \Rightarrow$$

$$M_{z\alpha} - M_{z1} + N_1 g_1 + \int_0^\alpha x_L f_1 ds_1 - \int_0^\alpha y_L g_1 ds_1 = 0 \quad (3.31)$$

Des équations 3.26 à 3.31 ont tiré:

$$N_\alpha = N_1 \cos \alpha - \cos \alpha \int_0^\alpha g_1 ds_1 - \sin \alpha \int_0^\alpha f_1 ds_1$$

$$V_{\alpha} = N_1 \sin \alpha - \sin \alpha \int_0^{\alpha} g_1 ds_1 + \cos \alpha \int_0^{\alpha} f_1 ds_1$$

$$Q_{z\alpha} = - \int_0^{\alpha} h_1 ds_1$$

$$M_{x\alpha} = \left(\int_0^{\alpha} x_L h_1 ds_1 \right) \sin \alpha + \left(\int_0^{\alpha} y_L h_1 ds_1 \right) \cos \alpha \quad (3.32)$$

$$M_{y\alpha} = M_{y1} - \left(\int_0^{\alpha} x_L h_1 ds_1 \right) \cos \alpha + \left(\int_0^{\alpha} y_L h_1 ds_1 \right) \sin \alpha$$

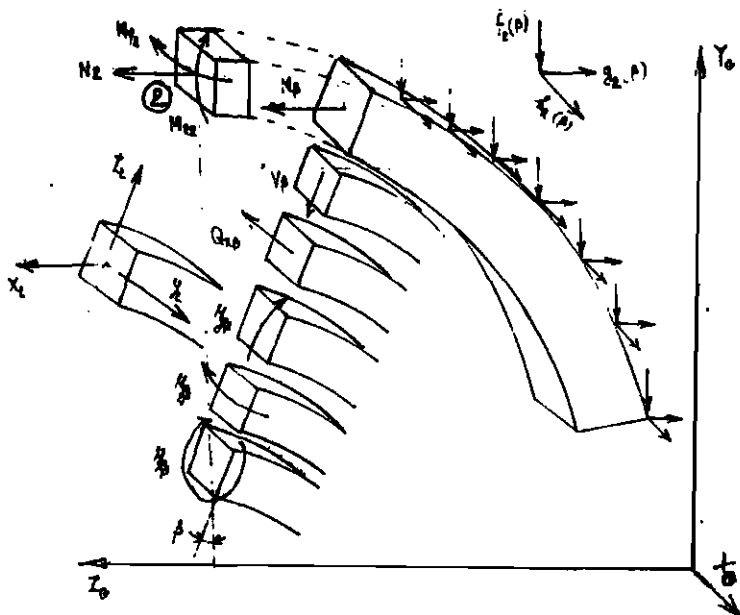
$$M_{z\alpha} = M_{z1} - N_1 y_0 - \int_0^{\alpha} x_L f_1 ds_1 + \int_0^{\alpha} y_L g_1 ds_1$$

où $x_L = a (\sin \alpha_1 - \sin \alpha)$, $y_L = a (\cos \alpha - \cos \alpha_1)$, $\alpha < \alpha_1$.

D'une manière analogue, on obtient pour la poutre b, les égalités suivantes:

Fig 3.312b :

Efforts internes
dans la poutre B.



TOITURE SPHERIQUE EN GEOBETON

$$\begin{aligned}
 N_{\beta} &= N_2 \cos \beta - \cos \beta \int_0^{\beta} g_2 ds_2 - \sin \beta \int_0^{\beta} f_2 ds_2 \\
 V_{\beta} &= N_2 \sin \beta - \sin \beta \int_0^{\beta} g_2 ds_2 + \cos \beta \int_0^{\beta} f_2 ds_2 \\
 Q_{z\beta} &= - \int_0^{\beta} h_2 ds_2 \\
 M_{x\beta} &= \left(\int_0^{\beta} z_1 h_2 ds_2 \right) \sin \beta + \left(\int_0^{\beta} y'_1 h_2 ds_2 \right) \cos \beta \\
 M_{y\beta} &= M_{y2} - \left(\int_0^{\beta} z_1 h_2 ds_2 \right) \cos \beta + \left(\int_0^{\beta} y'_1 h_2 ds_2 \right) \sin \beta \\
 M_{z\beta} &= M_{z2} - N_2 y'_1 - \int_0^{\beta} z_1 f_2 ds_2 + \int_0^{\beta} y'_1 g_2 ds_2
 \end{aligned} \tag{3.33}$$

où $z_1 = b (\sin \beta_1 - \sin \beta)$, $y'_1 = b (\cos \beta - \cos \beta_1)$, $\beta < \beta_1$.

3.3.1.2.b Poteaux

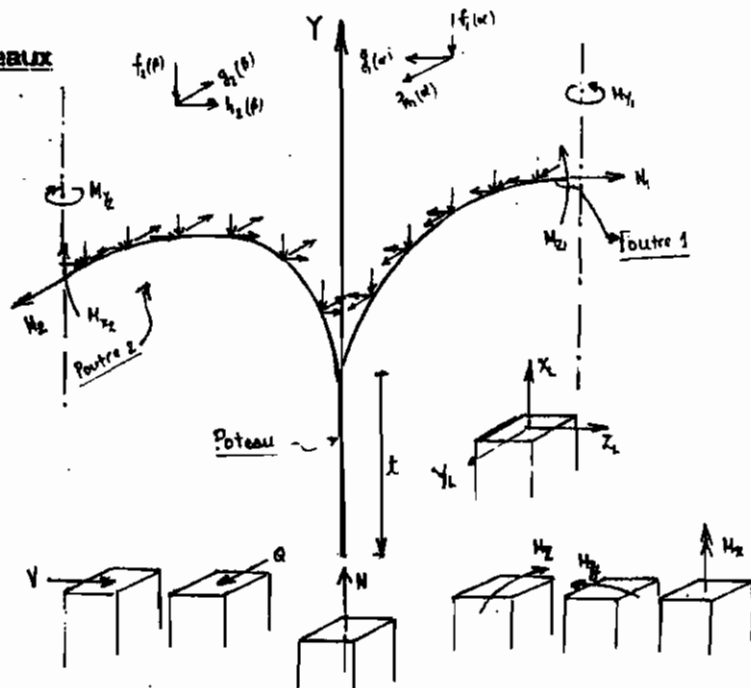


Fig 3.312c :

Effort internes
dans le poteau.

TOITURE SPHERIQUE EN GEBETON

$$* \sum F_x = 0 \Rightarrow$$

$$N = \int_0^{\alpha_0} f_1 ds_1 + \int_0^{\beta_0} f_2 ds_2 \quad (3.34)$$

$$* \sum F_y = 0 \Rightarrow$$

$$V = N_1 - \int_0^{\alpha_0} g_1 ds_1 + \int_0^{\beta_0} h_2 ds_2 \quad (3.35)$$

$$* \sum F_z = 0 \Rightarrow$$

$$Q = N_2 - \int_0^{\beta_0} g_2 ds_2 + \int_0^{\alpha_0} h_1 ds_1 \quad (3.36)$$

$$* \sum M_x = 0 \Rightarrow$$

$$M_x = M_{y2} - M_{y1} - \int_0^{\beta_0} z_G h_2 ds_2 + \int_0^{\alpha_0} x_G h_1 ds_1 \quad (3.37)$$

$$* \sum M_y = 0 \Rightarrow$$

$$M_y = (t + y'_0) N_2 - M_{x2} - t \int_0^{\beta_0} g_2 ds_2 + t \int_0^{\alpha_0} h_1 ds_1 +$$

$$\int_0^{\beta_0} z_G f_2 ds_2 - \int_0^{\beta_0} y'_G g_2 ds_2 + \int_0^{\alpha_0} y_G h_1 ds_1 \quad (3.38)$$

$$* \sum M_z = 0 \Rightarrow$$

$$M_z = (t + y_0) N_1 - M_{x1} - t \int_0^{\alpha_0} g_1 ds_1 + t \int_0^{\beta_0} h_2 ds_2 +$$

$$\int_0^{\alpha_0} x_G f_1 ds_1 - \int_0^{\alpha_0} y_G g_1 ds_1 + \int_0^{\beta_0} y'_G h_2 ds_2 \quad (3.39)$$

3.3.2 Application du théorème de CASTIGLIANI

L'application du théorème de CASTIGLIANI par rapport aux efforts extériorisés (en négligeant l'effort tranchant et à la torsion) donne:

$$\frac{1}{EA_1} \int_0^{\alpha_0} \frac{\partial N_\alpha}{\partial N_1} N_\alpha ds_1 + \frac{1}{EI_{z1}} \int_0^{\alpha_0} \frac{\partial M_{z\alpha}}{\partial N_1} M_{z\alpha} ds_1 + \frac{1}{EI_{z3}} \int_0^H \frac{\partial M_z}{\partial N_1} M_z dt = 0 ,$$

$$\frac{1}{EA_2} \int_0^{\beta_0} \frac{\partial N_\beta}{\partial N_2} N_\beta ds_2 + \frac{1}{EI_{z2}} \int_0^{\beta_0} \frac{\partial M_{z\beta}}{\partial N_2} M_{z\beta} ds_2 + \frac{1}{EI_{y3}} \int_0^H \frac{\partial M_y}{\partial N_2} M_y dt = 0 , \quad (3.40)$$

$$\frac{1}{EI_{y1}} \int_0^{\alpha_0} \frac{\partial M_{y\alpha}}{\partial M_{y1}} M_{y\alpha} ds_1 + \frac{1}{EI_{x3}} \int_0^H \frac{\partial M_x}{\partial M_{y1}} M_x dt = 0 ,$$

A partir des équations d'équilibre sur les éléments dans le système de coordonnées locales on calcule les dérivées partielles qui apparaissent dans les trois équations précédentes; soit :

$$\frac{\partial N_\alpha}{\partial N_1} = \cos \alpha , \quad \frac{\partial M_{z\alpha}}{\partial N_1} = -w_G , \quad \frac{\partial M_z}{\partial N_1} = t + w_0 ,$$

$$\frac{\partial N_\beta}{\partial N_2} = \cos \beta , \quad \frac{\partial M_{z\beta}}{\partial N_2} = -y'_G , \quad \frac{\partial M_y}{\partial N_2} = t + y'_0 , \quad (3.41)$$

$$\frac{\partial M_{y\alpha}}{\partial M_{y1}} = 1 , \quad \frac{\partial M_x}{\partial M_{y1}} = 1 ,$$

En remplaçant les efforts et les dérivées partielles par leur valeur dans les équations 3.40 on en vient à :

$$\begin{aligned}
 & \left[\frac{1}{EA_1} \int_0^{\alpha_0} \cos^2 \alpha \, ds_1 + \frac{1}{EI_{z1}} \int_0^{\alpha_0} y_G^2 \, ds_1 + \frac{1}{EI_{z3}} \int_0^H (t + y_0)^2 \, dt \right] N_1 + \\
 & \quad \left[- \frac{1}{EI_{z1}} \int_0^{\alpha_0} y_G \, ds_1 - \frac{1}{EI_{z3}} \int_0^H (t + y_0) \, dt \right] M_{z1} + \\
 & - \frac{1}{EA_1} \int_0^{\alpha_0} \left(\cos^2 \alpha \int_0^{\alpha} g_1 \, ds_1 \right) ds_1 - \frac{1}{EA_1} \int_0^{\alpha_0} \left(\sin \alpha \cos \alpha \int_0^{\alpha} f_1 \, ds_1 \right) ds_1 + \\
 & \quad \frac{1}{EI_{z1}} \int_0^{\alpha_0} y_G \left(\int_0^{\alpha} x_L f_1 \, ds_1 \right) ds_1 - \frac{1}{EI_{z1}} \int_0^{\alpha_0} y_G \left(\int_0^{\alpha} y_L g_1 \, ds_1 \right) ds_1 + \\
 & \frac{1}{EI_{z3}} \int_0^H t (t + y_0) \left(\int_0^{\alpha_0} g_1 \, ds_1 \right) dt + \frac{1}{EI_{z3}} \int_0^H t (t + y_0) \left(\int_0^{\beta_0} h_2 \, ds_2 \right) dt + \\
 & \quad \frac{1}{EI_{z3}} \int_0^H (t + y_0) \left(\int_0^{\alpha_0} x_L f_1 \, ds_1 \right) dt - \frac{1}{EI_{z3}} \int_0^H (t + y_0) \left(\int_0^{\alpha_0} y_L g_1 \, ds_1 \right) dt + \\
 & \quad \frac{1}{EI_{z3}} \int_0^H (t + y_0) \left(\int_0^{\beta_0} y_L h_2 \, ds_2 \right) dt = 0 \quad (3.42)
 \end{aligned}$$

Posons :

$$A_1 = \frac{1}{EA_1} \int_0^{\alpha_0} \cos^2 \alpha \, ds_1 + \frac{1}{EI_{z1}} \int_0^{\alpha_0} y_G^2 \, ds_1 + \frac{1}{EI_{z3}} \int_0^H (t + y_0)^2 \, dt$$

$$B_1 = \frac{1}{EI_{z1}} \int_0^{\alpha_0} y_G \, ds_1 + \frac{1}{EI_{z3}} \int_0^H (t + y_0) \, dt$$

$$C_1 = \frac{1}{EI_{z3}} \int_0^H -t(t + y_0) \left(\int_0^{\alpha_0} g_1 \, ds_1 \right) dt + \frac{1}{EI_{z3}} \int_0^H t(t + y_0) \left(\int_0^{\beta_0} h_2 \, ds_2 \right) dt +$$

$$\frac{1}{EI_{z3}} \int_0^H (t + y_0) \left(\int_0^{\alpha_0} x_L f_1 \, ds_1 \right) dt - \frac{1}{EI_{z3}} \int_0^H (t + y_0) \left(\int_0^{\alpha_0} y_L g_1 \, ds_1 \right) dt +$$

$$\frac{1}{EI_{z3}} \int_0^H (t + y_0) \left(\int_0^{\beta_0} y'_L h_2 \, ds_2 \right) dt$$

$$D_1 = \frac{1}{EA_1} \int_0^{\alpha_0} \left(\cos^2 \alpha \int_0^{\alpha} g_1 \, ds_1 \right) ds_1 - \frac{1}{EA_1} \int_0^{\alpha_0} \left(\sin \alpha \cos \alpha \int_0^{\alpha} f_1 \, ds_1 \right) ds_1 +$$

$$\frac{1}{EI_{z1}} \int_0^{\alpha_0} y_G \left(\int_0^{\alpha} x_L f_1 \, ds_1 \right) ds_1 - \frac{1}{EI_{z1}} \int_0^{\alpha_0} y_G \left(\int_0^{\alpha} y_L g_1 \, ds_1 \right) ds_1$$

L'équation (3.40a) devient :

$$A_1 N_1 - B_1 M_{z1} + C_1 + D_1 = 0 \quad (3.43)$$

D'une manière analogue l'équation (3.40b) devient :

$$A_2 N_2 - B_2 M_{z2} + C_2 + D_2 = 0 \quad (3.44)$$

avec:

$$A_2 = \frac{1}{EA_2} \int_0^{\beta_0} \cos^2 \beta \, ds_2 + \frac{1}{EI_{z2}} \int_0^{\beta_0} y'_G{}^2 \, ds_2 + \frac{1}{EI_{y3}} \int_0^H (t + y'_0)^2 \, dt$$

$$B_2 = \frac{1}{EI_{z2}} \int_0^{\beta_0} y'_G \, ds_2 + \frac{1}{EI_{y3}} \int_0^H (t + y'_0) \, dt$$

$$C_2 = \frac{1}{EI_{y3}} \int_0^H -t(t + y'_0) \left(\int_0^{\beta_0} g_2 \, ds_2 \right) dt + \frac{1}{EI_{y3}} \int_0^H t(t + y'_0) \left(\int_0^{\alpha_0} h_1 \, ds_1 \right) dt +$$

$$\frac{1}{EI_{y3}} \int_0^H (t + y'_0) \left(\int_0^{\beta_0} x_L f_2 \, ds_2 \right) dt - \frac{1}{EI_{y3}} \int_0^H (t + y'_0) \left(\int_0^{\beta_0} y'_L g_2 \, ds_2 \right) dt +$$

$$\frac{1}{EI_{y3}} \int_0^H (t + y'_0) \left(\int_0^{\alpha_0} y_L h_1 \, ds_1 \right)$$

dt.

$$D_2 = - \frac{1}{EA_2} \int_0^{\beta_0} \left(\cos^2 \beta \int_0^{\beta} g_2 \, ds_2 \right) ds_2 - \frac{1}{EA_2} \int_0^{\beta_0} \left(\sin \beta \cos \beta \int_0^{\beta} f_2 \, ds_2 \right) ds_2 +$$

$$\frac{1}{EI_{z2}} \int_0^{\beta_0} y'_G \left(\int_0^{\beta} z_L f_2 \, ds_2 \right) ds_2 - \frac{1}{EI_{z2}} \int_0^{\beta_0} y'_G \left(\int_0^{\beta} y'_L g_2 \, ds_2 \right) ds_2$$

Le développement de l'équation (3.40b) issue de l'application du théorème de CASTIGLIANO donne:

$$\left[\frac{1}{EI_{y1}} \int_0^{\alpha_0} ds_1 + \frac{1}{EI_{x0}} \int_0^H dt \right] M_{y1} - \left[\frac{1}{EI_{x0}} \int_0^H dt \right] M_{y2} +$$

$$- \frac{1}{EI_{y1}} \int_0^{\alpha_0} \sin \alpha \left(\int_0^{\alpha} x_L h_1 \, ds_1 \right) ds_1 + \frac{1}{EI_{y1}} \int_0^{\alpha_0} \cos \alpha \left(\int_0^{\alpha} y_L h_1 \, ds_1 \right) ds_1 +$$

$$+ \frac{1}{EI_{x3}} \int_0^H \left(\int_0^{\beta_0} z_G h_2 ds_2 \right) dt - \frac{1}{EI_{x3}} \int_0^H \left(\int_0^{\alpha_0} x_G h_1 ds_1 \right) dt = 0 \quad (3.45)$$

En posant :

$$A_3 = \frac{1}{EI_{y1}} \int_0^{\alpha_0} ds_1 + \frac{1}{EI_{x3}} \int_0^H dt$$

$$B_3 = \frac{1}{EI_{x3}} \int_0^H dt$$

$$C_3 = \frac{1}{EI_{x3}} \int_0^H \left(\int_0^{\beta_0} z_G h_2 ds_2 \right) dt - \frac{1}{EI_{x3}} \int_0^H \left(\int_0^{\alpha_0} x_G h_1 ds_1 \right) dt$$

$$D_3 = - \frac{1}{EI_{y1}} \int_0^{\alpha_0} \sin \alpha \left(\int_0^{\alpha} x_L h_1 ds_1 \right) ds_1 + \frac{1}{EI_{y1}} \int_0^{\alpha_0} \cos \alpha \left(\int_0^{\alpha} y_L h_1 ds_1 \right) ds_1,$$

l'équation (3.40c) devient:

$$A_3.M_{y1} - B_3.M_{y2} + C_3 + D_3 = 0 \quad (3.46)$$

3.3.3 DETERMINATION DES REACTIONS

Les équations d'équilibre et celles issues de l'application du théorème de CASTIGLIANO (i.e les Eq 3.43 , 3.44 , 3.46) forment un système de 9 équations à 9 inconnues. Nous avons:

$$\begin{aligned}
 N_1 - R_x + E_1 &= 0 & M_{y1} - M_{y2} + E_6 &= 0 \\
 N_2 - R_z + E_2 &= 0 & A_1 N_1 - B_1 M_{z1} + C_1 + D_1 &= 0 \\
 R_y - E_3 &= 0 & A_2 N_2 - B_2 M_{x2} + C_2 + D_2 &= 0 \quad (3.47) \\
 M_{z1} - E_7 N_1 + E_4 &= 0 & A_3 M_{y1} - B_3 M_{y2} + C_3 + D_3 &= 0 \\
 M_{x2} - E_8 N_2 + E_5 &= 0
 \end{aligned}$$

La résolution de ce système donne les réactions. on obtient:

$$\begin{aligned}
 N_1 &= \frac{D_1 + C_1 + B_1 E_4}{-A_1 + B_1 E_7}, & M_{z1} &= \frac{E_4 A_1 + E_7 (D_1 + C_1)}{-A_1 + B_1 E_7}, & M_{y1} &= \frac{E_6 B_3 - D_3 - C_3}{A_3 - B_3}; \\
 N_2 &= \frac{D_2 + C_2 + B_2 E_5}{-A_2 + B_2 E_8}, & M_{x2} &= \frac{E_5 A_2 + E_8 (D_2 + C_2)}{-A_2 + B_2 E_8}, & M_{y2} &= \frac{E_6 A_3 - D_3 - C_3}{A_3 - B_3}; \\
 R_x &= \frac{D_1 + C_1 + B_1 E_4}{-A_1 + B_1 E_7} + E_1, & R_y &= \frac{D_2 + C_2 + B_2 E_5}{-A_2 + B_2 E_8} + E_2, & R_z &= E_3. \\
 & & & & (3.48)
 \end{aligned}$$

3.3.4 Détermination des efforts internes dans les poutres et poteaux

Les réactions étant connues à partir des équations précédentes, à chaque position sur les poutres et poteaux les équations (3.32), (3.33), (3.34) permettent de déterminer les efforts internes. La structure idéalisée est ainsi entièrement résolue.

4.1 BUT DE LA PROGRAMMATION

A cette étape du projet nous allons rendre possible le calcul automatique des:

- des efforts membranaires f_1 , g_1 , h_1 , f_2 , g_2 , et h_2 qui sont les charges directement appliquées sur les poutres,
- réactions et des efforts internes dans les poutres et poteaux.

Nous avons construit à cette fin, deux programmes d'ordinateurs: " CHARGESD " et " TOITSD "; le premier pour le calcul des efforts membranaires et le second pour le calcul des efforts internes à l'ossature du bâtiment.

L'essentiel de ce travail consiste à programmer les efforts f_1 , g_1 , h_1 , f_2 , g_2 , et h_2 et les coefficients et termes issus des relations d'équilibre :

$$A_1, B_1, C_1, D_1, A_2, B_2, C_2, D_2, A_3, B_3, C_3, D_3, E_1, E_2, E_3, E_4, E_5, E_6, E_7, E_9 .$$

Les listing des programmes se trouvent aux annexes A et B du présent rapport.

Nous ne présentons ici que le mode d'utilisation du programme TOITSD. Le programme CHARGESD étant plus facile d'utilisation.

CHAPITRE IV :
PROGRAMMATION

4.2 Mode d'utilisation du programme TOITSD.

2.1 Menu Principale

A l'exécution, le programme présente un **Menu Principal** composé de:

- 1: Fichiers
- 2: Propriétés du Matériau du dôme
- 3: Propriété du Matériau des Poutres et Poteaux
- 4: Géométrie du Bâtiment
- 5: Propriétés de Section de la Poutre sur la Longueur
- 6: Propriétés de Section de la Poutre sur la Largeur
- 7: Propriétés de Section du Poteau
- 0: EXECUTION.

Nous allons prendre chacune des options du Menu principale en vue d'élucider les données appropriées.

4.2.1.1 Fichiers

Cette option permet à l'utilisateur de spécifier le nom de son FICHIER DES DONNEES et celui du FICHIER DES RESULTATS.

Le nom est donné sous la forme suivante:

[Lettre désignant le lecteur K : K Le nom Kextension] .

Le programme va lire les données dans le fichier des données et crée le fichier des résultats indiqués et y conserve les résultats de l'analyse.

Exemple: si la réponse est **b:toit1.pas** , pour le fichier des résultats, les résultats seront copiés dans le fichier **toit1.pas** dans le compartiment **b** qui sera

créé lors de l'exécution du programme.

NE : s'assurer qu'il y a assez d'espace sur la disquette cible.

4.2.1.1.1 Spécification sur le fichier des données

Les valeurs que le programme doit lire dans le fichier des données devraient être entrées dans l'ordre suivant et séparées à chaque fois par un espace () :

Propriétés du dôme

- * Epaisseur de la toiture (m)
- * Poids volumique du matériau de la toiture : γ_g (kN/m³)
- * Résistance à la traction du matériau : \bar{R}_t (kN/m²)
- * Résistance à la compression du matériau : \bar{R}_c (kN/m²)
- * Module de Young du matériau : E_g (kN/m²)

Propriétés du matériau des poutres et poteaux:

- * Module de Young du matériau E_b (kN/m²)

Géométrie du bâtiment

- * Longueur du bâtiment: L (m)
- * Largeur du bâtiment: l (m)
- * Plus Grande Hauteur du Mur sur la largeur: hml (m)

Poutre sur la longueur

- * L'aire de la section de la poutre: a_1 (m²)
- * Le moment d'inertie par rapport à l'axe Y local: I_{y1} (m⁴)
- * Le moment d'inertie par rapport à l'axe Z local: I_{z1} (m⁴)

.....

Poutre sur la largeur

- * L'aire de la section de la poutre: a_2 (m^2)
- * Le moment d'inertie par rapport à l'axe Y local: I_{y2} (m^4)
- * Le moment d'inertie par rapport à l'axe Z local: I_{z2} (m^4)

Poteau

- * Le moment d'inertie par rapport à l'axe X local: I_{x3} (m^4)
- * Le moment d'inertie par rapport à l'axe Y local: I_{y3} (m^4)
- * Le moment d'inertie par rapport à l'axe Z local: I_{z3} (m^4) .

Remarque: Avec cette option, il est aussi possible d'envoyer tous les résultats sur imprimante.

4.2.1.2 Propriétés du matériau de la toiture dôme

Il s'agit des propriétés suivantes:

- épaisseur : h (m)
- le poids volumique du matériau : γ (kN/m^3)
- la valeur de la résistance à la traction du matériau : \bar{R}_t (kN/m^2)
- la valeur de la résistance à la compression du matériau : \bar{R}_c (kN/m^2) .
- la valeur du module de Young du matériau : E (kN/m^2) .

4.2.1.3 Propriété du matériau des poutres et poteaux.

Ici, il s'agit essentiellement de donner la valeur du module de Young E (kN/m^2) du matériau unique constituant les poutres et poteaux du bâtiment.

4.2.2.4 La Géométrie du dôme

Le programme demande:

- la longueur du bâtiment: L (m)
- la largeur du bâtiment: J (m)
- Plus Grande Hauteur du Mur sur la largeur h_{ml} (m) montré à la figure 4.2.2.4

A partir de ces valeurs, le programme calcule ϕ_b et R (rayon de la sphère qui épouse les dimensions données) a et b (les rayons des poutres) et procède à la vérification des inégalités (2.5)/(2.7)/(2.11) sur les capacités internes du dôme.

En cas de non respect de ces inégalités, un message est écrit et qui peut être:

- LA TOITURE NE RESISTE PAS A LA TRACTION ou
- LA TOITURE NE RESISTE PAS A LA COMPRESSION ou
- LA TOITURE NE RESISTE PAS AU FLAMBAGE.

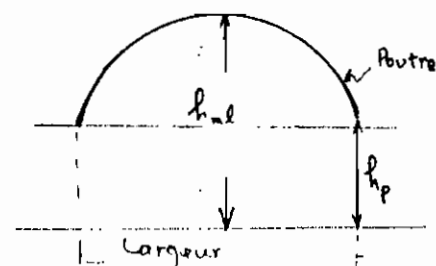


Fig 4.224 : Définition de h_{lm}

4.2.2.5 Propriétés de section de la poutre sur la longueur du bâtiment

Il s'agit des propriétés suivantes:

- l'aire de la section de la poutre
- le moment d'inertie par rapport à l'axe Y local
- le moment d'inertie par rapport à l'axe Z local

4.2.2.6 Propriétés de section de la poutre sur la largeur du bâtiment

Il s'agit des propriétés suivantes:

- l'aire de la section de la poutre
- le moment d'inertie par rapport à l'axe Y local
- le moment d'inertie par rapport à l'axe Z local

4.2.2.7 Propriétés de section des poteaux

Il s'agit des propriétés suivantes:

- le moment d'inertie par rapport à l'axe X local
- le moment d'inertie par rapport à l'axe Y local
- le moment d'inertie par rapport à l'axe Z local

4.2.2.8 EXECUTION

Le programme calcule et conserve dans le fichier résultat:

- Les réactions aux noeuds 1, 2, 3 (voir figure 3.32)
- Les efforts aux $10^{\text{ième}}$ de portée des poutres et du poteau.
- Les efforts maximaux en valeurs absolues sur les trois éléments.

Les résultats du cas du bâtiment que nous avons dimensionner dans le **chapitre VI** sont imprimés à l'annexe B du rapport.

Ces résultats sont confrontés aux ceux donnés par le programme d'éléments

finis: **IMAGES-3D** dont nous présentons un bref aperçu dans le chapitre suivant.

CHAPITRE V :

BREF APERCU SUR I M A G E S 3 D

5.1 INTRODUCTION

IMAGES-3D (.....) est un logiciel de calcul de structures par la Méthode des Eléments Finis. Cette méthode consiste en une approximation technique utilisée pour remplacer un système continu par un système discret équivalent. La structure est divisée en un nombre fini d'éléments. Les éléments sont interconnectés par des points nodaux disposés de façon discrète. Chaque élément est défini de façon unique par des noeuds à ses contours. La structure à analyser peut être composée de différents éléments. Les types d'éléments suivants sont disponibles dans le logiciel:

- les éléments barres,
- les élément poutres,
- les éléments plaques fléchies,
- les éléments plaques non-fléchies,
- les éléments plaques plissées,
- les éléments ressorts linéaires et non linéaires,
- les éléments solides symétriques et axi symétriques.

Il est supposé que les usagers de IMAGES-3D ont une connaissance de base de la Méthode des Eléments Finis. Deux aptitudes importantes sont requises pour les usagers. La première est l'habileté à générer le model approprié d'éléments finis d'une structure donnée. La deuxième est la capacité d'interprétation des résultats

.....

du logiciel en vue d'avoir des informations significatives sur les caractéristiques physiques de la structure.

IMAGES-3D est écrit en quatre langages: Basic , Fortran , Assembly , et C.

Il est structuré comme programme d'exécution de menus. En effet on l'exécute en choisissant des entités des menus individuellement. Les menus disponibles sont: **Geometry , Static , Modal et dynamic** . dans ce résumé nous ne parlerons que des deux premières options.

5.2 GEOMETRIE

Décrire la géométrie d'un model peut être l'étape qui consomme le plus de temps dans le processus d'analyse par éléments finis. IMAGES-3D est spécialement programmé pour simplifier cet étape avec beaucoup de possibilités de générations de noeuds et d'éléments. Parmi les options de ce menu " GEOMETRY" nous parlerons de: "Create/Edit Geometry".

5.2.1 Créer/Editer une Geometrie.

L'option "Create/Edit Geometry" permet de créer et/ou d'éditer la géométrie d'un model donné. Dans cette section, on définira les **Noeuds**, les **Eléments**, les **Matériaux** qui constituent ces éléments, les propriétés des **Sections des éléments** et les types d'**Appuis**.

5.2.1.1 Définir les propriétés du matériau

L'option "Define Material properties" permet de définir les propriétés du matériau constituant l'élément. Ces propriétés sont entrées l'ordre suivant:

- le module d'élasticité de Young (E), (F/L^2),
- la densité du matériau (γ), (F/L^3),
- le coefficient d'expansion thermique (α), ($L/Lm/Deg$),
- le coefficient de Poisson (ν), (sans dimension),
- le module de cisaillement (F/L^2).

Il existe dans le logiciel dans valeurs par défaut qui sont automatiquement prises en cas d'abstension ce sont:

$$E = 30.0 \times 10^6 \text{ psi} \quad \alpha = 6.33 \times 10^{-6} \text{ in/in/}^\circ\text{F}$$

$$\rho = 0.283 \text{ lbs/in}^3 \quad \nu = 0.3 \quad G = 0.0$$

Tous les matériaux définis sont numérotés de façon automatique. Un maximum de 100 matériaux est permis.

5.2.1.2 Définir les noeuds.

Les noeuds sont entrés de la façon suivante:

X , Y , Z , Noeud directionnel. où :

X, Y, Z sont les coordonnées du noeud dans le repère global si le noeud directionnel est 0 ,c'est-à-dire (0,0,0). dans le cas contraire , X,Y,Z sont les coordonnées relativement au noeud de direction.

Pour générer des noeuds à partir de ceux déjà entrés, l'option "Generate" est

.....

appelée par la lettre G et permet de générer des noeuds et même des éléments de façon linéaire, quadratique, circulaire, sphériques ou autres.

Tous les noeuds définis ou générés sont numérotés de façon automatique. Un maximum de 3000 noeuds est permis.

5.2.1.3 Définir les éléments.

Une fois les noeuds du model définis, les types d'éléments peuvent être définis. Il est possible d'utiliser l'option "Generate" pour générer des noeuds et des éléments simultanément.

5.2.1.3.1 Définir les poutres.

L'option "Define Beam" est utilisée pour définir les éléments poutres. Les données sont entrées de la façon suivante:

- le noeud I de départ ,
- le noeud J d'arrivée,
- le noeud K pour l'orientation de la section de la poutre.

l'axe y du repère local pointe dans la direction de K, (voir fig: 5.2.1.3.1)

l'axe des X du repère local est orienté de I à J,

l'axe des Z du repère local est déterminé par la " Règle de la main droite ",

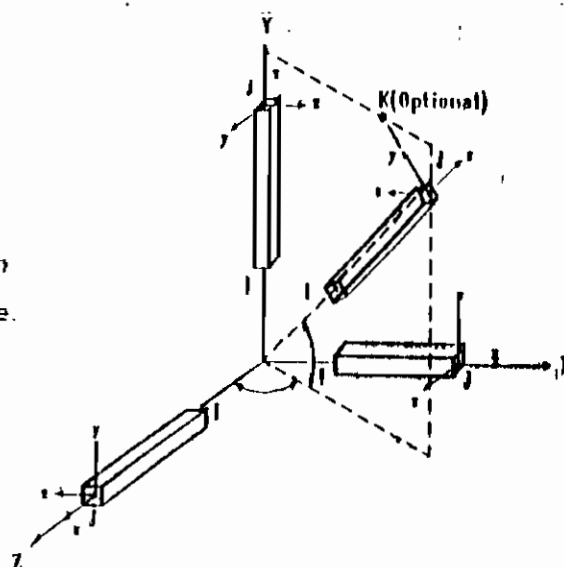
- numéro sous lequel sont identifiées les propriétés de la section de poutre.
- numéro sous lequel sont identifiées les propriétés du matériau constituant la poutre.

- les conditions d'appui de la poutre en I et J

Tous les éléments poutres et/ou barres définis sont numérotés de façon automatique. Un maximum de 3000 éléments poutres et/ou barres est permis.

Fig 5.2131 :

Définition d'un
élément poutre.



5.2.13.2 Définir les éléments plaques

La sous section "Define Membrane Plates" permet de définir les éléments plaques triangulaires ou quadrilatéraux à comportement de membrane qui peuvent être utilisés pour analyser les problèmes d'élasticité bidimensionnels. Les éléments plaques sont basés sur la théorie des petites déformations, les noeuds définissant la plaque sont contraints aux déplacements dans le plan de l'élément.

Les éléments plaques sont définis de la façon suivante:

- I, J, K, L : les noeuds qui définissent l'élément (dans le sens horaire ou anti-horaire); pour les plaques triangulaires, ne pas entrer I

- le numéro sous lequel sont indentifiées les propriétés du matériau constituant l'élément.
- l'épaisseur de la plaque
- épaisseur de l'âme pour les plaques non homogènes (épaisseur non constante).

Il est possible de générer des plaques avec l'option "Generate"

Tous les éléments plaques définis sont numérotés de façon automatique. Un maximum de 3000 éléments plaques est permis.

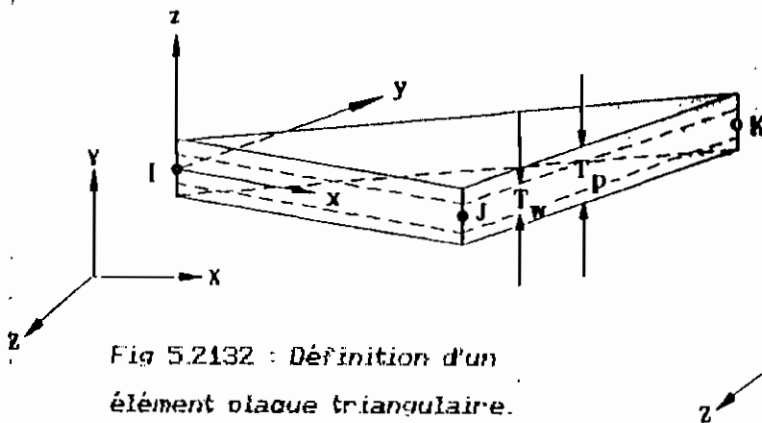


Fig 5.2132 : Définition d'un élément plaque triangulaire.

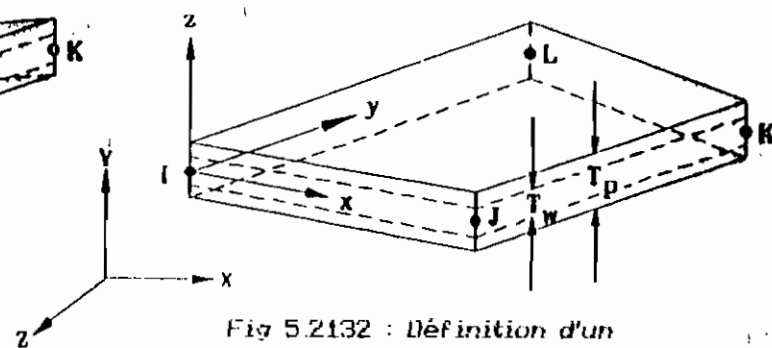


Fig 5.2132 : Définition d'un élément plaque quadrilatère

5.2.1.4 Définir les propriétés de section

L'option "Define Cross-section Properties" permet de définir les propriétés des sections des éléments poutres et barres. Pour les éléments poutres les données sont entrées de la façon suivante:

- l'aire de la section,
- le moment d'inertie par rapport à l'axe Y dans le repère local (I_{yy}),
- le moment d'inertie par rapport à l'axe Z dans le repère local (I_{zz}),
- la constante de Torsion (J) de la section dont la détermination pour une section

- rectangulaire est montrée sur la figure (5.2.14.a) tirée de la référence N°6
- la distance (C_y) du milieu de la section à l'extrémité sur Y local
 - la distance (C_z) du milieu de la section à l'extrémité sur Z local
 - le facteur de cisaillement de la section (SF_y) dans la direction de l'axe Y local. Pour les sections rectangulaires, $SF_y = 1.2$.
 - le facteur de cisaillement de la section (SF_z) dans la direction de l'axe Z local. Pour les sections rectangulaires, $SF_z = 1.2$.
 - Alors (voir figure (5.2.14.b) tirée de la référence N°6)
 - facteur de contrainte de cisaillement de la section (SSF_y) dans la direction de l'axe Y local. Pour les sections rectangulaires, $SSF_y = 1.5$
 - facteur de contrainte de cisaillement de la section (SSF_z) dans la direction de l'axe Z local. Pour les sections rectangulaires, $SSF_z = 1.5$.
- L'ensemble des propriétés de la poutre est numéroté de façon automatique. Un maximum de 100 ensembles de propriétés de sections est permis

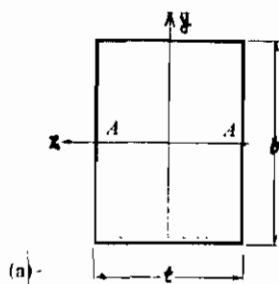
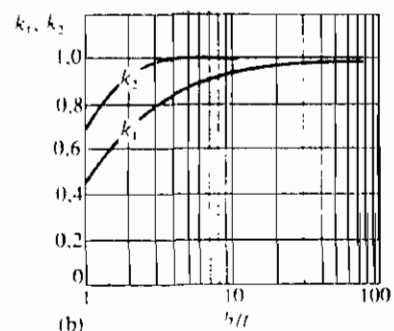


Fig 5.214a : Section de poutre

Fig 5.214b : Détermination de J et $Ctors$

5.2.1.5 Définir les conditions d'appuis

L'option "Define restraints" permet de définir les conditions d'appuis à un noeud du model. Les restraints sont entrées de la façon suivante:

- noeud de départ,

- le code qui procède aux suppressions des Degrés de Libertés:

* 1 = suppression de la translation dans la direction X du système global de coordonnées

* 2 = suppression de la translation dans la direction Y du système global de coordonnées

* 3 = suppression de la translation dans la direction Z du système global de coordonnées

* 4 = suppression de la rotation dans la direction X du système global de coordonnées

* 5 = suppression de la rotation dans la direction Y du système global de coordonnées

* 6 = suppression de la rotation dans la direction Z du système global de coordonnées.

N'importe quelle combinaison de 1 à 6 peut être utilisée.

Exemple: 123456 définit un encastrement.

Pour les éléments plaques les nombres sont précédés d'un signe moins (-) pour la suppression des degrés de libertés dans le repère local.

-l'incrémentation à partir du noeud de départ au noeud de la fin.

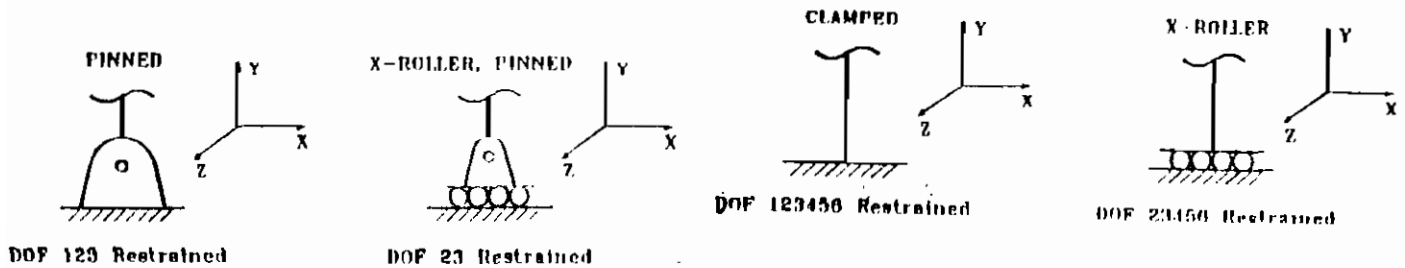


Fig 5.215 : Types d'appuis.

5.3 ANALYSE STATIQUE

Au même titre que la Géométrie, l'option "Static Analysis" permet de définir les chargements.

Les charges consistent en n'importe quelle combinaison de charges concentrées, de déplacements forcés, de charges de gravités, de charges d'inerties, de charges distribuées, de charges thermiques, et de pressions.

C'est dans ce menu que la matrice de rigidité, les déplacements, les efforts et contraintes sont calculés. Ce menu est composé entre autre des sous-menu suivants:

- 1- "Create/Edit Loads" , 2- "Assemble Stiffness Matrix" ,
- 3- "Solve Displacements" , 4- "Solve Loads, Stresses, Reactions".

5.3.1 Définir les chargements

cette section permet de définir les chargements avec l'option "Create/Edit Loads".

5.3.1.1 Définir le numéro du chargement

cette sous-section de la section précédente permet de numéroter les

.....

changements à définir avec l'option "Set Load Case Number".

5.3.1.2 Titrer les changements

L'option "Define Load Case Title" permet de titrer les différents cas de changements à définir: **exemple** : "changement suivant X".

5.3.1.3 Définir les charges concentrées

L'option "Define concentrated Loads" permet de définir les coefficients des charges concentrées en des noeuds ou entre les noeuds d'un élément poutre ou barre. Les coefficients sont entrés de la façon suivante:

- coefficient suivant la direction X,
- coefficient suivant la direction Y,
- coefficient suivant la direction Z.

Les charges concentrées sont entrées de la façon suivante:

- numéro du noeud,
- numéro de la direction de la charge

* 1 = direction de l'axe X

* 2 = direction de l'axe Y

* 3 = direction de l'axe Z

- la valeur de la charge,

ou encore,

- noeud de départ,
 - numéro de la direction de la charge,
-

.....

la valeur de la charge.

- noeud d'arrivée.
- incrémentation.

5.3.2 Matrice de rigidité

L'option "**Assemble Stiffness Matrix**" permet de calculer la matrice de rigidité globale de la structure. passage obligée avant le calcul des déplacements, efforts, contraintes et réactions.

5.3.3 Déplacements

L'option "**Solve Displacement**" permet de calculer les déplacements aux noeuds de la structure.

5.3.4 Calcul des Efforts, Contraintes, et Réactions

L'option "**Solve Loads, Stresses, and Reactions**" permet de calculer les efforts, contraintes et réactions aux noeuds et aux appuis.

Nous n'avons présenté dans ce chapitre que les options qui nous ont permis de travailler dans l'environnement de IMAGES-3D. Le logiciel est vaste et peut permettre l'analyse de beaucoup d'autres types de structures avec ou sans les options énumérées dans les paragraphes précédents. Tout lecteur intéressé peut trouver dans la référence N°7, des informations supplémentaires.

Les résultats donnés par le programme pour le cas du bâtiment dimensionné dans le chapitre suivant sont imprimés à l'annexe D du rapport; avec une analyse des écarts entre ces résultats et ceux de notre programme..

.....

CHAPITRE VI:

DIMENSIONNEMENT

6.1 DONNEES

Nous avons pris un exemple de bâtiment que nous avons dimensionné avec les résultats de l'analyse du programme TOITSD.

Les données sur le bâtiment sont les suivantes:

Poutres : 250 x 250 (mm²), Poteaux : 300x300 (mm²).

* $e_p = 0.08$ m	* $E_b = 2.10^7$ kN/m ²	* $a_1 = 0.0625$ m ²
* $\gamma_g = 22$ kN/m ²	* $L = 4.00$ m	* $I_{y1} = 3.255 \cdot 10^{-4}$ m ⁴
* $\bar{R}_t = 135$ kN/m ²	* $l = 4.00$ m	* $I_{z1} = 3.255 \cdot 10^{-4}$ m ⁴
* $\bar{R}_c = 1500$ kN/m ²	* $h_{ml} = 3.00$ m	* $h_p = 2.24$ m (poteaux)
* $E_g = 2.510^5$ kN/m ²		
	* $a_2 = 0.0625$ m ²	* $I_{x3} = 0.00189$ m ⁴
	* $I_{yz} = 3.255 \cdot 10^{-4}$ m ⁴	* $I_{y3} = 6.75 \cdot 10^{-4}$ m ⁴
	* $I_{z2} = 3.255 \cdot 10^{-4}$ m ⁴	* $I_{z3} = 6.75 \cdot 10^{-4}$ m ⁴

- Propriétés du béton et de l'acier

- * Poids volumique du béton $\gamma_b = 2400$ Kg/m³
- * Résistance à la compression du béton à 28j : $f'_c = 30$ MPa
- * $f_y = 400$ MPa (acier)

- Coefficients de Pondération

* Poids propre : 1.25

* Surcharge : 1.50

6.2 Résultats de l'analyse du Poids Propre par le programme TOIT.SDE

Nous avons choisit un bâtiment carré avec des poutres à sections identiques;
l'analyse a montré qu'elles sont sollicitées effectivement au même degré.

- Poutres 1 et 2

* N_D = 6.76 kN (compression)

* V_D = 7.39 kN (effort tranchant suivant Y local)

* Q_D = -0.43 kN (effort tranchant suivant Z local)

* M_{zD} = 8.46 kN.m (moment autour de Z local)

* M_{yD} = 0.43 kN.m (moment autour de Y local)

- Poteaux

* N_D = 20.74 kN (compression)

* V_D = 0.92 kN (effort tranchant suivant Y local)

* Q_D = 0.92 kN (effort tranchant suivant Z local)

* M_{yD} = 0.43 kN.m (moment autour de Y local)

* M_{zD} = 0.43 kN.m (moment autour de Z local).

6.3 Détermination des efforts dus à la surcharge.

Nous allons considérer une valeur de surcharge uniformément répartie de 1kN/m^2 .

Par une règle de trois incluant les efforts dus au poids propre qui est de:

$$P = \gamma_{g,ep} = 22 \times 0.08 \approx 1.76 \text{ kN/m}^2 \text{ nous avons:}$$

- Poutres 1 2

$$* N_L = 3.84 \text{ kN (compression)}$$

$$* V_L = 4.20 \text{ kN (effort tranchant suivant Y local)}$$

$$* Q_L = 0.24 \text{ kN (effort tranchant suivant Z local)}$$

$$* M_{zL} = 4.81 \text{ kN.m (moment autour de Z local)}$$

$$* M_{yL} = 0.24 \text{ kN.m (moment autour de Y local)}$$

- Poteaux

$$* N_L = 11.76 \text{ kN (compression)}$$

$$* V_L = 0.52 \text{ kN (effort tranchant suivant Y local)}$$

$$* Q_L = 0.52 \text{ kN (effort tranchant suivant Z local)}$$

$$* M_{yL} = 0.24 \text{ kN.m (moment autour de Y local)}$$

$$* M_{zL} = 0.24 \text{ kN.m (moment autour de Z local)}$$

6.4 CALCUL D'ARMATURES DES POUTRES

6.4.1 Armature de flexion

6.4.1.1 Moment M_z

- Moment dû à la toiture

$$M = 1.25 \times M_{zD} + 1.5 \times M_{zL} = 1.25 \times 8.46 + 1.5 \times 4.81 = 17.79 \text{ kN.m}$$

- Moment dû au poids propre de la poutre.

*longueur de la poutre:

$$\begin{aligned} L_p &= a \times \alpha_0 \\ &= 3 \times 0.73 = 2.19 \text{ m.} \end{aligned}$$

*poids propre poutre pondéré :

$$\begin{aligned} p &= a \times \gamma_b \times 1.25 \\ &= 0.0625 \times 2400 \times 10 \times 10^{-3} \times 1.25 \\ &= 1.88 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

Pour un dimensionnement sécuritaire, nous allons considérer la poutre droite de même longueur encastree aux extremités. Le moment maximum en valeur absolue est donne par:

$$\begin{aligned} M &= \frac{1}{12} pL^2 && (6.1) \\ &= \frac{1}{12} \times 1.88 \times (2.19)^2 = 0.75 \text{ kN/m.} \end{aligned}$$

Le moment de design est alors:

$$M_f = 17.8 + 0.75 \cong 19 \text{ kN.m.}$$

* Calcul de la quantité d'armature requise

$$K_r = \frac{M_f \times 10^6}{bd^2} = \frac{19 \times 10^6}{250 \times 210^2} = 1.723 \text{ MPa.} \quad (6.2)$$

Du tableau 4.5 à l'annexe B , on trouve:

$$100\rho = 0.54$$

$$A_s = 0.0054 \times 250 \times 210 = 284 \text{ mm}^2$$

Utiliser 2 barres n° 20 (voir le tableau des barres à l'annexe B)

$$A_s \text{ prévue} = 2 \times 300 = 600 \text{ mm}^2$$

Du tableau 4.4 à l'annexe B ,

$$\rho_{\max} = \rho_b = 0.0230$$

$$\rho_{\min} = 0.0035$$

Donc,

$$\rho_{\min} = 0.0035 < \rho = \frac{600}{250 \times 210} = 0.0114 < 0.023 \quad \text{O.K.}$$

5.4.1.2 Moment M_y

$$M_{yf} = 1.25 \times 0.43 + 1.5 \times 0.24 \cong 0.9 \text{ kN.m}$$

on utilisera l'armature minimale pour reprendre ce moment soit:

$$A_s = 0.0035 \times 250 \times 210 = 184 \text{ mm}^2 \text{ soit ,}$$

2 barres n° 15 (section totale = 400 mm²)

Remarque :

Nous devrions tenir compte du fait que la barre située sur la fibre, extrême fléchie suivant Y et Z, travaille aussi bien suivant M_z que M_y mais cette section est suffisamment armée pour répondre à ces sollicitations.

(A_S réelle = 284 mm², A_S prévue = 600 mm²).

6.4.1.3 Effort tranchant

* dû à la toiture:

$$V_{fT} = 1.25 \times 7.39 + 1.5 \times 4.2 = 15.54 \text{ kN}$$

* dû au poids propre de la poutre:

$$V_{fP} = 1.25 \times \left(\frac{1}{2} \times 1.88 \times 2.19 \right) = 2.57 \text{ kN.}$$

*Effort tranchant total

$$V_f = 15.54 + 2.57 = 18.11 \text{ kN}$$

* Valeur maximale de l'effort tranchant repris par la poutre :

$$V_c = 0.2 \lambda \phi_c \sqrt{f'_c} b d \quad (6.3)$$

$$= 0.2 \times 1 \times 0.6 \times \sqrt{30} \times 250 \times 210 \times 10^{-3} = 34.51 \text{ kN.}$$

$V_c > V_f \Rightarrow$ on utilise seulement les étriers d'attache (cadres de barres n°10).

espacement maximal de : $\frac{d}{2} = \frac{210}{2} = 105 \text{ mm.}$ Soit $n = \frac{2190}{105} \cong 21$ cadres pour une moitié de la poutre.

Remarque:

Il n'est pas nécessaire de dimensionner pour l'effort tranchant suivant Z: l'effort tranchant suivant Y étant plus grand et les étriers formant un cadre.

6.4.1.4 Effort normal

Nous allons inclure dans le dimensionnement, l'effort normal dû au poids propre de la poutre à la jonction avec le poteau .

Avec la clé de la poutre

$$h = (3 - 2.2361) = 0.764 \text{ m} \quad \text{et} \quad l = 4 \text{ m}$$

on calcule $h/l = 0.19$

A cette valeur de h/l correspond un facteur de 0.61 pour (H/wl) dans la table 10.4.1 (fournie à l'annexe) construite pour la détermination des efforts dans un arc encastré .

$$\begin{aligned} N_{fp} &= 1.25 \times 0.61 \times 1.88 \times 4 \times \sin(48.19^\circ) + && \text{(H projeté sur X local)} \\ &+ 1.25 \times 0.5 \times 1.88 \times 4 \times \cos(48.19^\circ) && \text{(V projeté sur Y local)} \\ &= 7.41 \text{ kN} && \text{(voir annexe B: H et V)} \end{aligned}$$

Remarque:

Nous avons approximé le poids propre à une surcharge uniforme de même norme.

La charge normale due à la toiture étant de :

$$N_{fp} = 1.25 \times 6.76 + 1.5 \times 3.84 = 14.21$$

alors l'effort normal total est:

$$N_f = 7.41 + 14.21 = 21.62 \text{ kN}$$

Section d'armature:

Le béton peut reprendre un effort de compression de :

$$\begin{aligned} N_c &= \phi_c f'_c (A_g - A_{st}) \quad (6.4) \\ &= 0.6 \times 30 \times (250 \times 250 - 1000) \times 10^{-3} \\ &= 1107 \text{ kN} \gg N_f = 21.62 \text{ kN} \end{aligned}$$

Cette valeur étant de loin supérieure à celle de l'effort normal sollicitant, le béton pourra résister à cette sollicitation

En résumé, la poutre sera armée de la manière suivante:

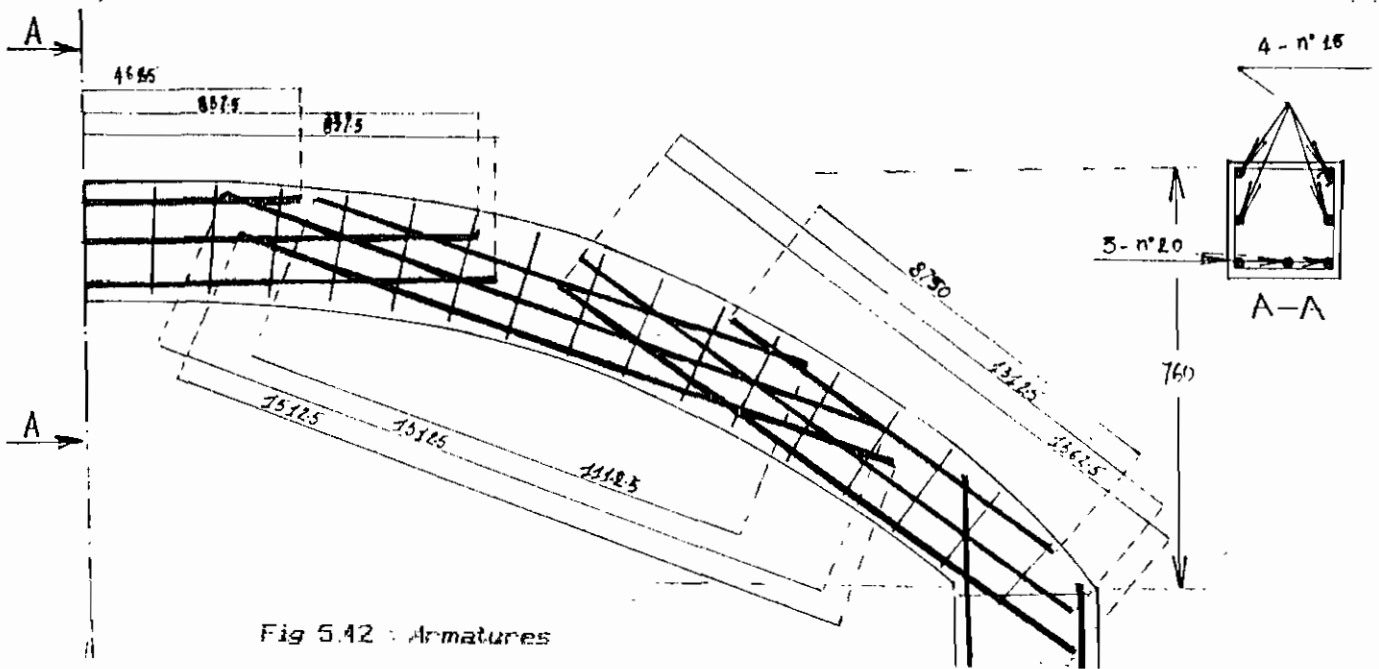


Fig 5.42 : Armatures
des poutres

6.5 CALCUL D'ARMATURES DU POTEAU

* Hauteur : 2240 mm

* section : $300 \times 300 \text{ mm}^2$

$$\begin{aligned} * P_f &= 1.25 \times 20.74 + 1.5 \times 11.78 + 1.25 \times (1.88 \times 2.19 \times 0.73) \\ &= 47.35 \text{ kN.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} * M_f &= 1.25 \times 0.43 + 1.5 \times 0.24 + 0.75 \times 1.25 \text{ (fois 2 poutres)} \\ &\cong 2.80 \text{ kN.m} \end{aligned}$$

6.5.1 élancement:

coefficient de flambement : $k = 0.81$ (voir tableau 11.1 à l'annexeB)

* rayon de giration $r = 0.3 \times 300 = 90 \text{ mm}$

$$\frac{k l_u}{r} = \frac{0.81 \times 2240}{90} = 20.16$$

6.5.2 Vérification du type de poteau

$$\frac{k l_u}{r} < 34 - 12 \cdot \frac{M_1}{M_2}, \quad 20.16 < 34 \text{ on peut négliger l'effet de l'élancement.}$$

($\frac{M_1}{M_2} = 0$ pour des poteaux intérieurs sous le toit ou au niveau des semelles)

6.5.3 utilisation du diagramme d'interaction

$$\frac{P_f}{A_g} = \frac{47.35 \cdot 10^3}{300 \times 300} = 0.53 \text{ MPa}$$

$$\frac{M_f}{A_g h} = \frac{2.80 \cdot 10^6}{300 \times 300 \times 300} \cong 0.104 \text{ MPa} \quad (6.5)$$

$$\gamma_h = 300 - 2(40 + 11.3 + 19.5/2) = 117.5 \Rightarrow \gamma \approx 0.60$$

Avec $\frac{F_f}{A_g}$, $\frac{M_f}{A_g h}$, γ , f_c , f_y le diagramme d'interaction fourni à l'annexe B

donne $\rho_g = 0.01$ (pourcentage minimal d'armature)

$$\Rightarrow A_s = 0.01 \times 300 \times 300 = 900 \text{ mm}^2$$

utiliser 6 barres n°15 (section prévue = 6 x 200 = 1200 mm²)

Les efforts tranchants sollicitant le poteau étant faibles (1.93 kN), l'armature transversale suffit; encore que le béton seul est capable de résister à

$$V_c = 0.2 \times 0.6 \times \sqrt{30} \times 300 \times 300 \times 10^{-3} = 59.15 \text{ kN}$$

6.5.4 Vérification des étriers

L'espacement doit être égal à la plus faible des valeurs suivantes.

$$16 \times (d_{\text{barre}}=19.5) = 312 \text{ mm}$$

$$48 \times 11.3 = 542 \text{ mm}$$

la plus petite dimension du poteau = 300 mm

Donc on choisit 300 mm pour l'espacement des étriers.

Le ferrailage du poteau est le suivant :

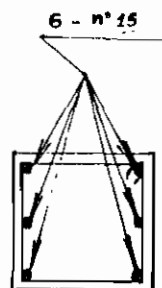


Fig 5.51 : Armatures
des poteaux.

5.6 CALCUL D'ARMATURES DES SEMELLES.

5.6.1 Effort de compression:

-charges pondérées

$$P_f = 47.95 + 1.25 \times 0.3 \times 0.3 \times 2.24 \times 2400 \times 10 \times 10^{-3}$$

$$= 53.40 \text{ kN}$$

-charges de service

$$P = 20.74 + 11.78 + 4.84$$

$$= 37.36 \text{ kN}$$

-Pression admissible q_a sur le sol :

$$q_a = 150 \text{ kN/m}^2 \quad \text{à} \quad 0.5 \text{ mètre}$$

-Poids des terres :

$$\gamma_t = 1600 \text{ Kg/m}^3.$$

5.6.2 Calcul de la surface de semelle requise

La surface approximative requise sans tenir compte du poids propre de la semelle et du remblai au-dessus de la semelle est égale à

$$\frac{37.36}{150} = 0.25 \text{ m}^2$$

On prend une surface carrée de

$$A = 1 \times 1 = 1 \text{ m}^2$$

En supposant une hauteur de semelle de 300 mm, on calcule :

- le poids propre de la semelle :

$$0.3 \times 1 \times 2400 \times 9.81 \times 10^{-3} = 7.06 \text{ kN}$$

- le poids propre du remblai

$$(0.5-0.3) \times 1 \times 1600 \times 9.81 \times 10^{-3} = 3.14 \text{ kN}$$

La pression sur le sol est :

$$q = \frac{7.06 + 3.14}{1} = 10.20 \text{ kN/m}^2 < 200 \text{ kN/m}^2 = q_a, \text{ donc acceptable.}$$

6.6.3 Calcul de la pression q_s

La charge pondérée totale sur le poteau est égale à

$$P_f = 53.40 \text{ kN}$$

$$q_s = \frac{53.40}{1} = 53.40 \text{ kN/m}^2$$

- Calcul de la hauteur utile d de la semelle

supposons $d = 200\text{mm}$ et vérifions la valeur des efforts tranchants dans les cas suivants:

* poutre de grande largeur

dans ce cas la section critique se situe à d du nu du poteau

$$V_f = q_s \times 1 \times (1/2 - 0.2 - 0.15)$$

$$V_f = 53.40 \times 1 \times (1/2 - 0.2 - 0.15) = 8 \text{ kN}$$

$$V_c = 0.2 \times \phi_c \times \sqrt{f'_c} \times b \times d = 0.2 \times 0.6 \times \sqrt{30} \times 1000 \times 200 \times 10^{-3} = 131.45 \text{ kN}$$

$V_c > V_f \Rightarrow$ le béton seul suffit pour reprendre le cisaillement.

✳ Vérification au poinçonnement

dans ce cas la section critique se trouve à une distance $d/2$ de la périphérie du poteau . l'effort tranchant pondéré dû à la pression du sol est égal à

$$V_f = q_s \times [1 - (0.3 + 0.2)^2]$$

$$V_f = 53.4 \times [1 - (0.3 + 0.2)^2] = 40.05 \text{ kN}$$

$$V_0 = 0.4 \times 1 \times 0.6 \times \sqrt{30} \times [4 \times (300 + 200)] \times 200 \times 10^{-6} = 525.81 \text{ kN}$$

$V_0 \gg V_f \Rightarrow$ la section résiste au poinçonnement.

5.6.4 Calcul du moment fléchissant et de l'armature requise

Le moment fléchissant pondéré M_f calculé au nu du poteau est égal à

$$M_f = q_s \times 1 \times (0.3 - 0.15)^2 = 53.40 \times 0.6 \times (0.15)^2 = 1.2 \text{ kN.m}$$

ce moment étant petit, il suffira de mettre l'armature minimale soit:

$$0.0035 \times 1000 \times 200 = 700 \text{ mm}^2$$

utiliser 5 barres n° 15 dans chaque direction.

4 goujons n°15 pour la transmission des efforts du poteau à la semelle.

La longueur d'ancrage droit en compression pour ces goujons est égale à la plus grande des valeurs suivantes:

$$l_d = \frac{0.24 d_b f_y}{\sqrt{f'_c}} = \frac{0.24 \times 16 \times 400}{\sqrt{30}} = 280 \text{ mm} \quad (6.6)$$

$$l_d = 0.044 d_b f_y = 0.044 \times 16 \times 400 = 281.6 \text{ mm}$$

longueur disponible , 200 mm.

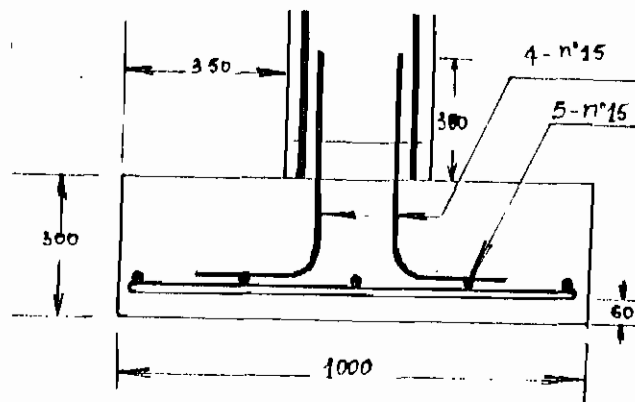


Fig 5.61 : Armatures
des semelles.

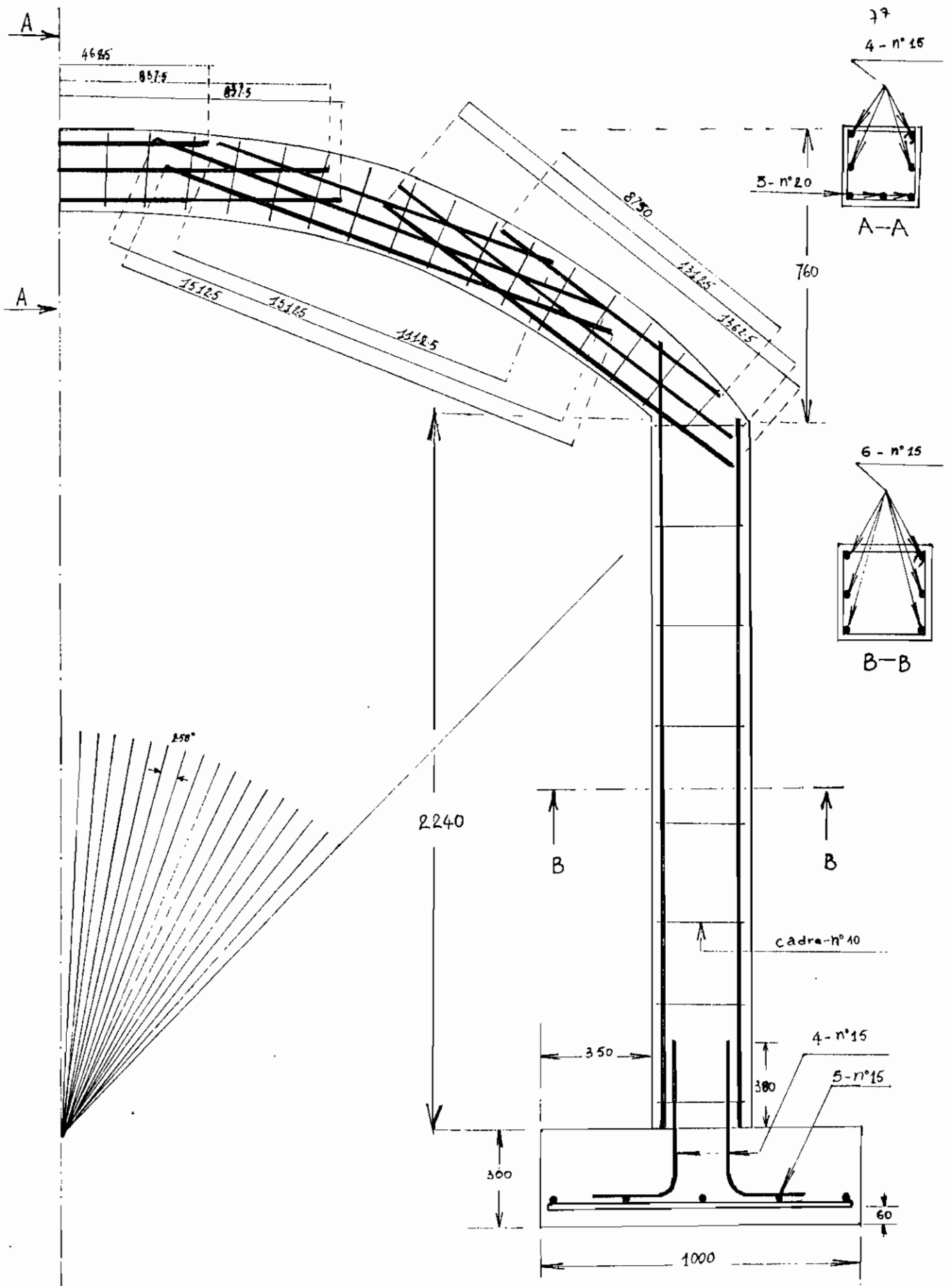


Fig 5.62 : Schéma de ferrail-
lage d'ensemble

CHAPITRE VII:

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

L'importance du géobéton n'est plus à démontrer aujourd'hui dans une AFRIQUE financièrement anémiée, qui ne trouverait son salut, tout au moins dans le domaine de l'habitat, qu'en utilisant ces matériaux locaux. Ceci réduirait les dépenses faites pour l'acquisition des matériaux importés, pour la plupart à des prix exorbitants.

On perçoit dès lors l'importance du géobéton et la justification d'importants moyens en vue de maîtriser ses caractéristiques surtout mécaniques. L'état actuel des recherches ne permet pas encore une utilisation osée du matériau, mais constituent une base de données assez satisfaisantes pour les utilisations modérées.

Pour le cas de la latérite de THIES, qui est prise comme référence dans ce projet, nous pourrions faire les conclusions et recommandations suivantes:

A pourcentage de stabilisant et d'eau constants, le géobéton présente différentes capacités suivant la nature des blocs de latérite, leur granulométrie et le degré de compactage. Un bon compactage augmentera la densité et les résistances mécaniques également.

.....

Pour la latérite de THIES, avec une granulométrie bien étalée, un bon comportement à l'essai Los Angelès, avec un compactage suffisant et pour un dosage de 6% en ciment et 16% en eau, on peut s'attendre à une résistance à la compression au moins égale à 15 daN/cm^2 .

Notons qu'il n'est pas économique de combler le manque de résistance par un surdosage en ciment; ceci pourrait provoquer une granulométrie non-étalée qui résulterait en un changement de résistance mécanique très peu économique.

Nous proposerons, sur la base de nos investigations sur le géobéton, d'évaluer sa résistance à la traction à 10% de sa résistance à la compression. Signalons que pour le béton classique, ce pourcentage est pratiquement le même.

une attention particulière devra être accordée à la réalisation de la surface sphérique en vue d'éviter la maximum de déviations par rapport à la sphère réelle. Il semblerait que ceci n'est pas facile à réaliser, mais on réalise néanmoins de belles coupoles en utilisant : soit la méthode d'amas de sable comme gabarit ou celle d'un coffrage standard réutilisable.

Pour l'analyse de l'ossature du bâtiment, il serait aussi intéressant d'inclure des tirants à la jonction des poutres et poteaux, en vue de prévenir les poussées horizontales capables de s'intensifier en fonction des dimensions de la toiture.

ANNEXE A :

.....

FICHER : TOITURE.PAS
AUTEUR : SOUDE Coffi Clément
DATE : 28 Juin 1993

DESCRIPTION: Ce programme calcule les efforts dans les poutres
et poteaux d'un bâtiment type dont la toiture a une
forme SPHERIQUE et développe des efforts MEMBRANAIRES.

CONSTANTES ET TYPES REQUIS:

Les constantes et types requis sont déclarés dans ce
fichier.

.....

PROGRAM TOITURE:

```
Uses crt, printer;

const
    n=40;

var
    nom,nomi:string[15];
    resultat,ancien:text;
    finish, terminer:boolean;
    reponse:char;
    pv,aa,x00,y00,x01,y01,b00,longueur,largeur,r,s,a;
```

.....

TOITURE SPHERIQUE EN GEBETON

```

Sip,Spx,b,int,d,hrt,ro,eg, np,rpa,rpb,hp,b01,hml,
b02,x0,y0,d11,d12,d13,d14,d31,d32,d21,d22,d23,d24:real;
choixf,choix,ed, p,comp,select,select2,i,w,c,j,m,u:integer;
ee11,ee12,ee21,ee22,ee31,ee32,ee41,ee42,ee43,
ee51,ee52,ee53,ee61,ee62,distx,distz,distyZ,
distYx,mf1,mf2,mg1,mg2,mgh1,mgh2,mxh1,mzh2,
mf11,mf22,mg11,mg22,mgh11,mgh22,mxh11,mzh22,
memoint,memoint1,memoint2,memoint3:array[0..100] of real;
memointf1,memointg1,memointh1,memointf2,memointg2,
memointh2,fx:array[0..100] of real;
e11,e12,e21,e22,e31,e32,e41,e42,e43,e51,e52,
e53,e61,e62,e7,e8,e1,e2,e3,e4,e5,e6,a1,a2,a3,
b1,b2,b3,c1,c2,c3,d1,d2,d3,e,aa1,aa2,iz1,iz2,
iz3,ix1,ix2,ix3,iy1,iy2,iy3,bornehp,borne,
borne1,borne2,ryst,rysc,ryt,ryo,rstep          real;

function O1 :real;
begin
    O1:=Arotan((2*hp/largeur)*(sin(x-1.5708)/cos(x-1.5708)));
end;

function O2 :real;
begin
    O2:=Arotan((2*hp/longueur)*(sin(1.5708-x)/cos(1.5708-x)));
end;

function cosphi1 :real;
begin
    cosphi1:=(rpa/rs)*(sin(x-1.5708));
end;

```

```
function cosphi2 (real);
begin
    cosphi2:=(rpb/rs)*sin(1.5708-x);
end;

function sinphi1 (real);
begin
    sinphi1:=sqrt(1-sqr(cosphi1));
end;

function sinphi2 (real);
begin
    sinphi2:=sqrt(1-sqr(cosphi2));
end;

function N1 (real);
begin
    N1:=(rpa*rs*pv*ep)/(1+cosphi1)
end;

function M1 (real);
begin
    M1:=rpa*rs*pv*ep*(-cosphi1 + 1/(1+cosphi1))
end;

function N2 (real);
begin
    N2:=(rpb*rs*pv*ep)/(1+cosphi2)
end;
```

```
.....  
  
function M2 (real;  
begin  
    M2:= npb*rs*pv*ep*(-cosphi2 + 1/(1+cosphi2))  
end;  
  
function F1 (real;  
begin  
    F1:=N1*sinphi1;  
end;  
  
function G1 (real;  
begin  
    G1:=((N1*cosphi1*sin(O1)+M1*cos(O1)));  
end;  
  
function H1 (real;  
begin  
    H1:=N1*cosphi1*cos(O1)-M1*sin(O1);  
end;  
  
function F2 (real;  
begin  
    F2:=-N2*sinphi2;  
end;  
  
function g2 (real;  
begin  
    g2:=((-N2*cosphi2*sin(O2)-M2*cos(O2)));  
end;  
.....
```



```
function h2 :real;
begin
    h2:=(N2*cosphi2*cos(O2)-M2*sin(O2));
end;
```

```
function zz1 :real;
begin
    zz1:=rpa*(cos(x-1.5708)-cos(x0));
end;
```

```
function yy1 :real;
begin
    yy1:=rpa*(sin(x0)-sin(x-1.5708));
end;
```

```
function zpz :real;
begin
    zpz:=rpb*(cos(1.5708-x)-cos(y0));
end;
```

```
function xx2 :real;
begin
    xx2:=rpb*(sin(y0)-sin(1.5708-x));
end;
```

Procédure Menu :

DESCRIPTION: Affiche le Menu du Programme TOITURE.PAS en vue de
l'acquisition des données relatives:
- au matériau de la toiture
- au matériau des poutres et poteaux
- au propriétés de section des poutres et poteaux.

CONSTANTES ET TYPES REQUIS:

Les constantes et types requis sont déclarés dans ce
fichier.

REMARQUE : Cette procédure crée un fichier Resultat en vue de
stocker les résultats de l'analyse.

```
..
  Var
    car:char;
  Begin
    Repeat
      clrscr;
      gotoxy(15,4);write('MENU PRINCIPAL');
      gotoxy(10,6);write('1: Fichier Résultat');
      gotoxy(10,7);write('2: Propriétés du matériau du D#me');
      gotoxy(10,8);write('3: Propriétés du matériau des poutres et poteaux');
      gotoxy(10,9);write('4: Géométrie du Btiment');
    ..
  ..
```

TOITURE SPHERIQUE EN GEOBETON

```
gotoxy(10,10);write('5: Propriétés de Section Poutre sur Longueur');
gotoxy(10,11);write('6: Propriétés de Section Poutre sur Largeur');
gotoxy(10,12);write('7: Propriétés de section des poteaux');
gotoxy(10,13);write('0: EXECUTION');
```

```
gotoxy(22,wherey+2);write('Votre choix ');
```

```
car:=Upcase(Readkey);
```

```
if car in ['0'..'7'] then
```

```
  case car of
```

```
    '1': begin
```

```
      (** FICHIER RESULTAT**)
      finish :=false;
```

```
      Repeat clrscr;
```

```
      gotoxy(28,12);
```

```
      writeln('Unité de sortie');
```

```
      gotoxy(28,14);writeln('1 : Fichier');
```

```
      gotoxy(28,15);writeln('2 : Imprimante');
```

```
      gotoxy(27,17);write('?');readln(choix);
```

```
      if choix in [1..2] then
```

```
        case choix of
```

```
          1: begin clrscr;
```

```
              gotoxy(28,12);
```

```
.....
gotoxy(28,10);writeln('FICHIER des DONNEES');
gotoxy(28,14);writeln('1 :NOUVEAU fichier');
gotoxy(28,15);
writeln('2 :ANCIEN fichier');
gotoxy(28,16);write(' ?');readln(choixf);
if choixf in [1..2] then
  case choixf of
    1: begin clrscr;

        gotoxy(28,12);
writeln('Quel est le nom de votre fichier des données ?');
gotoxy(24,14);

        gotoxy(28,17);write('nom fichier données ?');
readln(nom);
assign(ancien,nom);

        clrscr;gotoxy(28,12);writeln('FICHIER des RESULTATS');
        gotoxy(28,14);write('nom ?');readln(nom1);
assign(resultat,nom1);end;
    2: begin clrscr;

        gotoxy(28,12);
writeln('Donnez le NOM du FICHIER des DONNEES');
        gotoxy(28,14);write('nom ?');readln(nom);clrscr;
gotoxy(28,15);write('Donnez le NOM du FICHIER des RESULTATS ?');
gotoxy(28,17);write('nom ?');readln(nom1);
assign(ancien,nom);
assign(resultat,nom1);
reset(ancien);
.....
```

```
.....  
  
read(ancien,ep,pv,rt,rc,ega, longueur, largeur, hml,aa1,iy1,iz1);  
read(ancien,aa2,iy2,iz2,ix3,iy3,iz3);  
  
                can:='0';end;  
  
                end; end;  
  
                2: begin  
                    assign(resultat,'prn');end;  
                end;  
                gotoxy(2,24);  
                write(' Avez-vous des modifications faire ? (o/n) !):'  
                reponse:=readkey;  
                    if reponse = 'o' then finish:=false  
                    else finish:=true;  
                until finish=true;  
  
                rewrite(resultat);  
  
                end;  
  
                '2':begin  
  
                    (** PROPRIETES DU MATERIAU DU DOME**)  
                    finish:=false;  
                    Repeat  
                        clrscr;  
                        writeln('PROPRIETES DU MATERIAU DU DOME');  
                        write('                Epaisseur (m) !):'  
                        readln(ep);  
                        write('                Masse volumique (kN/m3) !):'  
  
.....  
                TOITURE SPHERIQUE EN GEOBETON
```

```
.....
readln(pv);
write(' Résistance la traction (kN/m2) :');
readln(Rt);
write(' Résistance la compression (kN/m2) :');
readln(Rc);
write('      Module d'Elasticite (kN/m2) :');
readln(eg);
gotoxy(2,24);
write(' Avez-vous des modifications faire ? (o/n) :');
Reponse:=Readkey;
if reponse='o'then finish:=false
else finish:=true;
until finish=true;

end;

'3':begin
(** PROPRIETE DU MATERIAU DES POUTRES ET POTEAUX**)
writeln('PROPRIETE DU MATERIAU DES POUTRES ET POTEAUX');
finish:=false;
Repeat clnscr:
writeln('PROPRIETE DU MATERIAU DES POUTRES ET POTEAUX');
writeln;
write(' Module d'Elasticité (kN/m2) : ');
readln(e);
gotoxy(2,24);
writeln(' Avez-vous des modifications faire ? (o/n)');
Reponse:=Readkey;
if reponse='o'then finish:=false
else finish:=true;
.....
TOITURE SPHERIQUE EN GEOMETON
```

```
.....

                                until finish=true;

                                end;

'4'begin

                                (** GEOMETRIE DU BATIMENT **)
                                writeln('GEOMETRIE DU BATIMENT');
                                finish:=false;
                                Repeat      clrscr;
                                    writeln('GEOMETRIE DU BATIMENT');
                                write(' Longueur du btiment (m)          : ');
                                    readln(longueur);
                                write(' Largeur du btiment (m)          : ');
                                    readln(largeur);
                                write(' Hauteur du mur sur la largeur (m)      : ');
                                    readln(hml);
                                    gotoxy(2,24);
                                Write(' Avez-vous des modifications faire ? (o/n) ?);
                                    Reponse:=Readkey;
                                    if reponse='o'then finish:=false
                                    else finish:=true;
                                until finish=true;

                                end;

'5'begin

                                (**PROPRIETES DE SECTION DE LA POUTRE SUR LA LONGUEUR**)
                                writeln('PROPRIETES DE SECTION DE LA POUTRE SUR LA LONGUEUR');
.....
```

TOITURE SPHERIQUE EN GEBETON

```
.....  
.....  
        finish:=false;  
        Repeat      clnson;  
writeLn('PROPRIETES DE SECTION DE LA POUTRE SUR LA LONGUEUR');  
        write('          section (m2) : ');  
                readln(aa1);  
        write(' Moment d'inertie par rapport l'axe Y local (m4) : ');  
                readln(Iy1);  
        write(' Moment d'inertie par rapport l'axe Z local (m4) : ');  
                readln(Iz1);  
        gotoxy(2,24);  
        Write(' Avez-vous des modifications faire ? (o/n) ?);  
        Reponse:=Readkey;  
                if reponse='o'then finish:=false  
                else finish:=true;  
        until finish=true;  
  
        end;  
  
        '6':begin  
        (**PROPRIETES DE SECTION DE LA POUTRE SUR LA LARGEUR**)  
writeLn('PROPRIETES DE SECTION DE LA POUTRE SUR LA LARGEUR');  
        finish:=false;  
        Repeat      clnson;  
writeLn('PROPRIETES DE SECTION DE LA POUTRE SUR LA LARGEUR');  
        write('          section (m2) : ');  
                readln(aa2);  
        write(' Moment d'inertie par rapport l'axe Y local (m4) : ');  
                readln(Iy2);  
        write(' Moment d'inertie par rapport l'axe Z local (m4) : ');  
                readln(Iz2);  
.....  
.....
```

TOITURE SPHERIQUE EN GEBETON


```
.....  
        gotoxy(2,24);  
        Write(' Avez-vous des modifications faire ? (o/n) ?');  
        Reponse:=Readkey;  
        if reponse='o'then finish:=false  
        else finish:=true;  
    until finish=true;  
end;  
  
?'?begin  
(**PROPRIETES DE SECTION DES POTEAUX**)  
writeln('PROPRIETES DE SECTION DES POTEAUX');  
    finish:=false;  
    Repeat    clrscr;  
        writeln('PROPRIETES DE SECTION DES POTEAUX');  
        write(' Moment d'inertie par rapport l'axe X local (m4) : ');  
            readln(Ix3);  
        write(' Moment d'inertie par rapport l'axe Y local (m4) : ');  
            readln(Iy3);  
        write(' Moment d'inertie par rapport l'axe Z local (m4) : ');  
            readln(Iz3);  
        gotoxy(2,24);  
        Write(' Avez-vous des modifications faire ? (o/n) ?');  
        Reponse:=Readkey;  
        if reponse='o'then finish:=false  
        else finish:=true;  
    until finish=true;  
end;  
  
end;  
until car = '0';  
end;C .....FIN DE LA PROCEDURE Menu. ... .. 3  
.....
```

TOITURE SPHERIQUE EN GEObETON

```
.....  
Procédure integrale_des_ef_membranaires;  
.....
```

DESCRIPTION: Calcule les composantes des efforts Membranaires en
10 points sur les poutres.

CONSTANTES ET TYPES REQUIS:

Les constantes et types requis sont déclarés dans ce
fichier.

REMARQUE : L'intégration des efforts est programmée suivant la
méthode de SIMPSON

```
.....
```

BEGIN

```
  olnson;
```

```
  gotoxy(28,12); writeln('UN INSTANT : CALCULS EN COURS');
```

```
  rs:=sqrt(sqrt(hml)+sqrt(longueur/2));
```

```
  rpa:= hml;
```

```
  rpb:= sqrt(sqrt(rs)-sqrt(longueur/2));
```

```
  hp:=sqrt(sqrt(hml)-sqrt(longueur/2));
```

```
  a:=1.5708;
```

```
.....
```

TOITURE SPHERIQUE EN GEOMETON

```
.....  
  
x0:=(a-ArcTan(2*Hp/longueur));  
y0:=(a-ArcTan(2*Hp/largeur));  
b01:=x0/10;  
b02:=y0/10;  
a:=1.5708;  
m:=0;  
w:=1;  
Ryst:=0.6*nt/pv;  
Ryso:=0.6*nc/pv;  
Ryt :=((hp+ryst)/2)*(1+sqrt(1+4*hp/(hp+ryst)));  
Ryo :=(nyso/2)*(1+sqrt(1+4*hp/nyso));  
  
Rst:=sqrt((0.3*eg*ep)/(3*pv));  
  
if ns)ryt then begin gotoxy(28,22);  
writeln('La toiture NE RESISTE PAS la TRACTION');end;  
  
if ns)ryo then begin gotoxy(28,23);  
writeln('La toiture NE RESISTE PAS la COMPRESSION');end;  
  
if ns)rst then begin gotoxy(28,24);  
writeln('La toiture NE RESISTE PAS au FLAMBAGE');end;  
  
gotoxy(28,12); writeln('UN INSTANT : CALCULS EN COURS');  
terminer:=false;  
  
select:=0;  
sd:=1;
```

```
REPEAT
```

```
  select:=0;
```

```
  terminer:=false;
```

```
  m:=0;
```

```
  a:=1.5708;
```

```
  if w<4 then b00:=b01
```

```
  else
```

```
  b00:=-b02 ;
```

```
    repeat
```

```
      select:=select+1;
```

```
      m:=m+1;
```

```
      b:=a+b00;
```

```
      h:=(b-a)/m;
```

```
      x:= a ; i:=1;
```

```
        repeat
```

```
          x:=a+(i-1)/m*h ;
```

```
          case w of
```

```
            1:f(x(i))=f1;
```

```
            2:f(x(i))=g1;
```

```
            3:f(x(i))=h1;
```

```
            4:f(x(i))=f2;
```

```
            5:f(x(i))=g2;
```

```
            6:f(x(i))=h2;
```

```
          end;
```

```
TOITURE SPHERIQUE EN GEQBETON
```

```

                                                    i:= i + 1 ;
                        until i=n+2;

                Sp:=0; i:=0;
                        repeat
                                i:=i+2;
                                Sp:=Sp + fx[i];
                        until i = n;

                Sip:=0; i:=1;
                        repeat
                                i:=i+1;
                                Sip:=Sip+fx[2*i-1];
                        until 2*i=n;

INT:=(h/3)*:4*Sp+2*Sip+fx[1]+fx[n+1]);

        if w=1 then memointf1[select]:=int;
        if w=2 then memointg1[select]:=int;
        if w=3 then memointh1[select]:=int;
        if w=4 then memointf2[select]:=int;
        if w=5 then memointg2[select]:=int;
        if w=6 then memointh2[select]:=int;

                                                    if m=10 then terminer:= true;
                                                    s:=b;
        until terminer = true;

```

```

.....

                                w=w+1;

until w=7;
if choix=1 then begin
rewrite(resultat);end;
write(resultat,ep:5:5,' /pv:5:5,' /rt:5:5,' /rc:5:5,' /eg:5:5,' ');
writeln(resultat,e:5:5);
write(resultat,longueur:5:5,' /largeur:5:5,' /hml:5:5,' ');
write(resultat,aa1:5:5,' /iy1:5:5,' /iz1:5:5,' ');
write(resultat,aa2:5:5,' /iy2:5:5,' /iz2:5:5,' ');
writeln(resultat,ix3:5:5,' /iy3:5:5,' /iz3:5:5);

writeln(resultat);
writeln(resultat,'          /LES PARAMETRES GEOMETRIQUES DE LA TOITUTRE SONT);
writeln(resultat);
write(resultat,'R.sphere =/rs:5:5,' m/' /R.poutre.1 =/rpa:5:5,' m /);
writeln(resultat,'R.poutre.2 =/rpb:5:5,' m/' /H poteaux =/hp:5:5,' m);
writeln(resultat);
writeln(resultat,'R.traction = /ryt:5:5,' m/' /R.compr = /ryc:5:5,' m /' /R.stable =
'/ryst:5:5,'m');
writeln(resultat);
writeln(resultat,'
          /x0:5:5,'          rad/'
          /y0:5:5,' rad');
gotoxy(28,12);writeln('CALCUL DES REACTIONS');

end;(.....FIN DE LA PROCEDURE Integrale_des_ef_membranaires; ... )
.....

```

```
.....
```

Procédure Calcul_des_coefficients_e_a_b:

```
.....
```

DESCRIPTION: Calcule les coefficients "a", "a", "b" issus
des équations d'équilibres dans le systé
coordonnées Globales

CONSTANTES ET TYPES REQUIS:

Les constantes et types requis sont déclarés dans ce
fichier.

REMARQUE : Cette Procédure utilise les propriétés de section des
éléments poutres et poteaux

```
.....
```

BEGIN

```
    select:=1;  
repeat  
  
    distX(select):= rpa*(sin(x0)-sin(x0/10)*select);  
    distYx(select):= rpa*cos(x0/10)*select;  
  
    distZ(select):= rpb*(sin(y0)-sin(y0/10)*select);  
    distYz(select):= rpb*cos(y0/10)*select;  
    select:=select+1;  
  
until select=11;
```

```
.....
```

TOITURE SPHERIQUE EN GEBETON

```

e7:=rpa; e9:=rpb;

select:=1; e11:=0;e42:=0;e12:=0;e43:=0;
e62:=0;e21:=0;e51:=0;e61:=0;e22:=0;
e53:=0;e31:=0;e41:=0;e32:=0;e52:=0;
ee11(0):=0;ee12(0):=0;ee21(0):=0;
ee22(0):=0;ee31(0):=0;ee32(0):=0;ee41(0):=0;
ee42(0):=0;ee43(0):=0;ee51(0):=0;ee52(0):=0;
ee53(0):=0;ee61(0):=0;ee62(0):=0;
select:=1;

repeat

e11:=e11+memointg1[select];
e42:=e42+distYx[select]*memointg1[select];
ee11[select]:=ee11[select-1]+memointg1[select];
ee42[select]:=ee42[select-1]+distYx[select]*memointg1[select];

e12:=e12+memointh2[select];
e43:=e43+distYz[select]*memointh2[select];
e62:=e62+distZ[select]*memointh2[select];
ee12[select]:=ee12[select-1]+memointh2[select];
ee43[select]:=ee43[select-1]+distYz[select]*memointh2[select];
ee62[select]:=ee62[select-1]+distZ[select]*memointh2[select];

e21:=e21+memointh1[select];
e51:=e51+distYx[select]*memointh1[select];
e61:=e61+distX[select]*memointh1[select];
ee21[select]:=ee21[select-1]+memointh1[select];

```



```

.....

ee51[select]:=ee51[select-1]+distYx[select]*memointh1[select];
ee61[select]:=ee61[select-1]+distX[select]*memointh1[select];

e22:=e22+memointg2[select];
e53:=e53+distYz[select]*memointg2[select];
ee22[select]:=ee22[select-1]+memointg2[select];
ee53[select]:=ee53[select-1]+distYz[select]*memointg2[select];

e31:=e31+memointf1[select];
e41:= e41+distX[select]*memointf1[select];
ee31[select]:=ee31[select-1]+memointf1[select];
ee41[select]:=ee41[select-1]+distX[select]*memointf1[select];

e32:=e32+memointf2[select];

e52:=e52+distZ[select]*memointf2[select];
ee32[select]:=ee32[select-1]+memointf2[select];
ee52[select]:=ee52[select-1]+distZ[select]*memointf2[select];

select:=select+1;

until select=11;

e1:=-e11+e12; e2:=e21-e22; e3:=e31+e32; e4:=-e41+e42-e43;
e5:=-e51-e52+e53; e6:=-e61+e62;

s1:=(1/(e*aa1))*rpa*(0.5*x0+0.25*sin(2*x0))
+(1/(e*iz1))*rpa*sqrt(rpa)*(0.5*x0-2*sin(x0)*cos(x0)+0.25*sin(2*x0)+x0*sqrt(cos(x0)))+
.....

TOITURE SPHERIQUE EN GEBETON

```

```

.....
(1/(e*iy3))*(1/3)*hp*sqr(hp+rpa*(1-cos(x0)))*sqr(hp)+hp*sqr(rpa*(1-cos(x0))),

a2:=(1/(e*aa2))*rpb*(0.5*y0+0.25*sin(2*y0))
+ (1/(e*iz2))*rpb*sqr(rpb)*(0.5*y0-
2*sin(y0)*cos(y0)+0.25*sin(2*y0)+y0*sqr(cos(y0)))+
(1/(e*iz3))*((1/3)*hp*sqr(hp)+rpb*(1-cos(y0))*sqr(hp)+hp*sqr(rpb*(1-cos(y0))));

a3:=(1/(e*iy1))*rpa*x0 + (1/(e*ix3))*hp;

b1:=sqr(rpa)*(1/(e*iz1))*(sin(x0)-x0*cos(x0)) + (1/(e*iy3))*0.5*sqr(hp)+hp*rpa*(1-
cos(x0));
b2:=sqr(rpb)*(1/(e*iz2))*(sin(y0)-y0*cos(y0)) + (1/(e*iz3))*0.5*sqr(hp)+hp*rpb*(1-
cos(y0));
b3:=(1/(e*ix3))*hp;

end(.....FIN DE LA PROCEDURE Calcul_des_coefficients_e_a_b;.....)

```

.....

TOITURE SPHERIQUE EN GEBETON

```
.....  
Procédure Calcul_des_moments_des_eff_membranaires_et_coef_o_d;  
.....
```

DESCRIPTION: *Calcule l'intégrale des moments des efforts
membranaires développés par la t_0 sur les poutres.

*Calcule les coefficients "o" et "d" issus de
l'application du Théorème CASTIGLIANO.

CONSTANTES ET TYPES REQUIS:

Les constantes et types requis sont déclarés dans ce
fichier.

REMARQUE : Cette Procédure utilise les propriétés de section des
éléments poutres et poteaux

```
.....  
BEGIN
```

```
m:=0;i:=0;
```

```
Repeat
```

```
  m:=m+1;
```

```
  x01:=m*x0/10;
```

```
  i:=0;
```

```
    Repeat
```

```
      i=i+1;
```

```
      x00:=i*x0/10;
```

```
.....  
TOITURE SPHERIQUE EN GEOBETON
```

```
.....  
  
      mf11(i):=memointf1(i)*rpa*(sin(x01)-sin(x00));  
      mg11(i):=memointg1(i)*rpa*(cos(x00)-cos(x01));  
      myh11(i):=memointh1(i)*rpa*(cos(x00)-cos(x01));  
      mxh11(i):=memointh1(i)*rpa*(sin(x01)-sin(x00));  
  
until i=m;  
  
i:=0; mf1(m):=0;mg1(m):=0;myh1(m):=0;mxh1(m):=0;  
  
  for i=1 to m do  
    mf1(m):=mf11(i)+mf1(m);  
  for i=1 to m do  
    mg1(m):=mg11(i)+mg1(m);  
  for i=1 to m do  
    myh1(m):=myh11(i)+myh1(m);  
  for i=1 to m do  
    mxh1(m):=mxh11(i)+mxh1(m);  
  
until m=10;  
  
m:=0;i:=0,  
Repeat  
  m:=m+1;  
  y01:=m*y0/10;  
  i:=0;  
  Repeat  
    i:=i+1;  
    y00:=i*y0/10;  
  
.....  
TOITURE SPHERIQUE EN GEBETON
```

```

mf22[i]:=memointf2[i]*rpb*(sin(y01)-sin(y00));
mg22[i]:=memointg2[i]*rpb*(cos(y00)-cos(y01));
myh22[i]:=memointh2[i]*rpb*(cos(y00)-cos(y01));
mzh22[i]:=memointh2[i]*rpb*(sin(y01)-sin(y00));

until i=m;

i:=0; mf2[m]:=0;mg2[m]:=0;myh2[m]:=0;mzh2[m]:=0;

for i=1 to m do
  mf2[m]:=mf22[i]+mf2[m];
for i=1 to m do
  mg2[m]:=mg22[i]+mg2[m];
for i=1 to m do
  myh2[m]:=myh22[i]+myh2[m];
for i=1 to m do
  mzh2[m]:=mzh22[i]+mzh2[m];

until m=10;

c1:=(1/(e*y3))*((-e11+e12)*(1/3)*hp*sqrt(hp)+0.5*sqrt(hp)*rpa*(1-cos(x0))+
(mf1[10]-mg1[10]+myh1[10])*(0.5*sqrt(hp)+hp*rpa*(1-cos(x0))));

c2:=(1/(e*z3))*((-e22+e21)*(1/3)*hp*sqrt(hp)+0.5*sqrt(hp)*rpb*(1-cos(y0))+
(mf2[10]-mg2[10]+myh1[10])*(0.5*sqrt(hp)+hp*rpb*(1-cos(y0))));

c3:=(1/(e*x3))*hp*(mzh2[10]-mxh1[10]);

```

```
d11:=0;d12:=0;d13:=0;d14:=0;d31:=0;d21:=0;d22:=0;d23:=0;d24:=0;
```

```
w:=0;
```

```
a:=1.5708;
```

```
REPEAT
```

```
  if w<6 then b00:=x0
```

```
  else
```

```
  b00:=-y0 ;
```

```
      b:=a+b00;
```

```
      h:=(b-a)/n;
```

```
      x:= a ; i:=1;
```

```
          repeat
```

```
            x:=a+(i-1)*h ;
```

```
            case n of
```

```
              1:fx[i]:=f1*np*a*0.5*sqrt(sin(x-1.5708));
```

```
              2:fx[i]:=g1*np*a*(0.5*(x-1.5708)+0.25*sin(2*(x-1.5708)));
```

```
              3:fx[i]:=f1*yy1*sqrt(np*a)*(sin(x-1.5708)-(x-1.5708)*cos(x0));
```

```
              4:fx[i]:=g1*zz1*sqrt(np*a)*(sin(x-1.5708)-(x-1.5708)*cos(x0));
```

```
              5:fx[i]:=h1*yy1*sqrt(np*a)*(x-1.5708);
```

```
              6:fx[i]:=f2*np*b*0.5*sqrt(sin(1.5708-x));
```

```
              7:fx[i]:=g2*np*b*(0.5*(1.5708-x)+0.25*sin(2*(1.5708-x)));
```

```
              8:fx[i]:=f2*xx2*sqrt(np*b)*(sin(1.5708-x)-(1.5708-x)*cos(y0));
```

```
              9:fx[i]:=g2*zzp2*sqrt(np*b)*(sin(1.5708-x)-(1.5708-x)*cos(y0));
```

```
TOITURE SPHERIQUE EN GEOMETON
```

```
.....  
  
                                end;  
  
                                r:= i + 1;  
                                until i=r+2;  
  
                                Sp:=0; i:=0;  
                                repeat  
                                    i:=i+2;  
                                    Sp:=Sp + f(x[i]);  
                                until i = n;  
  
                                Sip:=0; i:=1;  
                                repeat  
                                    i:=i+1;  
                                    Sip:=Sip+f(x[2*i-1]);  
                                until 2*i=n;  
  
                                INT:=(h/3)*(4*Sp+2*Sip+f(x[1])+f(x[n+1]));  
  
                                memoint3[w]:=int;  
  
                                w:=w+1;  
  
until w=10;  
  
d11:= npa*0.5*sqr(sin(x0))*e31-memoint3[1];  
  
d12:=npa*(0.5*x0+0.25*sin(2*x0))*e11-memoint3[2];  
  
d13:=sqr(npa)*(sin(x0)-x0*cos(x0))*e41-memoint3[3];  
  
.....
```

```

.....

d14:=sqr(npax)*(sin(x0)-x0*cos(x0))*e42-hp*e11-memoint3[4];

d21:= rpb*0.5*sqr(sin(y0))*e32-memoint3[6];

d22:=rpb*(0.5*y0+0.25*sin(2*y0))*e22-memoint3[7];

d23:=sqr(rpb)*(sin(y0)-y0*cos(y0))*e52-memoint3[8];

d24:=sqr(rpb)*(sin(y0)-y0*cos(y0))*e53-hp*e22-memoint3[9];

d31:=npax*x0*e61-memoint3[5];

d1:=(1/(e*aa1))*(-d11)
      -(1/(e*aa1))*d12)
      +(1/(e*iz1))*d13)
      -(1/(e*iz1))*d14);

d2:=(1/(e*aa2))*(-d21)
      -(1/(e*aa2))*d22)
      +(1/(e*iz2))*d23)
      -(1/(e*iz2))*d24);

d3:=-1/(e*ig1))*d31);

end:(.....FIN DE LA PROCEDURE Calcul_des_
      moments_des_ef_membranaires_et_coef_e_di.....)

```



```
.....
```

```
ProcEDURE Reactions_et_Efforts;
```

```
.....
```

```
DESCRIPTION:*Calcule les REACTIONS aux appuis de la structure.
             *Calcule les EFFORTS aux lDi de portées des poutres
             et poteaux.
```

```
CONSTANTES ET TYPES REQUIS:
```

```
Les constantes et types requis sont déclarés dans ce
fichier.
```

```
.....
```

```
Var
```

```
nn1,nn2,r,x,ry,mz1,mx2,rz,my1,my2,
nam,vam,qazm,mazm,maym,nbm,vbm,qbzm,
mbzm,mbym,nnm,vm,qm,mzm,mym      :real;
na,qaz,va,maz,max,may,
nb,qbz,vb,mbz,mbx,mby,
nn,q,vm,z,mx,my                    :array(0..15)of real;
```

```
BEGIN
```

```
nn1:=(d1+c1+b1*e4)/(-a1+b1*e7);
nn2:=(d2+c2+b2*e5)/(-a2+b2*e9);
rx:=nn1*r;
mz1:=(e4*a1+e7*(d1+c1))/(-a1+b1*e7);
mx2:=(e5*a2+e9*(d2+c2))/(-a2+b2*e9);
```

```
.....
```

TOITURE SPHERIQUE EN GEBETON

```

.....

nz:=nnz+e2;
my1:=(e6*b3-(d3+c3))/(a3-b3);
my2:=(e6*a3-(d3+c3))/(a3-b3);
ny:=e3;
writeln(resultat);writeln(resultat);
writeln(resultat,'          REACTIONS');
writeln(resultat);
writeln(resultat,'N1 = 'nn1:5:5,' /Mz1 = 'Mz1:5:5,' /My1 = 'my1:5:5);
writeln(resultat);
writeln(resultat,'N2 = 'nn2:5:5,' /Mx2 = 'Mx2:5:5,' /My2 = 'my2:5:5);
writeln(resultat);
writeln(resultat,'Ry = 'ry:5:5,' /Rx = 'rx:5:5,' /Rz = 'rz:5:5);
writeln(resultat);

      x0:=(a-ArcTan(2*Hp/longueur));
      y0:=(a-ArcTan(2*Hp/largeur));

gotoxy(28,12);
writeln('calcul des efforts aux 10i de portées);

writeln(resultat);
writeln(resultat);writeln(resultat);
writeln(resultat,' /Calcul des efforts aux 10i de portée de la poutre 1);
writeln(resultat);writeln(resultat);
writeln(resultat,' N'      'V'      'Q'      'Mz'      'My');
writeln(resultat);
mf1[0]:=0;mg1[0]:=0;mxh1[0]:=0;mzh2[m]:=0;myh1[m]:=0;myh2[m]:=0;
m:=1;
  Repeat
    na[0]:=0;qaz[0]:=0;va[0]:=0;maz[0]:=0;max[0]:=0;may[0]:=0;
.....

          TOITURE SPHERIQUE EN GEBETON

```

```

writeLn(resultat,'          ',m);
writeLn(resultat);
Na[m]:=nN1*cos((m-1)*x0/10)-cos((m-1)*x0/10)*ee11[m-1]
      -sin((m-1)*x0/10)*ee31[m-1];

Qaz[m]:=-ee21[m-1];

Va[m]:=nN1*sin((m-1)*x0/10)-sin((m-1)*x0/10)*ee11[m]+
      cos((m-1)*x0/10)*ee31[m];
Maz[m]:=Mz1-rpa*(1-cos(m)*x0/10)*nN1-mf1[m]+mg1[m];

Hay[m]:=My1+mzh1[m-1]*cos((m-1)*x0/10)+mgh1[m-1]*sin((m-1)*x0/10);

write(resultat, Na[m]:5:5,' ', Va[m]:5:5,' ',Qaz[m]:5:5,' ');
writeLn(resultat, Maz[m]:5:5,' ', Hay[m]:5:5);
writeLn(resultat);

      m:=m+1;

until m=i1;

nb[0]:=0;qbz[0]:=0;vb[0]:=0;mbz[0]:=0;mbx[0]:=0;mby[0]:=0;
m:=1;mzhZ[0]:=0;mghZ[0]:=0;
writeLn(resultat);writeLn(resultat);
writeLn(resultat,'          /Calcul des efforts aux 10i de portee de la poutre Z');
writeLn(resultat);writeLn(resultat);
writeLn(resultat,'          N/          V/          Q/          Hz/          Hy/');
writeLn(resultat);

```

```

Repeat
    writeln(resultat,'          'm);

    Nb[m]:=nN2*cos((m-1)*y0/10)-cos((m-1)*y0/10)*ee22[m-1]
        -sin((m-1)*y0/10)*ee32[m-1];

    Qbz[m]:=-ee12[m-1];

    Vb[m]:=nN2*sin((m-1)*y0/10)-sin((m-1)*y0/10)*ee22[m]
        +cos((m-1)*y0/10)*ee32[m];

    Mbz[m]:=Mx2-npb*(1-cos(m)*y0/10)*nN2-mf2[m]+mg2[m];

    Mby[m]:=My2+mzh2[m-1]*cos((m-1)*y0/10)+myh2[m-1]*sin((m-1)*y0/10);
    writeln(resultat);
    write(resultat,Nb[m]:5:5,' ',Vb[m]:5:5,' ',Qbz[m]:5:5,' ');
    write(resultat, Mbz[m]:5:5,' ',Mby[m]:5:5);
    writeln(resultat);
    m:=m+1;

until m=11;

nn[0]=0;q[0]=0;v[0]=0;mz[0]=0;mx[0]=0;my[0]=0;
m:=1;
writeln(resultat);writeln(resultat);
writeln(resultat,'          'Calcul des efforts aux 10i de portées du poteau');
writeln(resultat);writeln(resultat);
write(resultat,'          N/          V/          Q/);
writeln(resultat,'          Mz/          My/);
writeln(resultat);

```

```

Repeat
    bornehp:=(hp/10)*m;

    writeIn(resultat,'          ',m);

    Q[m]:=nN2-e22+e21;
    V[m]:=nN1-e11+e12;
    NN[m]:=e31+e32;
    My[m]:=(bornehp+rpa*(1-cos(x0))*nN1-Mz1-bornehp*(e11-e12)+
            e41-e42+hp*e11+e43-hp*e12;
    Mz[m]:=(bornehp+rpb*(1-cos(y0))*nN2-Mx2-bornehp*(e22-e21)+
            e52-e53+hp*e22+e51-hp*e21;

writeIn(resultat,' N[m]:5:5',V[m]:5:5',Q[m]:5:5',Mz[m]:5:5',My[m]:5:5);
writeIn(resultat:

m:=m+1;
until m=11;
writeIn(resultat:
WriteIn(resultat,'          EFFORTS MAXIMAUX');
writeIn(resultat:
i:=0;na[0]:=nn1;va[0]:=0;qaz[0]:=0;maz[0]:=mz1;may[0]:=my1;
    nb[0]:=nn2;vb[0]:=0;qbz[0]:=0;mbz[0]:=mx2;mby[0]:=my2;
    nn[0]:=ny;v[0]:=nx;q[0]:=nz;mz[0]:=0;my[0]:=0;
    nam:=0;vam:=0;qazm:=0;mazm:=0;maym:=0;
    nbm:=0;vbm:=0;qbzm:=0;mbzm:=0;mbym:=0;
    nnm:=0;vnm:=0;qnm:=0;mznm:=0;mynm:=0;
repeat
    if abs(nam)<abs(na[i]) then nam:=na[i];
    if abs(vam)<abs(va[i]) then vam:=va[i];

```

```

if abs(qazm)/abs(qaz[i]) then qazm:=qaz[i];
if abs(mazm)/abs(maz[i]) then mazm:=maz[i];
if abs(maym)/abs(may[i]) then maym:=may[i];

if abs(nbm)/abs(nb[i]) then nbm:=nb[i];
if abs(vbm)/abs(vb[i]) then vbm:=vb[i];
if abs(qbzm)/abs(qbz[i]) then qbzm:=qbz[i];
if abs(mbzm)/abs(mbz[i]) then mbzm:=mbz[i];
if abs(mbym)/abs(mby[i]) then mbym:=mby[i];

if abs(nnm)/abs(nn[i]) then nnm:=nn[i];
if abs(vn)/abs(vn[i]) then vn:=vn[i];
if abs(qn)/abs(qn[i]) then qn:=qn[i];
if abs(mzm)/abs(mz[i]) then mzm:=mz[i];
if abs(my)/abs(my[i]) then my:=my[i];

i:=i+1;
until i=i1;writeln(resultat);
writeln(resultat,'Na,max = 'nam:5:5,' /Nb,max = 'nbm:5:5,' /Nl,max = 'nnm:5:5);
writeln(resultat);
writeln(resultat,'va,max = 'vam:5:5,' /vb,max = 'vbm:5:5,' /v,max = 'vm:5:5);
writeln(resultat);
writeln(resultat,'qa,max = 'qazm:5:5,' /qb,max = 'qbzm:5:5,' /q,max = 'qm:5:5);
writeln(resultat);
writeln(resultat,'maz,max = 'mazm:5:5,' /mbz,max = 'mbzm:5:5,' /mz,max = 'mzm:5:5);
writeln(resultat);
writeln(resultat,'may,max = 'maym:5:5,' /mby,max = 'mbym:5:5,' /my,max = 'mym:5:5);
close(resultat);
end;.....FIN DE LA PROCEDURE Reactions_et_Efforts;..... )

```

```
(.....PROGRAMME PRINCIPAL.....)
```

```
BEGIN
```

```
  Menu;
```

```
  Integrale_des_ef_membranaires;
```

```
  Calcul_des_coefficients_e_a_b;
```

```
  Calcul_des_moments_des_ef_membranaires_et_coef_o_d;
```

```
  Reactions_et_Efforts;
```

```
end.
```

```
(.....FIN DU PROGRAMME PRINCIPAL.....)
```

```
.....  
PROGRAM CHARGES:  
(.....)
```

```
FICHER   : CHARGES.PAS  
AUTEUR   : SOUDE Coffi Clément  
DATE     : 28 Juin 1993
```

```
DESCRIPTION Ce programme calcule les intégrales des efforts  
membranaires suivants les axes X, Y, et Z pour  
le chargement des poutres "1" et "2".
```

```
CONSTANTES ET TYPES REQUIS:
```

```
Les constantes et types requis sont déclarés dans ce  
fichier.
```

```
REMARQUE:
```

```
L'intégration est programmée suivant la méthode de  
SIMPSON.
```

```
(.....)
```

```
Uses crt, printer:
```

```
const  
    n=40;  
  
var  
    nom:string(15);  
    fichier,resultat:text;  
    terminer:boolean;
```

```
.....  
TOITURE SPHERIQUE EN GEBETON
```



```
.....  
.....  
function sinphi2 :real;  
begin  
    sinphi2:=sqrt(1-sqr(cosphi2));  
end;  
  
function N1 :real;  
begin  
    N1:=(npa*rs*pv*ep)/(1+cosphi1)  
end;  
function M1 :real;  
begin  
    M1:=npa*rs*pv*ep*(-cosphi1 + 1/(1+cosphi1))  
end;  
  
function N2 :real;  
begin  
    N2:=(npb*rs*pv*ep)/(1+cosphi2)  
end;  
function M2 :real;  
begin  
    M2:= npb*rs*pv*ep*(-cosphi2 + 1/(1+cosphi2))  
end;  
  
function F1 :real;  
begin  
    F1:=N1*sinphi1;  
end;  
function G1 :real;  
begin  
    G1:=N1*cosphi1*sin(O1)+M1*cos(O1);  
.....  
.....
```

TOITURE SPHERIQUE EN GEObETON


```
.....

write('Le module de YOUNG du matériau de la toiture (kN/m2) = ');
read(eg);
write('La RESISTANCE la TRACTION du matériau de la toiture (kN/m2) = ');
read(rt);
write('La RESISTANCE la COMPRESSION du matériau de la toiture (kN/m2) = ');
read(rc);
write('Quelle est l'épaisseur du matériau de la toiture (m) ? = ');
read(ep);
write('Le nombre de noeuds charger sur les poutres = ');
read(n);
clrscr;gotoxy(28,12);writeln('Unité de sortie:');
gotoxy(28,14);writeln('1 : Fichier');
gotoxy(28,15);writeln('2 : Imprimante');
gotoxy(27,16);write('?');readln(choix);
case choix of
1: begin
clrscr;gotoxy(28,12);
writeln('Quel est le nom de votre fichier résultat ?');
writeln;
gotoxy(24,13);
writeln('NB: (S"assurer que le fichier est NOUVEAU ou 'VIDE)');
gotoxy(28,17);write('nom du fichier ?');
read(nom);
assign(resultat,nom);
rewrite(resultat);end;

2: begin
assign(resultat,'prn');rewrite(resultat);end;
end;

.....
```

TOITURE SPHERIQUE EN GEBETON

```

.....

      gotoxy(28,12); writeln('UN INSTANT : CALCULS EN COURS');
clrscr;

      rs:=sqrt(sqrt(hml)+sqrt(longueur/2));
      rpa = hml;
      rpb:= sqrt(sqrt(rs)-sqrt(longueur/2));
      hp:= sqrt(sqrt(hml)-sqrt(longueur/2));
      a:=1.5708;
      x0:=(a-ArcTan(2*Hp/longueur));
      y0:=(a-ArcTan(2*Hp/longueur));
      b01:=x0/rd;
      b02:=y0/rd;

      Ryst:=0.6*rt/pv;
      Rysc:=0.6*rc/pv;
      Ryt :=(hp+ryst)/2*(1+sqrt(1+4*hp/(hp+ryst)));
      Ryc :=(rpsc/2)*(1+sqrt(1+4*hp/rpsc));
      Rst:=sqrt((0.3*eg*ep)/(3*pv));
      if rs>ryt then writeln('La toiture NE RESISTE PAS la TRACTION')
      else
      if rs>ryc then writeln('La toiture NE RESISTE PAS la COMPRESSION')
      else
      if rs>rst then writeln('La toiture NE RESISTE PAS au FLAMBAGE');
      a:=1.5708;
      m:=0;
      w:=1;
      clrscr;
      gotoxy(28,12); writeln('UN INSTANT : CALCULS EN COURS');
      if rs>ryt then begin gotoxy(28,22);writeln('La toiture NE RESISTE PAS la
TRACTION');end;
.....

      TOITURE SPHERIQUE EN GEBETON

```

```

.....

      if ns)nyo then begin gotoxy(28,23);writeln('La toiture NE RESISTE PAS la
COMPRESSIION');end;

```

```

      if ns)nst then begin gotoxy(28,24);writeln('La toiture NE RESISTE PAS au
FLAMBAGE');end;

```

```

      terminer:=false;

```

```

REPEAT

```

```

      terminer:=false;

```

```

        m:=0;

```

```

        a:=1.5708;

```

```

        if w<4 then b00:=b01;

```

```

        else

```

```

          b00:=-b02;

```

```

      if w=1 then writeln(resultat,'CHARGES SUR LA POUTRE 1 SUIVANT Y : f1');

```

```

      if w=2 then writeln(resultat,'CHARGES SUR LA POUTRE 1 SUIVANT X : g1');

```

```

      if w=3 then writeln(resultat,'CHARGES SUR LA POUTRE 1 SUIVANT Z : h1');

```

```

      if w=4 then writeln(resultat,'CHARGES SUR LA POUTRE 2 SUIVANT Y : f2');

```

```

      if w=5 then writeln(resultat,'CHARGES SUR LA POUTRE 2 SUIVANT Z : g2');

```

```

      if w=6 then writeln(resultat,'CHARGES SUR LA POUTRE 2 SUIVANT X : h2');

```

```

        writeln(resultat);

```

```

      if w<4 then writeln(resultat,'de d) =          d)= la charge est de?')

```

```

      else      writeln(resultat,'de d) =          d)= la charge est de?');

```

```

        writeln(resultat);

```

```

          repeat

```

```

            m:=m+1;

```

```

            b:=a+b00;

```

```

.....

      TOITURE SPHERIQUE EN GEObETON

```

```

.....

      h:=(b-a)/n;
      x:= a : i:=1;
      repeat
          x:= a+(i-1)*h ;
          case w of
              1:fx[i]:=f1;
              2:fx[i]:=g1;
              3:fx[i]:=h1;
              4:fx[i]:=f2;
              5:fx[i]:=g2;
              6:fx[i]:=h2;
          end;

          i:= i + 1 ;
      until i=n+2;

      Sp:=0; i:=0;
      repeat
          i:=i+2;
          Sp:=Sp + fx[i];
      until i = n;
      Sip:=0; i:=1;
      repeat
          i:=i+1;
          Sip:=Sip+fx[2*i-1];
      until 2*i=n;

INT:=(h/3)*(4*Sp+2*Sip+fx[1]+fx[n+1]);

writeln(resultat,a:5:5/      ' '      'b:5:5/      'int:5:5);
.....

```

TOITURE SPHERIQUE EN GEBETON

```

                                if m=nd then terminer:= true;
                                a:=b;
until terminer = true:
                                writeln(resultat);
                                writeln(resultat);
                                n:=w+1;
                                writeln(resultat);
until w=7:

writeln(resultat,'rs =',rs:5:5,'      ',rpa =',rpa:5:5,'      ',rpb =',rpb:5:5,'      ',Hp =',hp:5:5);
writeln(resultat);
writeln(resultat,'x0:5:5,'rad',      ' ',y0:5:5,'rad');
writeln(resultat,'rxta =',rxt:5:5,'m',      ' ',ryc = ',ryc:5:5,'m',      ' ',rst =',rst:5:5,'m');
close(resultat);
close;
end.
```


ANNEXE B :

CHARGES SUR LA POUTRE 1 SUIVANT γ : p1

de α (rad) = à αi (rad) = la charge est de:
(kN)

1.57080	1.61641	0.85199
1.61641	1.66202	0.82025
1.66202	1.70762	0.78965
1.70762	1.75323	0.76015
1.75323	1.79884	0.73166
1.79884	1.84445	0.70415
1.84445	1.89006	0.67757
1.89006	1.93567	0.65187
1.93567	1.98127	0.62701
1.98127	2.02688	0.60296
2.02688	2.07249	0.57969
2.07249	2.11810	0.55718
2.11810	2.16371	0.53540
2.16371	2.20931	0.51433
2.20931	2.25492	0.49396
2.25492	2.30053	0.47428

CHARGES SUR LA POUTRE 1 SUIVANT X : g1

de α (rad) = à αi (rad) = la charge est de:
(kN)

1.57080	1.61641	0.83591
1.61641	1.66202	0.77361
1.66202	1.70762	0.71491
1.70762	1.75323	0.65981

1.75323	1.79884	0.60834
1.79884	1.84445	0.56050
1.84445	1.89006	0.51630
1.89006	1.93567	0.47575
1.93567	1.98127	0.43884
1.98127	2.02688	0.40555
2.02688	2.07249	0.37585
2.07249	2.11810	0.34969
2.11810	2.16371	0.32699
2.16371	2.20931	0.30768
2.20931	2.25492	0.29165
2.25492	2.30053	0.27880

CHARGES SUR LA POUTRE 1 SUIVANT Z : h1

de α (rad) = à $\alpha 1$ (rad) = la charge est de:

(kN)

1.57080	1.61641	-0.00497
1.61641	1.66202	-0.01223
1.66202	1.70762	-0.01567
1.70762	1.75323	-0.01556
1.75323	1.79884	-0.01217
1.79884	1.84445	-0.00581
1.84445	1.89006	0.00324
1.89006	1.93567	0.01467
1.93567	1.98127	0.02818
1.98127	2.02688	0.04346
2.02688	2.07249	0.06019
2.07249	2.11810	0.07808
2.11810	2.16371	0.09680

2.07249	2.11810	0.07808
2.11810	2.16371	0.09680
2.16371	2.20931	0.11607
2.20931	2.25492	0.13558
2.25492	2.30053	0.15505

CHARGES SUR LA POUTRE 2 SUIVANT $\gamma = f2$

de θ (rad) = a $\theta 1$ (rad) = la charge est de:

(kN /

1.57080	1.52519	0.85199
1.52519	1.47958	0.82025
1.47958	1.43398	0.78965
1.43398	1.38837	0.76015
1.38837	1.34276	0.73166
1.34276	1.29715	0.70415
1.29715	1.25154	0.67757
1.25154	1.20593	0.65187
1.20593	1.16033	0.62701
1.16033	1.11472	0.60296
1.11472	1.06911	0.57969
1.06911	1.02350	0.55718
1.02350	0.97789	0.53540
0.97789	0.93229	0.51433
0.93229	0.88668	0.49396
0.88668	0.84107	0.47428

TOITURE SPHERIQUE EN GEBETON

CHARGES SUR LA POUTRE Z SUIVANT Z : qz

de 0 (rad) = à 01 (rad)= la charge est de:

(kN)

1.57080	1.52519	0.83591
1.52519	1.47958	0.77361
1.47958	1.43398	0.71491
1.43398	1.38837	0.65961
1.38837	1.34276	0.60834
1.34276	1.29715	0.56050
1.29715	1.25154	0.51630
1.25154	1.20593	0.47575
1.20593	1.16033	0.43884
1.16033	1.11472	0.40555
1.11472	1.06911	0.37585
1.06911	1.02350	0.34969
1.02350	0.97789	0.32699
0.97789	0.93229	0.30768
0.93229	0.88668	0.29165
0.88668	0.84107	0.27880

CHARGES SUR LA POUTRE Z SUIVANT X : qx

de 0 (rad) = à 01 (rad)= la charge est de:

(kN)

1.57080	1.52519	-0.00497
1.52519	1.47958	-0.01223
1.47958	1.43398	-0.01567

1.43398	1.38837	-0.01556
1.38837	1.34276	-0.01217
1.34276	1.29715	-0.00581
1.29715	1.25154	0.00324
1.25154	1.20593	0.01467
1.20593	1.16033	0.02818
1.16033	1.11472	0.04346
1.11472	1.06911	0.06019
1.06911	1.02350	0.07808
1.02350	0.97789	0.09680
0.97789	0.93229	0.11607
0.93229	0.88668	0.13558
0.88668	0.84107	0.15505

$r_s = 3.60555$ m $r_{pa} = 3.00000$ m $r_{pb} = 3.00000$ m $H_p = 2.23607$ m

$\alpha_0 = 0.72973$ rad $\beta_0 = 0.72973$ rad

$r_{yt} = 7.64809$ m $r_{yc} = 43.03471$ m $r_{st} = 9.53463$ m

0.08000 22.00000 135.00000 1500.00000 250000.00000 20000000.00000
 4.00000 4.00000 3.00000 0.18000 0.00135 0.00540 0.18000 0.00135 0.00540 0.02160
 0.01080 0.01080

LES PARAMETRES GEOMETRIQUES DE LA TOITURE SONT

R.sphere =3.60555 m,R.poutre.1=3.00000 m,R.poutre.2=3.00000 m,H.poteaux =2.23607 m
 R.traction = 7.64809 m R.compr = 43.03471 m R.stable = 3.68182m
 $\alpha = 0.72973$ rad $\beta = 0.72973$ rad

REACTIONS (kN)

N1 = 6.33982 Hz1 = 8.47598 My1 = -0.37773

N2 = 6.33982 Mx2 = 8.47598 My2 = -0.37773

Ry = 20.74420 Rx = -0.91544 Rz = -0.91544

Calcul des efforts aux 10ième de portée de la poutre 1

N	V	Q	Mz	My	(kN)
					1
6.33982	1.34787	0.00000	8.42536	-0.37773	
					2
4.92084	2.89211	0.01169	8.01179	-0.37773	
					3
3.45743	4.18575	0.03609	7.29464	-0.38028	

			4		
1.96925	5.24326	0.05858	6.32946	-0.38816	
			5		
0.47233	6.07783	0.06634	5.16825	-0.40091	
			6		
-1.02035	6.70104	0.04850	3.85979	-0.41523	
			7		
-2.49817	7.12268	-0.00382	2.45008	-0.42544	
			8		
-3.95219	7.35070	-0.09748	0.98276	-0.42396	
			9		
-5.37444	7.39138	-0.23732	-0.50047	-0.40175	
			10		
-6.75724	7.24957	-0.42616	-1.95947	-0.34862	

Calcul des efforts aux 10ièmes de portée de la poutre 2

N	V	Q	Mz	My
				1
6.33982	1.34787	0.00000	8.42536	-0.37773
				2
4.92084	2.89211	0.01169	8.01179	-0.37773
				3
3.45743	4.18575	0.03609	7.29464	-0.38028
				4
1.96925	5.24326	0.05858	6.32946	-0.38816
				5
0.47233	6.07783	0.06634	5.16825	-0.40091

6				
-1.02035	6.70104	0.04850	3.85979	-0.41523
7				
-2.49817	7.12268	-0.00382	2.45008	-0.42544
8				
-3.95219	7.35070	-0.09748	0.98276	-0.42396
9				
-5.37444	7.39138	-0.23732	-0.50047	-0.40175
10				
-6.75724	7.24957	-0.42616	-1.95947	-0.34892

Calcul des efforts aux 10ièmes de portée du poteau

N	V	Q	Mz	My
1				
20.74420	-0.91544	-0.91544	1.84233	1.84233
2				
20.74420	-0.91544	-0.91544	1.63763	1.63763
3				
20.74420	-0.91544	-0.91544	1.43293	1.43293
4				
20.74420	-0.91544	-0.91544	1.22823	1.22823
5				
20.74420	-0.91544	-0.91544	1.02354	1.02354
6				
20.74420	-0.91544	-0.91544	0.81884	0.81884

TOITURE SPHERIQUE EN GEBETON

7

20.74420 -0.91544 -0.91544 0.61414 0.61414

8

20.74420 -0.91544 -0.91544 0.40944 0.40944

9

20.74420 -0.91544 -0.91544 0.20474 0.20474

10

20.74420 -0.91544 -0.91544 0.00005 0.00005

EFFORTS MAXIMAUX

POUTRE 1	POUTRE 2	POTEAU
N _a .max = -6.75724	N _b .max = -6.75724	N _c .max = 20.74420
V _a .max = 7.39138	V _b .max = 7.39138	V _c .max = -0.91544
Q _a .max = -0.42616	Q _b .max = -0.42616	Q _c .max = -0.91544
M _{az} .max = 8.47598	M _{bz} .max = 8.47598	M _z .max = 1.84233
M _{ay} .max = -0.42544	M _{by} .max = -0.42544	M _y .max = 1.84233

ANNEXE C :

2.2.6 Barres d'armature standard canadiennes

TABLEAU 2.1

Barres n°	DIMENSIONS NOMINALES			Masse (kg/m)
	Aires	Diamètre	Périmètre	
	(mm) ²	(mm)	(mm)	
10	100	11.3	35,5	0,785
15	200	16.0	50,1	1,570
20	300	19.5	61,3	2,355
25	500	25.2	79,2	3,925
30	700	29.9	93,9	5,495
35	1000	35.7	112,2	7,850
45	1500	43.7	137,3	11,775
55	2500	56.4	177.2	19,625

TABLEAU 11.1 : Coefficients de flambement k

		k			
Partie supérieure	Rotule	0.81	0.91	0.95	1.00
	Élastique	0.77	0.86	0.90	0.95
	Élastique	0.74	0.83	0.86	0.91
	Rigide	0.67	0.74	0.77	0.81
Effets de stabilité de la pièce		Rigide	Élastique	Élastique	Rotule
		Partie inférieure			

(reproduit du tableau C1 de l'appendice C du A23.3)

TABLEAU 4.4

f'_c β_1	20 0,85	25 0,85	30 0,85	35 0,81	40 0,77
$\rho_{\max.} = \bar{\rho}_b$ $K_r \max.$	0,0153 3,8755	0,0191 4,8444	0,0230 5,8132	0,0255 6,5671	0,0277 7,2477
$\rho = 0,85 \bar{\rho}_b$ K_r	0,0130 3,4633	0,0163 4,3291	0,0195 5,1949	0,0217 5,8508	0,0236 6,4381
$\rho = 0,80 \bar{\rho}_b$ K_r	0,0122 3,3126	0,0153 4,1408	0,0184 4,9690	0,0204 5,5909	0,0222 6,1465
$\rho = 0,70 \bar{\rho}_b$ K_r	0,0107 2,9914	0,0134 3,7393	0,0161 4,4871	0,0179 5,0396	0,0194 5,5306
$\rho = 0,60 \bar{\rho}_b$ K_r	0,0092 2,6437	0,0115 3,3046	0,0138 3,9655	0,0153 4,4462	0,0166 4,8711
$\rho = 0,55 \bar{\rho}_b$ K_r	0,0084 2,4598	0,0105 / 3,0748	0,0126 3,6897	0,0140 4,1336	0,0152 4,5251
$\rho = 0,50 \bar{\rho}_b$ K_r	0,0077 2,2694	0,0096 2,8367	0,0115 3,4041	0,0128 3,8105	0,0139 4,1681
$\rho = 0,45 \bar{\rho}_b$ K_r	0,0069 2,0723	0,0086 2,5904	0,0103 3,1084	0,0115 3,4769	0,0125 3,8003
$\rho = 0,40 \bar{\rho}_b$ K_r	0,0061 1,8686	0,0077 2,3357	0,0092 2,8028	0,0102 3,1328	0,0111 3,4216
$\rho = 0,35 \bar{\rho}_b$ K_r	0,0054 1,6582	0,0067 2,0728	0,0080 2,4873	0,0089 2,7780	0,0097 3,0320
$\rho = 0,30 \bar{\rho}_b$ K_r	0,0046 1,4412	0,0057 1,8015	0,0069 2,1618	0,0077 2,4128	0,0083 2,6315
$\rho = 0,20 \bar{\rho}_b$ K_r	----- 0,9873	0,0038 1,2342	0,0046 1,4810	0,0051 1,6507	0,0055 1,7979
$\rho_{\min.} = \frac{1,4}{f_y}$ $K_r \min.$	0,0035 1,1206	0,0035 1,1345	0,0035 1,1437	0,0035 1,1503	0,0035 1,1553

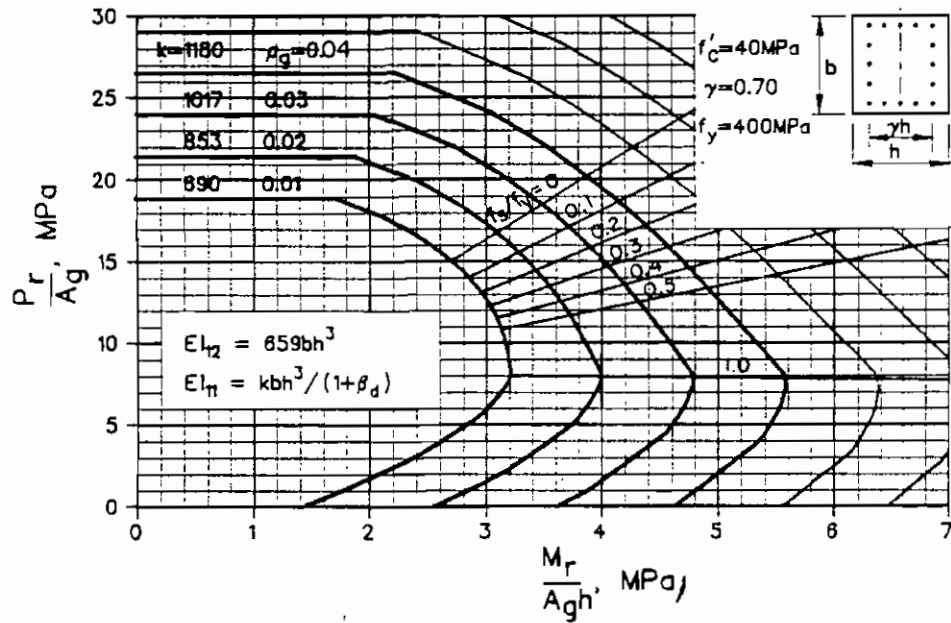
Valeurs de K_r (MPa), pour $f_y = 400$ MPa

TABLEAU 4.5

f_y K_r	300					350					400				
	20	25	30	35	40	20	25	30	35	40	20	25	30	35	40
0,20	0,079	0,079	0,079	0,079	0,079	0,068	0,068	0,068	0,068	0,068	0,059	0,059	0,059	0,059	0,059
0,40	0,160	0,159	0,159	0,159	0,158	0,137	0,137	0,136	0,136	0,136	0,120	0,120	0,119	0,119	0,119
0,60	0,243	0,241	0,240	0,239	0,239	0,208	0,207	0,206	0,205	0,205	0,182	0,181	0,180	0,180	0,179
0,80	0,327	0,324	0,322	0,321	0,320	0,280	0,278	0,276	0,275	0,274	0,245	0,243	0,242	0,241	0,240
1,00	0,414	0,409	0,406	0,404	0,402	0,354	0,350	0,348	0,346	0,345	0,310	0,307	0,304	0,303	0,302
1,20	0,502	0,495	0,491	0,488	0,485	0,430	0,424	0,421	0,418	0,416	0,377	0,371	0,368	0,366	0,364
1,40	0,593	0,583	0,577	0,572	0,569	0,508	0,500	0,494	0,491	0,488	0,445	0,437	0,433	0,429	0,427
1,60	0,686	0,673	0,664	0,658	0,654	0,688	0,577	0,569	0,564	0,561	0,515	0,505	0,498	0,494	0,491
1,80	0,782	0,764	0,753	0,746	0,740	0,671	0,655	0,646	0,639	0,634	0,587	0,573	0,565	0,559	0,556
2,00	0,881	0,858	0,844	0,834	0,827	0,756	0,735	0,723	0,715	0,709	0,661	0,643	0,633	0,625	0,620
2,20	0,984	0,954	0,936	0,924	0,915	0,843	0,817	0,802	0,792	0,784	0,738	0,715	0,702	0,693	0,686
2,40	1,090	1,052	1,029	1,015	1,004	0,934	0,902	0,882	0,870	0,861	0,817	0,789	0,772	0,761	0,753
2,60	1,199	1,152	1,125	1,107	1,094	1,028	0,988	0,964	0,949	0,938	0,900	0,864	0,844	0,830	0,821
2,80	1,314	1,256	1,223	1,201	1,186	1,126	1,076	1,048	1,029	1,017	0,985	0,942	0,917	0,901	0,889
3,00	1,433	1,362	1,322	1,297	1,279	1,228	1,167	1,133	1,111	1,096	1,075	1,021	0,992	0,972	0,959
3,20	1,559	1,471	1,424	1,394	1,373	1,336	1,261	1,220	1,195	1,177	1,169	1,104	1,068	1,045	1,029
3,40	1,691	1,584	1,528	1,492	1,468	1,449	1,358	1,310	1,279	1,258	1,268	1,188	1,146	1,119	1,101
3,60	1,831	1,701	1,634	1,593	1,565	1,569	1,458	1,401	1,365	1,341	1,373	1,276	1,226	1,195	1,174
3,80	1,980	1,822	1,744	1,696	1,663	1,698	1,562	1,494	1,453	1,425	1,485	1,367	1,308	1,272	1,247
4,00	2,142	1,948	1,856	1,800	1,763	1,836	1,670	1,590	1,543	1,511	—	1,461	1,392	1,350	1,322
4,20	—	2,079	1,971	1,907	1,864	—	1,782	1,689	1,634	1,598	—	1,560	1,478	1,430	1,398
4,40	—	2,217	2,089	2,016	1,967	—	1,900	1,791	1,728	1,686	—	1,663	1,567	1,512	1,476
4,60	—	2,362	2,211	2,127	2,072	—	2,024	1,896	1,823	1,776	—	1,771	1,659	1,595	1,554
4,80	—	2,515	2,338	2,241	2,179	—	2,155	2,004	1,921	1,868	—	1,886	1,753	1,681	1,634
5,00	—	2,678	2,469	2,358	2,288	—	2,295	2,116	2,021	1,961	—	—	1,851	1,768	1,716
5,20	—	—	2,605	2,478	2,399	—	—	2,232	2,124	2,056	—	—	1,953	1,858	1,799
5,40	—	—	2,746	2,601	2,512	—	—	2,354	2,229	2,153	—	—	2,060	1,951	1,884
5,60	—	—	2,894	2,727	2,628	—	—	2,481	2,338	2,252	—	—	2,171	2,046	1,971
5,80	—	—	3,049	2,858	2,746	—	—	2,614	2,450	2,353	—	—	2,287	2,143	2,059
6,00	—	—	3,213	2,993	2,866	—	—	2,754	2,565	2,457	—	—	—	2,244	2,150
6,20	—	—	3,388	3,132	2,990	—	—	—	2,685	2,563	—	—	—	2,349	2,243
6,40	—	—	—	3,277	3,117	—	—	—	2,809	2,672	—	—	—	2,458	2,338
6,60	—	—	—	3,427	3,247	—	—	—	2,938	2,783	—	—	—	—	2,435
6,80	—	—	—	3,584	3,381	—	—	—	—	2,898	—	—	—	—	2,536
7,00	—	—	—	3,749	3,519	—	—	—	—	3,016	—	—	—	—	2,639
7,20	—	—	—	—	3,661	—	—	—	—	3,138	—	—	—	—	2,746
7,40	—	—	—	—	3,809	—	—	—	—	3,264	—	—	—	—	—
7,60	—	—	—	—	3,961	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
7,80	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
8,00	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

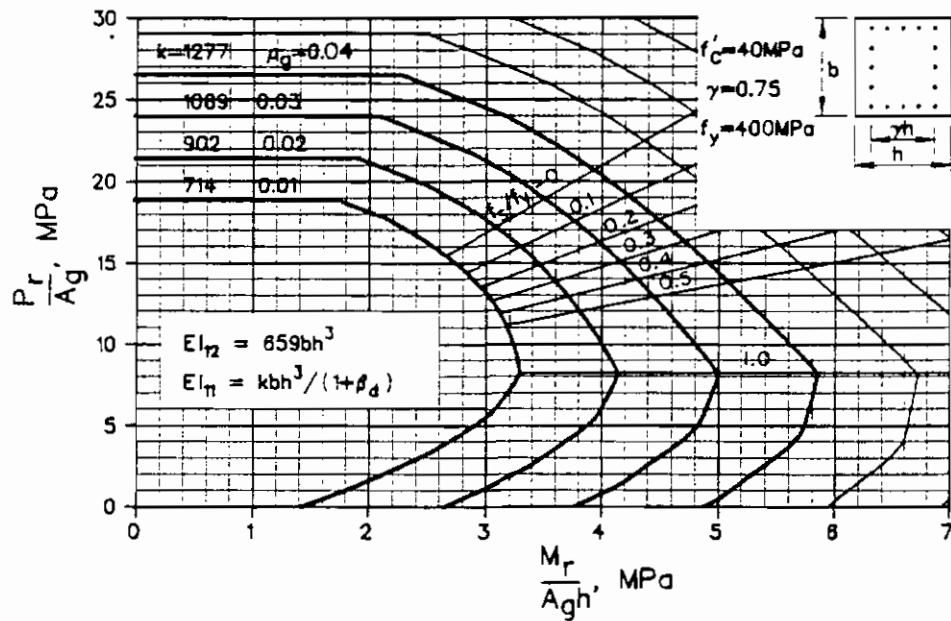
Valeurs de 100 μ
 f_y , f_c , K_r sont exprimés en MPa

TABEAU 11.3 : Diagramme d'interaction pour un poteau rectangulaire avec un nombre égal de barres sur les quatre côtés



TABEAU 11.4 : Diagramme d'interaction pour un poteau rectangulaire avec un nombre égal de barres sur les quatre côtés

(reproduits de la référence 11.1)



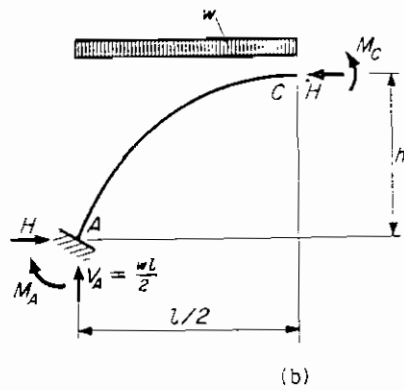
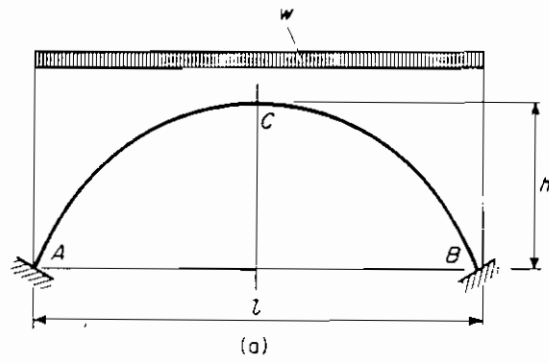


Table 10.4.1 THRUST AND END MOMENT IN CIRCULAR FIXED ARCHES

h/l	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50
H/wl	1.26	0.83	0.61	0.52	0.44	0.38	0.34	0.30	0.28
M_A/wl^2	0.001	0.002	0.004	0.007	0.010	0.013	0.018	0.022	0.027

ANNEXE D :

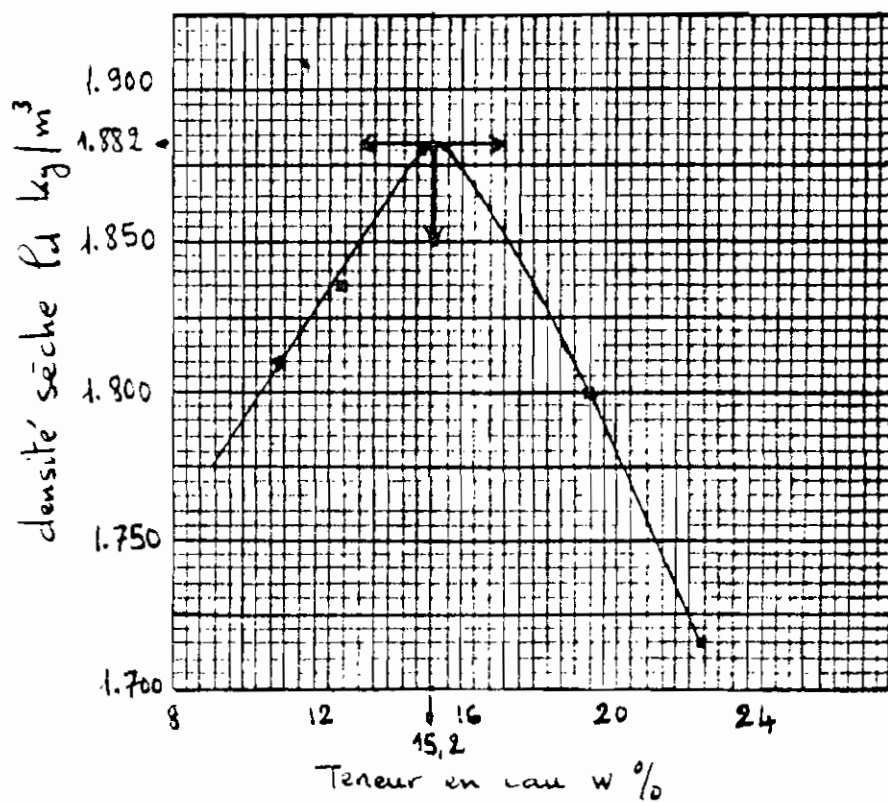
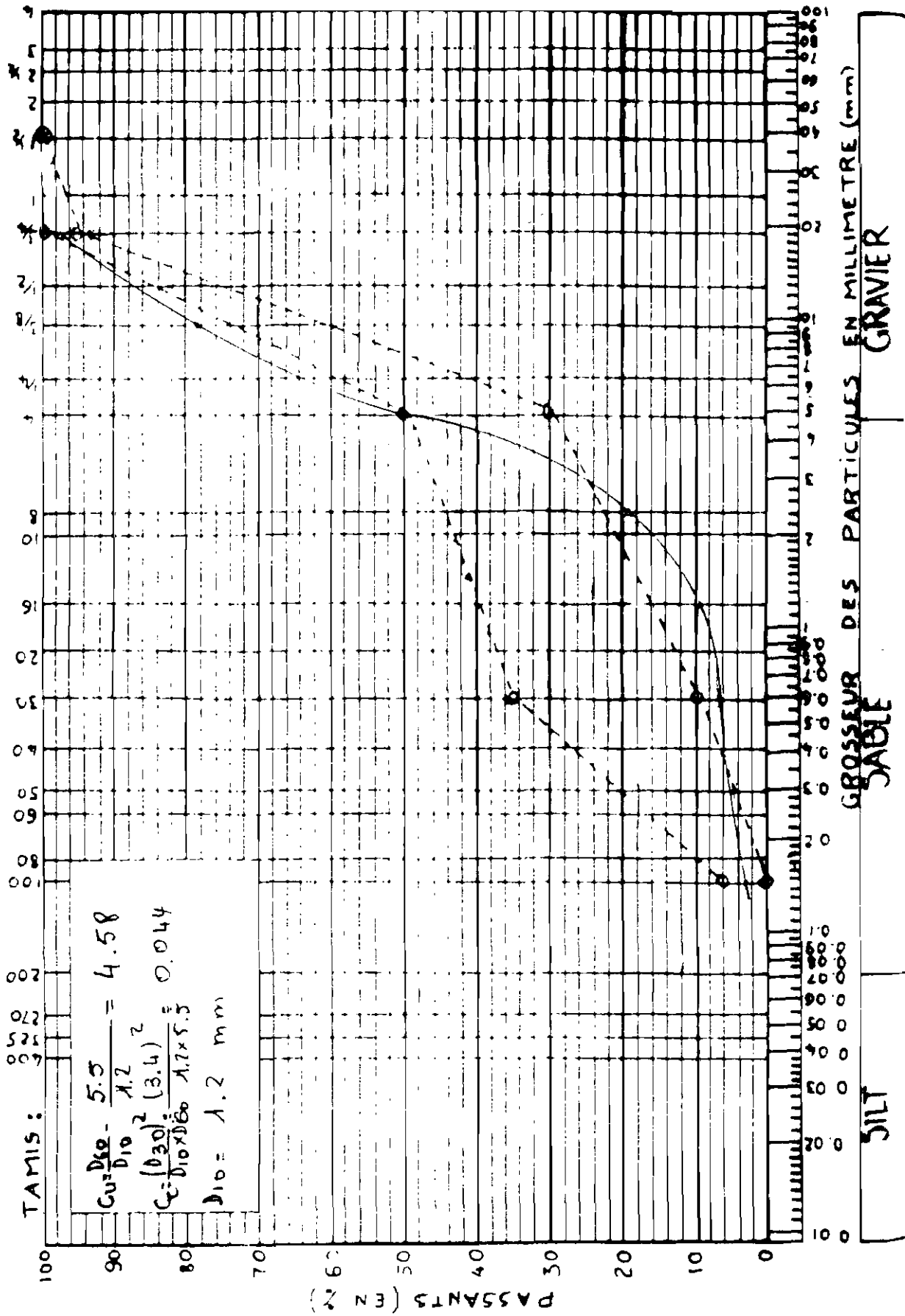


Fig 22.11 : Courbe de compactage

fig 3.3 COURBE GRANULOMETRIQUE - LATERITE BRUNE DE 1982



```
#####  
: I M A B E S - 3 D  
: Interactive Microcomputer Analysis of General Elastic Structures ;  
#####  
: This program is the property of and is furnished under license ;  
: by Celestial Software Inc. The program is confidential and may ;  
: be used, copied and disclosed only in accordance with the terms ;  
: of such license and with the inclusion of this notice in its ;  
: entirety. This program is protected as an unpublished work under ;  
: the copyright act of 1976 and amendments thereto, and the copy- ;  
: right notice as used herein is intended solely as a claim to ;  
: copyright and is not intended to imply a publication of the ;  
: program.  
#####  
: #####  
: Copyright (c) 1984 thru 1990 by Celestial Software Inc. ;  
: All Rights Reserved  
: #####
```

ECOLE POLYTECHNIQUE DE MONTREAL S/N:801651

07/13/93

PAGE 3

RUN ID=EE37582

15:12:13

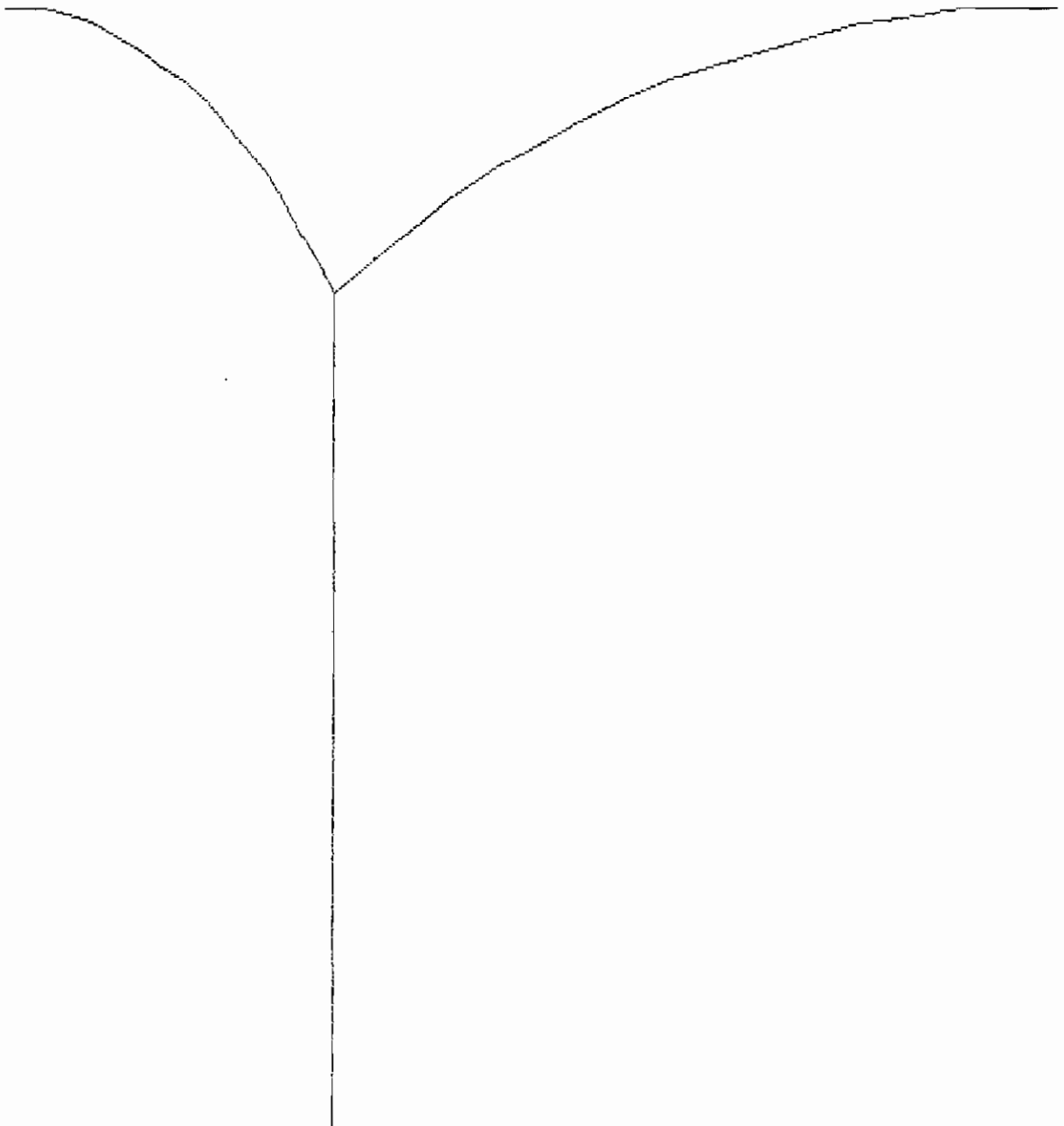
===== I M A G E S - 3 D =====

= Copyright (c) 1984 Celestial Software Inc. =

=====

GEOMETRY PLOT

Version 2.0



===== I M A G E S 3 D =====
 = Copyright (c) 1984 Celestial Software Inc. =
 =====

CHECK GEDMETRY Version 2.0 07/01/90

MATERIAL PROPERTIES

Material No	Modulus of Elasticity	Weight Density	Coeff of Thermal Exp.	Poisson's Ratio	Shear Web Modulus
1	2.00000E+07	2.34500E+03	6.33000E-06	1.50E-01	0.00000E+00

NODE COORDINATES

Node	X-Coord.	Y-Coord.	Z-Coord.
1	2.00000E+00	3.00000E+00	0.00000E+00
2	1.86322E+00	2.99688E+00	0.00000E+00
3	1.72673E+00	2.98753E+00	0.00000E+00
4	1.59081E+00	2.97196E+00	0.00000E+00
5	1.45573E+00	2.95022E+00	0.00000E+00
6	1.32179E+00	2.92233E+00	0.00000E+00
7	1.18926E+00	2.88838E+00	0.00000E+00
8	1.05842E+00	2.84841E+00	0.00000E+00
9	9.29534E-01	2.80252E+00	0.00000E+00
10	8.02874E-01	2.75080E+00	0.00000E+00
11	6.78704E-01	2.69336E+00	0.00000E+00
12	5.57282E-01	2.63032E+00	0.00000E+00
13	4.38860E-01	2.56181E+00	0.00000E+00
14	3.23686E-01	2.48797E+00	0.00000E+00
15	2.11997E-01	2.40895E+00	0.00000E+00
16	1.04027E-01	2.32493E+00	0.00000E+00
17	0.00000E+00	2.23607E+00	0.00000E+00
18	0.00000E+00	3.00000E+00	2.00000E+00
19	0.00000E+00	2.99688E+00	1.86322E+00
20	0.00000E+00	2.98753E+00	1.72673E+00
21	0.00000E+00	2.97196E+00	1.59081E+00
22	0.00000E+00	2.95022E+00	1.45573E+00
23	0.00000E+00	2.92233E+00	1.32179E+00
24	0.00000E+00	2.88838E+00	1.18926E+00
25	0.00000E+00	2.84841E+00	1.05842E+00
26	0.00000E+00	2.80252E+00	9.29534E-01
27	0.00000E+00	2.75080E+00	8.02874E-01
28	0.00000E+00	2.69336E+00	6.78704E-01
29	0.00000E+00	2.63032E+00	5.57282E-01
30	0.00000E+00	2.56181E+00	4.38860E-01

ECOLE POLYTECHNIQUE DE MONTREAL S/N:801651 07/13/93
 PAGE 5 RUN ID=EE375B2 15:22:37

===== I M A G E 3 D =====
 = Copyright (c) 1984 Celestial Software Inc. =
 =====

CHECK GEOMETRY Version 2.0 07/01/90

Node	X-Coord.	Y-Coord.	Z-Coord.
31	0.00000E+00	2.48797E+00	3.23686E-01
32	0.00000E+00	2.40895E+00	2.11997E-01
33	0.00000E+00	2.32493E+00	1.04027E-01
34	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
35	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
36	2.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
37	0.00000E+00	0.00000E+00	2.00000E+00

*** WARNING - *** Nodes 34 & 35 are <=0.0001 apart in all 3 dirs. ***

BEAM PROPERTIES

Multiplier = 1 (For AISC database properties only)

Prop No	X-Section Area	Moment of Inertia Iy / Iz	Torsional Const.- J
1	6.250E-02	3.255E-04 / 3.255E-04	9.115E-04
2	9.000E-02	6.750E-04 / 6.750E-04	1.890E-03

Prop No	Max. Fiber Dist Cy / Cz	Shear SSFy / SSFz	Shape Fact / SSFz	Ctors	Shear Stress Factor SSTRFy / SSTRFz
1	1.25E-01 / 1.25E-01	0.00E+00 / 0.00E+00	0.00E+00 / 0.00E+00	1.00E+00	1.00E+00 / 1.00E+00
2	1.50E-01 / 1.50E-01	0.00E+00 / 0.00E+00	0.00E+00 / 0.00E+00	1.00E+00	1.00E+00 / 1.00E+00

Enter Concentrated Loads

?1

2)	-8.359100E-01	-8.519900E-01	-4.970000E-03	23)	-1.217000E-02	-7.316600E-01	-6.083400E-01
	0. 0 E+00	0. 0 E+00	0. 0 E+00		0. 0 E+00	0. 0 E+00	0. 0 E+00
3)	-7.736100E-01	-8.202500E-01	-1.223000E-02	24)	-5.810000E-03	-7.041500E-01	-5.605000E-01
	0. 0 E+00	0. 0 E+00	0. 0 E+00		0. 0 E+00	0. 0 E+00	0. 0 E+00
4)	-7.149100E-01	-7.896500E-01	-1.567000E-02	25)	3.240000E-03	-6.775700E-01	-5.163000E-01
	0. 0 E+00	0. 0 E+00	0. 0 E+00		0. 0 E+00	0. 0 E+00	0. 0 E+00
5)	-6.598100E-01	-7.601500E-01	-1.556000E-02	26)	1.467000E-02	-6.518700E-01	-4.757500E-01
	0. 0 E+00	0. 0 E+00	0. 0 E+00		0. 0 E+00	0. 0 E+00	0. 0 E+00
6)	-6.083400E-01	-7.316600E-01	-1.217000E-02	27)	2.818000E-02	-6.270100E-01	-4.388400E-01
	0. 0 E+00	0. 0 E+00	0. 0 E+00		0. 0 E+00	0. 0 E+00	0. 0 E+00
7)	-5.605000E-01	-7.041500E-01	-5.810000E-03	28)	4.346000E-02	-6.296000E-01	-4.055500E-01
	0. 0 E+00	0. 0 E+00	0. 0 E+00		0. 0 E+00	0. 0 E+00	0. 0 E+00
8)	-5.163000E-01	-6.775700E-01	3.240000E-03	29)	6.019000E-02	-5.796900E-01	-3.758500E-01
	0. 0 E+00	0. 0 E+00	0. 0 E+00		0. 0 E+00	0. 0 E+00	0. 0 E+00
9)	-4.757500E-01	-6.518700E-01	1.467000E-02	30)	7.808000E-02	-5.571800E-01	-3.469600E-01
	0. 0 E+00	0. 0 E+00	0. 0 E+00		0. 0 E+00	0. 0 E+00	0. 0 E+00
10)	-4.388400E-01	-6.270100E-01	2.818000E-02	31)	9.680000E-02	-5.354000E-01	-3.269900E-01
	0. 0 E+00	0. 0 E+00	0. 0 E+00		0. 0 E+00	0. 0 E+00	0. 0 E+00
11)	-4.055500E-01	-6.029600E-01	4.346000E-02	32)	1.160700E-01	-5.143300E-01	-3.076800E-01
	0. 0 E+00	0. 0 E+00	0. 0 E+00		0. 0 E+00	0. 0 E+00	0. 0 E+00
12)	-3.758500E-01	-5.796900E-01	6.019000E-02	33)	1.355800E-01	-4.939600E-01	-2.916500E-01
	0. 0 E+00	0. 0 E+00	0. 0 E+00		0. 0 E+00	0. 0 E+00	0. 0 E+00
13)	-3.469600E-01	-5.571800E-01	7.808000E-02				
	0. 0 E+00	0. 0 E+00	0. 0 E+00				
14)	-3.269900E-01	-5.354000E-01	9.680000E-02				
	0. 0 E+00	0. 0 E+00	0. 0 E+00				
15)	-3.076800E-01	-5.143300E-01	1.160700E-01				
	0. 0 E+00	0. 0 E+00	0. 0 E+00				
16)	-2.916500E-01	-4.939600E-01	1.355800E-01				
	0. 0 E+00	0. 0 E+00	0. 0 E+00				
17)	-1.237500E-01	-9.485600E-01	-1.237500E-01				
	0. 0 E+00	0. 0 E+00	0. 0 E+00				
19)	-4.970000E-03	-8.519900E-01	-8.359100E-01				
	0. 0 E+00	0. 0 E+00	0. 0 E+00				
20)	-1.223000E-02	-8.202500E-01	-7.736100E-01				
	0. 0 E+00	0. 0 E+00	0. 0 E+00				
21)	-1.567000E-02	-7.896500E-01	-7.149100E-01				
	0. 0 E+00	0. 0 E+00	0. 0 E+00				
22)	-1.556000E-02	-7.601500E-01	-6.598100E-01				
	0. 0 E+00	0. 0 E+00	0. 0 E+00				

ECOLE POLYTECHNIQUE DE MONTREAL S/N:801651 05/25/93
 PAGE 5 Run ID=8095680 05:11:52

===== I M A G E S 3 D =====
 = Copyright (c) 1984 Celestial Software Inc. =
 =====

SOLVE BEAM LOADS/STRESSES Version 2.0 07/01/90

Load Case 4:F + 6 + H

BEAM LOADS AND/OR STRESSES

LLoads	Node	Axial	Y-Shear	Z-Shear	Torsion	Y-Bending	Z-Bending
Stress	Node	Axial	Y-Shear	Z-Shear	Torsion	Y-Bending	Z-Bending
Stress	Node	Maximum	Minimum	Max. Shear			

BEAM NO. 1							
LLoads	1	-.4814E+01	.1098E+00	.8472E-14	.2604E-03	.1142E-01	.4214E+01
LLoads	2	.4814E+01	-.1098E+00	-.8472E-14	-.2604E-03	-.1142E-01	-.4199E+01
BEAM NO. 2							
LLoads	2	-.3911E+01	.1122E+01	-.4970E-02	.7809E-03	.1140E-01	.4199E+01
LLoads	3	.3911E+01	-.1122E+01	.4970E-02	-.7809E-03	-.1072E-01	-.4045E+01
BEAM NO. 3							
LLoads	3	.2994E+01	.2026E+01	.1720E-01	.1269E-02	.1067E-01	.4045E+01
LLoads	4	.2994E+01	-.2026E+01	-.1720E-01	-.1269E-02	-.8316E-02	-.3768E+01
BEAM NO. 4							
LLoads	4	-.2067E+01	.2826E+01	-.3287E-01	.1646E-02	.8249E-02	.3768E+01
LLoads	5	.2067E+01	-.2826E+01	.3287E-01	-.1646E-02	-.3752E-02	-.3381E+01
BEAM NO. 5							
LLoads	5	-.1136E+01	.3528E+01	-.4843E-01	.1816E-02	.3673E-02	.3381E+01
LLoads	6	.1136E+01	-.3528E+01	.4843E-01	-.1816E-02	-.2953E-02	-.2899E+01
BEAM NO. 6							
LLoads	6	-.2027E+00	.4133E+01	-.6060E-01	.1679E-02	-.3032E-02	.2899E+01
LLoads	7	.2027E+00	-.4133E+01	.6060E-01	-.1679E-02	.1132E-01	-.2333E+01
BEAM NO. 7							
LLoads	7	.7278E+00	.4648E+01	-.6641E-01	.1161E-02	-.1139E-01	.2333E+01
LLoads	8	.7278E+00	-.4648E+01	.6641E-01	-.1161E-02	.2047E-01	-.1697E+01
BEAM NO. 8							
LLoads	8	.1653E+01	.5075E+01	.6317E-01	.2265E-03	-.2051E-01	.1697E+01
LLoads	9	.1653E+01	-.5075E+01	-.6317E-01	-.2265E-03	.2915E-01	-.1003E+01
BEAM NO. 9							
LLoads	9	.2569E+01	.5418E+01	-.4850E-01	.1103E-02	-.2913E-01	.1003E+01
LLoads	10	-.2569E+01	-.5418E+01	.4850E-01	-.1103E-02	.3576E-01	-.2618E+00
BEAM NO. 10							
LLoads	10	.3475E+01	.5680E+01	-.2032E-01	-.2732E-02	-.3568E-01	.2618E+00
LLoads	11	-.3475E+01	-.5680E+01	.2032E-01	.2732E-02	.3846E-01	.5153E+00
BEAM NO. 11							
LLoads	11	.4368E+01	.5864E+01	.2314E-01	-.4482E-02	-.3829E-01	-.5153E+00
LLoads	12	-.4368E+01	-.5864E+01	-.2314E-01	.4482E-02	.3513E-01	.1318E+01
BEAM NO. 12							
LLoads	12	.5247E+01	.5972E+01	.8333E-01	-.6079E-02	-.3488E-01	-.1318E+01
LLoads	13	-.5247E+01	-.5972E+01	-.8333E-01	.6079E-02	.2348E-01	.2135E+01
BEAM NO. 13							
LLoads	13	.6109E+01	.6007E+01	.1614E+00	-.7143E-02	-.2318E-01	-.2135E+01
LLoads	14	-.6109E+01	-.6007E+01	-.1614E+00	.7143E-02	.1099E-02	.2957E+01

ECOLE POLYTECHNIQUE DE MONTREAL S/N:801651 05/25/93
 PAGE 6 Run ID=0D95680 05:12:05

===== I M A G E S 3 D =====
 = Copyright (c) 1984 Celestial Software Inc. =
 =====

```

q2 1 SOLVE BEAM LOADS/STRESSES: Version 2.0 07/01/90
q2 2
q2 3
q2 Load Case: A + B + H
q2
q2 Loads Node Axial Y-Shear Z-Shear Torsion Y-Bending Z-Bending
q2 Stress Node Axial Y-Shear Z-Shear Torsion Y-Bending Z-Bending
q2 Stress Node Maximum Minimum Cmb. Shear
-----
q2 14 ***BEAM NO. 14***
q2 LLoads 14 .6952E+01 .5971E+01 .2582E+00 -.7186E-02 -.7726E-03 -.2957E+01
q2 LLoads 15 .6952E+01 -.5971E+01 .2582E+00 .7186E-02 -.3455E-01 .3773E+01
q2 15 ***BEAM NO. 15***
q2 LLoads 15 .7776E+01 .5865E+01 .3743E+00 -.5603E-02 .3485E-01 -.3773E+01
q2 LLoads 16 -.7776E+01 .5865E+01 .3743E+00 .5603E-02 .8605E-01 .4576E+01
q2 16 ***BEAM NO. 16***
q2 LLoads 16 .8578E+01 .5690E+01 .5099E+00 -.1674E-02 .8622E-01 -.4576E+01
q2 LLoads 17 -.8578E+01 .5690E+01 .5099E+00 .1674E-02 .1560E+00 .5354E+01
q2 17 ***BEAM NO. 17***
q2 LLoads 18 .4805E+01 .1096E+00 .3188E-13 -.2604E-03 -.1142E-01 .4214E+01
q2 LLoads 19 .4805E+01 -.1096E+00 .3188E-13 .2604E-03 .1142E-01 .4199E+01
q2 18 ***BEAM NO. 18***
q2 LLoads 19 -.3903E+01 .1121E+01 .4970E-02 -.7809E-03 -.1140E-01 .4199E+01
q2 LLoads 20 .3903E+01 -.1121E+01 -.4970E-02 .7809E-03 .1072E-01 -.4046E+01
q2 20 ***BEAM NO. 19***
q2 LLoads 20 -.2986E+01 .2025E+01 .1720E-01 -.1269E-02 -.1067E-01 .4046E+01
q2 LLoads 21 .2986E+01 -.2025E+01 -.1720E-01 .1269E-02 .8316E-02 -.3769E+01
q2 21 ***BEAM NO. 20***
q2 LLoads 21 -.2059E+01 .2825E+01 .3287E-01 -.1646E-02 -.8249E-02 .3769E+01
q2 LLoads 22 .2059E+01 -.2825E+01 -.3287E-01 .1646E-02 .3752E-02 -.3382E+01
q2 22 ***BEAM NO. 21***
q2 LLoads 22 .1128E+01 .3526E+01 .4843E-01 -.1816E-02 -.3673E-02 .3382E+01
q2 LLoads 23 .1128E+01 -.3526E+01 -.4843E-01 .1816E-02 -.2953E-02 -.2900E+01
q2 23 ***BEAM NO. 22***
q2 LLoads 23 -.1948E+00 .4131E+01 .6060E-01 -.1679E-02 .3032E-02 .2900E+01
q2 LLoads 24 .1948E+00 -.4131E+01 -.6060E-01 .1679E-02 -.1132E-01 -.2335E+01
q2 24 ***BEAM NO. 23***
q2 LLoads 24 .7356E+00 .4646E+01 .6641E-01 -.1161E-02 .1139E-01 .2335E+01
q2 LLoads 25 -.7356E+00 -.4646E+01 -.6641E-01 .1161E-02 -.2047E-01 -.1699E+01
q2 25 ***BEAM NO. 24***
q2 LLoads 25 .1660E+01 .5072E+01 .6317E-01 -.2265E-03 .2051E-01 .1699E+01
q2 LLoads 26 -.1660E+01 -.5072E+01 -.6317E-01 .2265E-03 -.2915E-01 -.1005E+01
q2 26 ***BEAM NO. 25***
q2 LLoads 26 .2577E+01 .5415E+01 .4850E-01 .1103E-02 .2913E-01 .1005E+01
q2 LLoads 27 -.2577E+01 -.5415E+01 -.4850E-01 -.1103E-02 -.3576E-01 -.2644E+00
q2 27 ***BEAM NO. 26***
q2 LLoads 27 .3482E+01 .5677E+01 .2032E-01 .2732E-02 .3568E-01 .2644E+00
q2 LLoads 28 -.3482E+01 -.5677E+01 -.2032E-01 -.2732E-02 .3846E-01 .5122E+00
q2 28 ***BEAM NO. 27***
q2 LLoads 28 .4388E+01 .5884E+01 .2314E-01 .4482E-02 .3829E-01 .5122E+00
    
```

ECOLE POLYTECHNIQUE DE MONTREAL S/N:801651 05/25/93
 PAGE 7 Run ID=0095680 05:12:17
 ===== I M A G E S 3 D =====
 = Copyright (c) 1984 Celestial Software Inc. =
 =====
 SOLVE BEAM LOADS/STRESSES Version 2.0 07/01/90

Load Case 4:F + G + H
 LLoads Node Axial Y-Shear Z-Shear Torsion Y-Bending Z-Bending
 Stress Node Axial Y-Shear Z-Shear Torsion Y-Bending Z-Bending
 Stress Node Maximum Minimum Com. Shear

 LLoads 29 .4388E+01 .5884E+01 .2314E-01 .4482E-02 .3513E-01 .1317E+01
 BEAM NO. 28
 LLoads 29 .5267E+01 .5991E+01 .8333E-01 .6079E-02 .3488E-01 .1317E+01
 LLoads 30 .5267E+01 .5991E+01 .8333E-01 .6079E-02 .2348E-01 .2137E+01
 BEAM NO. 29
 LLoads 30 .6127E+01 .6027E+01 .1614E+00 .7143E-02 .2318E-01 .2137E+01
 LLoads 31 .6127E+01 .6027E+01 .1614E+00 .7143E-02 .1099E-02 .2961E+01
 BEAM NO. 30
 LLoads 31 .6972E+01 .5989E+01 .2582E+00 .7186E-02 .7726E-03 .2961E+01
 LLoads 32 .6972E+01 .5989E+01 .2582E+00 .7186E-02 .3455E-01 .3781E+01
 BEAM NO. 31
 LLoads 32 .7797E+01 .5882E+01 .3743E+00 .5603E-02 .3485E-01 .3781E+01
 LLoads 33 .7797E+01 .5882E+01 .3743E+00 .5603E-02 .8605E-01 .4586E+01
 BEAM NO. 32
 LLoads 33 .8599E+01 .5707E+01 .5099E+00 .1674E-02 .8622E-01 .4586E+01
 LLoads 17 .8599E+01 .5707E+01 .5099E+00 .1674E-02 .1560E+00 .5366E+01
 BEAM NO. 33
 LLoads 35 .2077E+02 .2446E+01 .2440E+01 .7198E-29 .4460E-15 .8838E-15
 LLoads 17 .2077E+02 .2446E+01 .2440E+01 .7198E-29 .5457E+01 .5469E+01

ECOLE POLYTECHNIQUE DE MONTREAL S/N:801651 05/25/93
 PAGE 8 Run ID=0095680 05:12:24
 ===== I M A G E S 3 D =====
 = Copyright (c) 1984 Celestial Software Inc. =
 =====
 SOLVE REACTIONS Version 2.0 07/01/90

Load Case 4:F + G + H

REACTIONS

Node	Fx	Fy	Fz	Mx	My	Mz
1	.4815E+01	.0000E+00	.0000E+00	.0000E+00	-.1142E-01	.4214E+01
18	.0000E+00	.0000E+00	.4807E+01	-.4214E+01	.1142E-01	.0000E+00
35	.2440E+01	.2077E+02	.2446E+01	.0000E+00	.0000E+00	.0000E+00

Quelques vérifications sur les résultats.

* Le poids propre et la réaction verticale

Le poids propre de la toiture peut être calculé comme suit:

- le poids de la toiture hémisphérique dont elle est dérivée,
- soustrait des poids des calottes sphériques générées par la coupe de la sphère.

** Le poids propre de la demi-sphère (d'épaisseur h , de rayon R et de poids volumique γ) est:

$$P = 4\pi R^2 h \gamma / 2 = 4 \times 3.14 \times (3.6055)^2 \times 0.08 \times 22 / 2$$

$$= 143.69 \text{ kN} \quad (1)$$

** Pour la demi-sphère, il existe 4 moitiés de calottes.

Le poids propre d'une calotte (d'épaisseur h , de rayon R et de poids volumique γ) est:

$$p_c = \pi R h (R - L/2) \gamma = 3.14 \times 3.6055 \times 0.08 \times (3.6055 - 4/2) \times 22$$

$$\cong 32 \text{ kN}$$

$$\text{Le poids des 4 demi-sphères est : } P_c = 32 \times 2 = 64 \text{ kN} \quad (2)$$

(1) et (2) donnent le poids propre de la toiture :

$$P_t = P - P_c = 143.69 - 64 = 79.69 \text{ kN} \quad \Rightarrow P_t = 79.69 \text{ kN.}$$

Notre analyse ayant porté sur le quart de la toiture , le poids équivalent est de :

$$P_{1/4} = 79.69/4 \cong 20 \text{ kN.}$$

Les résultats des programmes TOITSD et IMAGES 3D fournissent respectivement les valeurs suivantes pour la réaction verticale:

$R_y = 20.7442 \text{ kN}$ et $R_y = 20.77 \text{ kN}$. Ce qui n'est pas loin de la valeur réelle qui est 20 kN.

Il est évident que le degré de convergence dépend du maillage effectué dans le logiciel IMAGES 3D ; car le model d'élément fini choisit pour la représentation des poutres circulaires étant les poutres prismatiques comme montrées dans le chapitre V , pour mieux s'approcher de la poutre circulaire , il faudra un nombre assez important de noeuds. Ceci par contre rend difficile l'application des charges concentrées en ces noeuds , car il faudra entrer 3 charges concentrées différentes en chaque noeud ; ce qui fait pour un maillage de 32 : 32×3 charges sur chacune des poutres ; soit 192 charges différentes . Ce grands nombres de valeurs différentes ne garantie pas une entrée des données sans erreurs.

Cependant, les résultats obtenus ne s'écartent pas trop suivants les deux programmes.

Nous signalons ici que le moment de torsion donné par le programme IMAGES 3D n'est pas aussi négligeable que nous l'avions supposé dans la programmation de TOITSD.

Par contre les hypothèses sur les valeurs des efforts tranchants suivant Y et Z faites dans le chapitre III sont en parfaite harmonie avec les résultats de IMAGES 3D.

Nous terminerons cette comparaison en rappelant que IMAGES 3D prend en compte d'autres sources d'efforts telles que la torsion et le cisaillement dans le calcul de l'énergie de déformation , ce que nous avons négliger dans la programmation de TOITSD.

REFERENCES

- 1 : Thin shell concrete structures, David P. Billington structures,
Mc Graw-Hill Book Company , 1965.
- 2 : Structural analysis of shells E. H. BAKER , L. KOVALEVSKY , F. L. RISH ,
Mc Graw-Hill Book Company , 1972.
- 3 : Structural Design in Architecture, Salvadori, and Levy
Prentice-Hall, 1970
- 4 : Structure et Architecture, Mario Salvadori, Robert Heller, André Gassen,
Eyrolles, 1976.
- 5 : Béton Armé Calcul aux états Limites, Aram Samikian
Gaëtan Morin,
- 6 : Résistance des Matériaux , André Bazergui, Thang Bui-Quoc, André Biron,
Georges Mc Intyre, Charles Laberge.
Ecole Polytechnique de Montréal, 1985 , 1987
- 7 : IMAGES 3D ,version 2.0, Technical Reference Manual, Celestial Software Inc,
- 8 : Introduction à la géotechnique, Robert D. Holtz, William D. Kovacs, Jean
Lafleur, Ecole Polytechnique de Montréal, 1991.
- 9 : Analyse des coques élastiques , Emmanuel Gharghoury,
Ecole Polytechnique de Montréal, 1978
- 10 : Résistance des matériaux, Dunod 1970 Morgan Laredo, Dunod 1970
- 11 : La Latérite et son utilisation en Génie-civil, Youssouf Sakho,
Institut National Polytechnique de Lorraine ,1986.
- 12 : Calcul différentiel et intégral , N. Piskounov, Edition de Moscou, 1980
- 13 : Notes de cours d'Analyse Numérique, Maguate Diop
Ecole Polytechnique de Thiès, 1990.
- 14 : Latérite-Matériau de construction (PHASE 3), Cheikh Fall
Ecole polytechnique de THIES, 1982.