

RÉPUBLIQUE DU SÉNÉGAL



ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE THIÈS

PROJET
DE
FIN D'ÉTUDES

Gm. 0367

Titre Réservoir en ferro-ciment

Auteur M_A_D MATOS

Génie CIVIL

Date JUIN 1984

Ecole Polytechnique
de THIES

Rapport du projet de
fin d'études

Titre : Reservoir en ferro-ciment

Auteur : MATOS MANUEL

Directeur: M^r Moustapha
NDIAYE

Thies le 1 - 6 - 84

Remerciements

Mes remerciements s'adressent à
M^r Moustapha Ndiaye en ce qui concerne
la bonne organisation et le bon déroulement
du projet de fin d'études.

De même, je remercie tous ceux ;
professeurs, techniciens et élèves qui ont
contribué à ma formation, ce qui m'a
permis aujourd'hui de réaliser ce travail.

Table des matières

<u>Chapitre 1</u>	Theorie des coques et plaques	Page
	Definition des paramètres	2
1.1.	systemes d'equations fondamentales	
1.1.1.	systemes d'axes utilisés	3
1.1.2.	definition des paramètres	5
1.1.3.	Convention des signes	6
1.1.4.	Equations fondamentales	7
1.2.	Solution des equations	
1.2.1.	Cas de figure	11
1.2.2.	Solution particulière	12
1.2.3.	Solution effets de bordure	13
1.3.	Analyse du reservoir	15
1.3.1.	principes de la methode	17
1.3.2.	Coupure théorique effectuée	18
1.3.3.	analyse du dôme	19
1.3.4.	analyse de l'anneau	23
1.3.5.	analyse du cylindre	29
1.4.	Calcul des forces d'interaction	34
<u>Chapitre 2</u>	Présentation du programme	
2.1.	generalités	38
2.2.	systemes d'unités	39
2.3.	Interpretation des resultats (unités)	39
2.4.	Rôle des sous-routines	40
<u>Chapitre 3</u>	Couaissance du ferro ciment	41
3.1.	Generalités	42
3.2.	Genèse et description du matériau	43
3.3.	données courantes	45
3.4.	première fissuration	46
3.5.	Procédés de mise en place	47

<u>chapitre 4</u>	Design	Page
4.1.	Application pratique	50
4.2.	Caractéristiques structurales	51
4.2.1	Contrainte à la 1 ^{ère} fissuration	
4.2.2.	Moment à la 1 ^{ère} fissuration	52
4.2.3.	Largeur de fissuration	
4.2.4.	Approche et Vérification	53
<u>Conclusion</u>		58
<u>Discussion et recommandations</u>		
<u>Bibliographie</u>		59
<u>Appendices</u>		
	Programme en fortran	79

Introduction

Ce projet de fin d'études présente deux aspects. D'abord un aspect académique dans la mesure où il faut prendre connaissance avec une nouvelle théorie d'étude des contraintes et déplacements, ensuite parce qu'il présente des possibilités d'être utilisé comme base pour promouvoir l'utilisation du ferrociment dans notre pays dans la mesure où le coût de construction avec ce matériau peut être rentable par rapport aux constructions conventionnelles.

C'est maintenant établi que les coques constituent des éléments structuraux d'une grande efficacité. Une coque qui est correctement appuyée porte les charges par action de membrane (compression ou traction) à l'exception des zones étroites adjacentes aux discontinuités de géométrie ou de chargement, telles que les bordures, les ouvertures, les variations brusques d'épaisseur ou de plan tangent, les charges concentrées.

A ce point de vue on peut dire qu'une coque continue est un funiculaire de tout chargement régulièrement distribué. Ce comportement se traduit par

par un rapport de charge utile sur charge morte beaucoup plus favorable que dans le cas des éléments porteurs en flexion. De là, les coques sont donc particulièrement appropriées pour porter des charges sur de grandes surfaces (portées), quand le poids propre devient une fraction prépondérante du chargement total. De nos jours, les applications de ce type de structure se sont diversifiées : château d'eau, réservoir, silo, barrages, voûtes à courbure simple ou double, toitures.

Malgré toutes ces réalisations, cependant, les coques en dépit de leurs avantages structuraux représentent une faible portion de l'ensemble des constructions. Il semble y avoir deux obstacles principaux à une utilisation plus étendue des coques :

- Le premier est d'ordre économique, en effet les méthodes traditionnelles de construction des coques de béton in situ requièrent une quantité considérable de coffrages et d'échafaudages ce qui entraîne un coût unitaire élevé par béton mis en place.

- Le deuxième obstacle réside dans les coques et de forme non symétrique. Cette difficulté est maintenant surmontée par l'utilisation dans ce cas de la méthode des éléments finis.

Chapitre 1

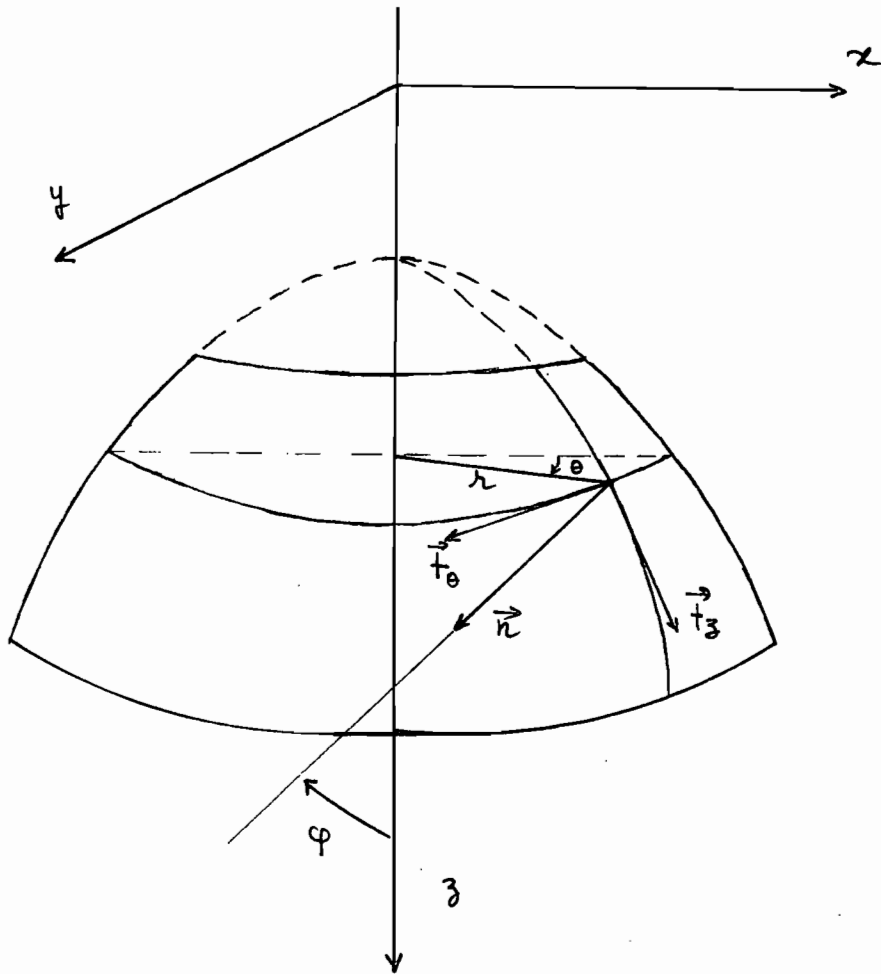
Théorie des coques
et plaques

Définition des Paramètres

<u>Nature</u>	<u>Notation dans le texte</u>	<u>Notation programme</u>	<u>unités</u>
Module d'élasticité du matériau	E	e	kN/m ²
Coefficient de poisson du matériau	ν	pois	-
rayon du dôme	r _d	rd	m
angle d'inclinaison maximal du dôme	φ_1	FI 1	degré
angle d'inclinaison quelconque	φ	FI	degré
rayon de l'anneau	r _a	ra	m
angle d'inclin. max. anneau	φ'_1	FP1	degré
" " min. "	φ'_0	FP0	degré
" " quelconque	φ'	FP	degré
rayon du cylindre	r _c	rc	m
hauteur du cylindre	h _c	hc	m
épaisseur du dôme	t _d	td	m
épaisseur anneau	t _a	ta	m
épaisseur cylindre	t _c	tc	m
densité ou poids spécifique du ferrociment	γ	dens	kN/m ³
poids spécifique du liquide	P _l	pl	kN/m ²
surcharge dôme et anneau	w _l	wl	kN/m ²
charge sur le dôme	w _d	wd	"
" " l'anneau	w _a	wa	"
" " le cylindre	w _c	wc	"

1.1 systemes d'equations fondamentales

1.1.1. systemes d'axes utilises



$$x = r(\varphi) \cos \theta$$

$$y = r(\varphi) \sin \theta$$

$$z = z$$

$$\vec{t}_3 \left| \begin{array}{l} r_3 \cos \theta \sin \varphi \\ r_3 \sin \theta \sin \varphi \\ \sin \varphi \end{array} \right. \quad \vec{t}_\theta \left| \begin{array}{l} -\sin \theta \\ \cos \theta \\ 0 \end{array} \right.$$

$$\vec{t}_\varphi \left| \begin{array}{l} -\sin \varphi \cos \theta \\ -\sin \varphi \sin \theta \\ \cos \varphi \end{array} \right.$$

$$K_3 = -\frac{1}{r_1} = r_3 \sin^3 \varphi$$

$$K_\theta = -\frac{1}{r_2} = -\sin \varphi / r$$

avec : r_1 et r_2 les rayons de courbure des sections normales à \vec{t}_3 et \vec{t}_θ mesurés positivement dans la direction de \vec{n} .

1.1.2. Définition des paramètres

$\vec{t}_z, \vec{t}_\theta, \vec{n}$ vecteurs unitaires du trièdre
fondamental

u, v, w déplacements dans les directions
 $\vec{t}_z, \vec{t}_\theta, \vec{n}$

$\omega_\theta, \omega_z, \omega_n$ rotations de \vec{n} dans les plans
 \vec{n}, \vec{t}_z ; \vec{n}, \vec{t}_θ et autour de \vec{n}

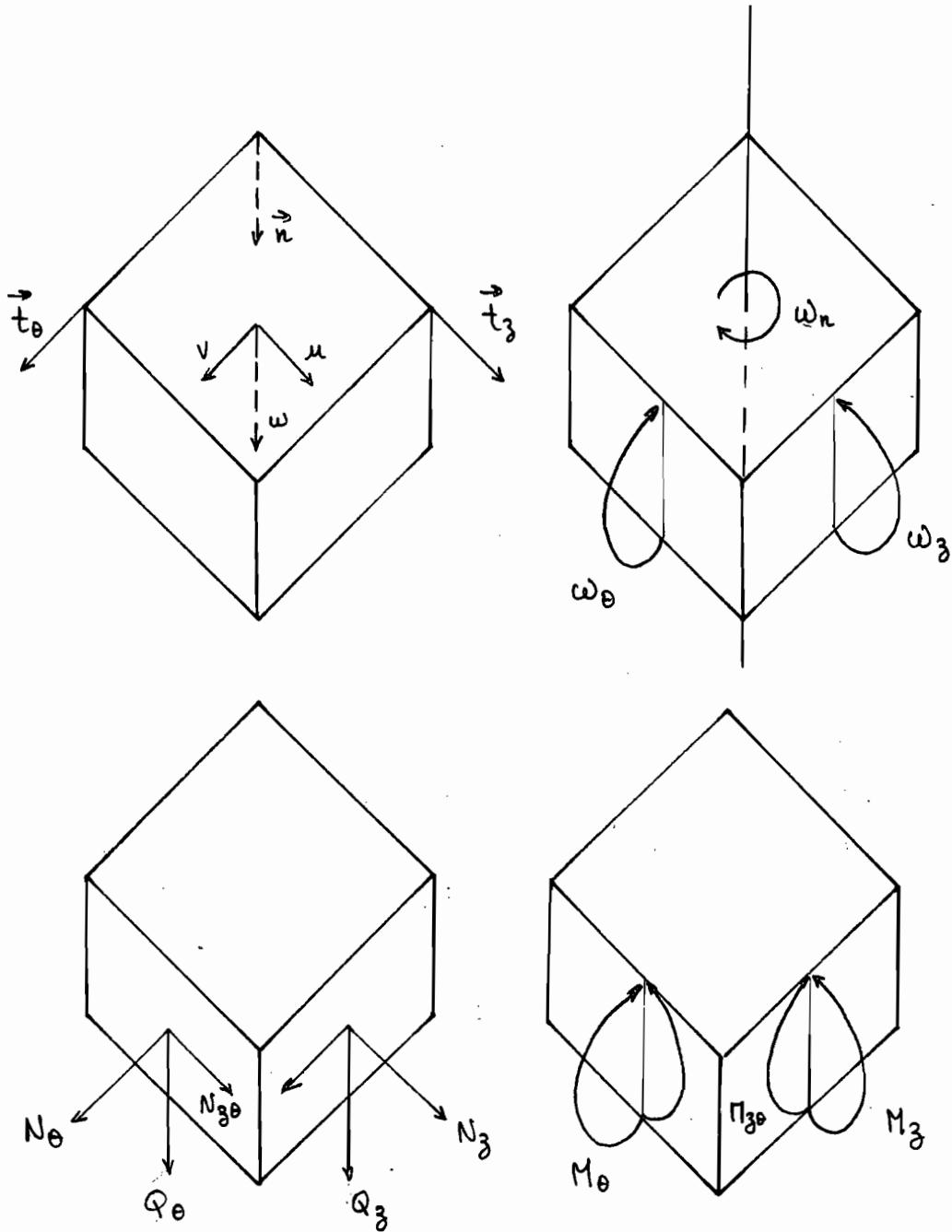
$N_z, N_\theta, N_{z\theta}$ contraintes normales

$M_z, M_\theta, M_{z\theta}$ moments flechissants et
de torsion unitaire.

$Q_z, Q_\theta, Q_{z\theta}$ contraintes tangentielles

1.1.3. Convention de signes

Le sens des flèches représente la direction positive des déplacements, des rotations et des contraintes.



1.1.4. Equations fondamentales

Equations d'equilibre

$$\begin{aligned}
 (rN_z)_{,3} + \frac{1}{\sin \varphi} N_{z0,0} - \cot \varphi N_\theta - \frac{r_2}{r_1} + r_2 q_z &= 0 \\
 rN_{z0,3} + \frac{1}{\sin \varphi} N_{\theta,0} + 2 \cot \varphi N_{z0} - Q_\theta + r_2 q_\theta &= 0 \\
 (rQ_z)_{,3} + \frac{1}{\sin \varphi} Q_{\theta,0} + \frac{r_2}{r_1} N_z + N_\theta + r_2 q_n &= 0 \quad (1) \\
 (rM_z)_{,3} + \frac{1}{\sin \varphi} M_{z0,0} - \cot \varphi M_\theta - r_2 Q_z &= 0 \\
 rM_{z0,3} + \frac{1}{\sin \varphi} M_{\theta,0} + 2 \cot \varphi M_{z0} - r_2 Q_\theta &= 0
 \end{aligned}$$

avec :

$$\begin{cases}
 q_z = \vec{t}_z \cdot \vec{P} \\
 q_\theta = \vec{t}_\theta \cdot \vec{P} \\
 q_n = \vec{t}_n \cdot \vec{P}
 \end{cases}$$

\vec{P} étant la force extérieure par unité d'aire de la surface moyenne.

Equations constitutives

$$\begin{array}{l|l}
 N_z = C_m (\varepsilon_z + \nu \varepsilon_\theta) & M_z = C_f (K_z + \nu K_\theta) \\
 N_\theta = C_m (\varepsilon_\theta + \nu \varepsilon_z) \quad (2) & M_\theta = C_f (K_\theta + \nu K_z) \quad (3) \\
 N_{z\theta} = C_m (1-\nu) \varepsilon_{z\theta} & M_{z\theta} = C_f (1-\nu) K_{z\theta}
 \end{array}$$

$K_z, K_\theta, K_{z\theta}$ étant les variations de courbure de la surface moyenne.

$\varepsilon_z, \varepsilon_\theta, \varepsilon_{z\theta}$ étant les extensions et la distorsion de la surface moyenne.

$$C_m = \frac{E h}{(1-\nu^2)} \quad \text{coefficient de rigidité à l'extension.}$$

$$C_f = \frac{E h^3}{12(1-\nu^2)} \quad \text{coefficient de rigidité à la flexion.}$$

E : module d'élasticité

ν : coefficient de poisson

h : épaisseur de la coque

Relations cinématiques

$$\begin{aligned}
 E_z &= \sin \varphi \mu_{,3} - \frac{\omega}{r_1} \\
 E_\theta &= \frac{1}{r} (v_{,0} + \cos \varphi \mu - \sin \varphi \omega) \quad (4) \\
 \text{et } E_{z\theta} &= \sin \varphi v_{,3} + \frac{1}{r} (\mu_{,0} - \cos \varphi v)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \omega_z &= -\sin \varphi \omega_{,3} - \frac{\mu}{r_1} \\
 \omega_\theta &= -\frac{1}{r} (\omega_{,0} + \sin \varphi \omega) \quad (5) \\
 \omega_n &= \frac{1}{2} \left[\sin \varphi v_{,3} - \frac{1}{r} (\mu_{,0} - \cos \varphi v) \right]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 (6) \quad K_z &= \sin \varphi \omega_{z,3} \\
 K_\theta &= \frac{1}{r} (\omega_{\theta,0} + \cos \varphi \omega_z) \\
 \text{et } K_{z\theta} &= \sin \varphi \omega_{\theta,3} + \frac{1}{r} (\omega_{z,0} - \cos \varphi \omega_\theta) + \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \omega_n
 \end{aligned}$$

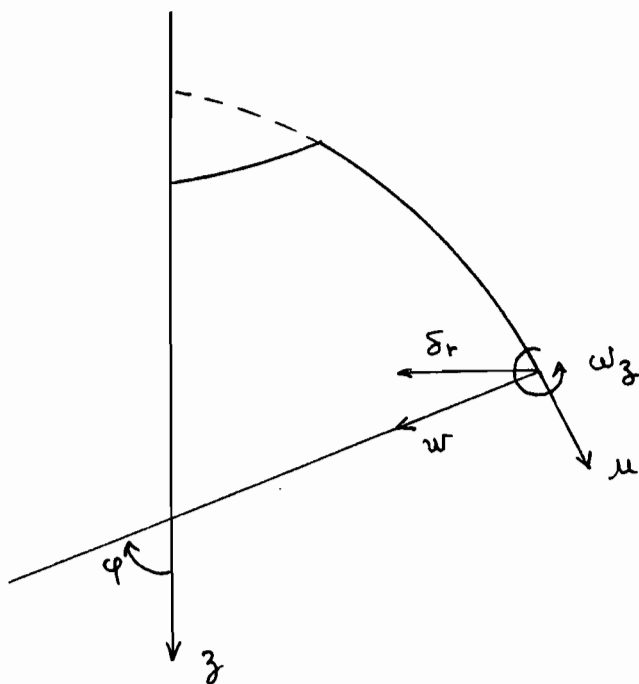
Les systèmes d'équations (1), (2), (3), (4) et (5) constituent un système linéaire de 17 équations à 17 inconnues avec lesquelles nous pouvons avoir la solution structurale d'une coque de révolution sur un système d'appui donné.

Les équations (6) nous donnent les variations des courbures correspondantes.

En tenant compte du mode d'appui qui est le plus fréquent en pratique il serait important d'ajouter à ces équations, d'autres relations qui lient le déplacement radial δ_r aux déplacements μ et ν .

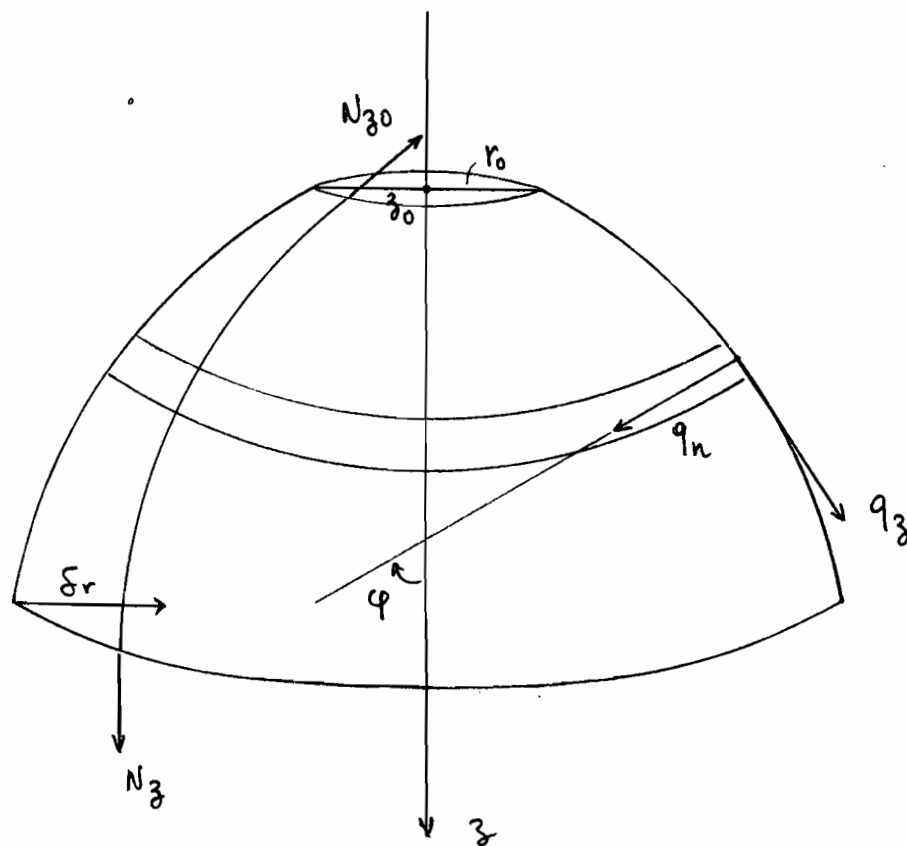
$$\delta_r = -\cos\varphi \mu + \sin\varphi \nu = -r \varepsilon_\theta + \nu_{,\theta}$$

$$\omega_z = (r \varepsilon_\theta)_{,z} - \cot\varphi \varepsilon_z - \frac{2}{\sin\varphi} \varepsilon_{z\theta,\theta} + \frac{1}{r \sin\varphi} (\mu_{,\theta\theta} - \cos\varphi \nu_{,\theta})$$



1.2. Solution des Equations

1.2.1 Car de figure



1.2.2. Solution particulière des équations

Cette solution particulière du système d'équations différentielles à 17 inconnues correspond à la solution membrane, dans ce cas on peut négliger les contributions de N_z , N_θ , $N_{z\theta}$, Q_z et Q_θ , nous aurons les équations suivantes.

. Equations d'équilibre

$$(7) \quad \left| \begin{array}{l} (rN_z)_{,z} + \frac{1}{\sin\varphi} N_{z\theta, \theta} - \cot\varphi N_\theta + r_2 q_z = 0 \\ rN_{z\theta, z} + \frac{1}{\sin\varphi} N_{\theta, \theta} + 2 \cot\varphi N_{z\theta} + r_2 q_\theta = 0 \\ \frac{r_2}{r_1} N_z + N_\theta + r_2 q_u = 0 \end{array} \right.$$

. Equations constitutives

$$(8) \quad \left| \begin{array}{l} N_z = C_m (\varepsilon_z + \nu \varepsilon_\theta) \\ N_\theta = C_m (\varepsilon_\theta + \nu \varepsilon_z) \\ N_{z\theta} = C_m (1 - \nu) \varepsilon_{z\theta} \end{array} \right.$$

. Equations cinématiques

$$(9) \quad \left| \begin{array}{l} \varepsilon_z = \sin\varphi \mu_{,z} - \frac{w}{r_1} \\ \varepsilon_\theta = \frac{1}{r} (v_{, \theta} + \cos\varphi \mu - \sin\varphi w) \\ 2\varepsilon_{z\theta} = \sin\varphi v_{,z} + \frac{1}{r} (\mu_{, \theta} - \cos\varphi v) \end{array} \right.$$

Par substitution on détermine les valeurs de $N_z, N_\theta, N_{z\theta}$ en (7), $\varepsilon_z, \varepsilon_\theta, \varepsilon_{z\theta}$ en (8) et μ, v, w en (9).

1.2.3. Solution des équations par un effet de bordure non asymptotique

Par expérience, nous savons que l'effet d'une action de bordure non-asymptotique s'amortit très rapidement quand on s'éloigne de la bordure c'est à dire que mathématiquement cela correspond à une variation décroissante et exponentielle des effets de bordure.

Si on néglige la variation des facteurs géométriques et si on ne conserve seulement la dérivée d'ordre supérieure, nous obtenons l'équation différentielle suivante :

$$w_{,\xi\xi\xi\xi} + 4\lambda^4 w = 0 \quad \text{avec } \xi = z/R$$

R : longueur caractéristique du dôme

$$\lambda = \left[\frac{3(1-\nu^2)}{\sin^4\varphi} \left(\frac{R}{r_2}\right)^2 \left(\frac{R}{h}\right)^2 \right]^{1/4}$$

ce qui donne :

$$w = e^{\mu(z-z_0)} \left[\alpha(\theta) \cos(\mu(z-z_0)) + \beta(\theta) \sin(\mu(z-z_0)) \right]$$

$$\text{avec } \mu = \frac{\lambda}{R} = \left[\frac{3(1-\nu^2)}{\sin^4\varphi (r_2 h)^2} \right]^{1/4}$$

son signe est déterminé de telle sorte que :

$$\mu (z - z_0) \leq 0$$

$\alpha(\theta)$, $\beta(\theta)$ sont des fonctions arbitraires de θ
et nous obtenons par substitution :

$$\left| \begin{array}{l} N_z = C_f \cos \varphi \sin^2 \varphi \omega_{,333} \\ N_\theta = -C_m (1-\nu^2) \frac{\omega}{r_2} \\ N_{z\theta} = -C_m (1-\nu^2) \frac{1}{4\mu^4 r_2^2 \sin^2 \varphi} \omega_{,333\theta} \end{array} \right.$$

$$\left| Q_z = -C_f \sin^3 \varphi \omega_{,333} \right.$$

et si on pose :

$$\phi = e^{\mu(z-z_0)} \cos(\mu(z-z_0))$$

$$\psi = e^{\mu(z-z_0)} \sin(\mu(z-z_0))$$

nous aurons :

$$\omega = \alpha \phi + \beta \psi \quad \omega_{,z} = \mu [(\alpha + \beta) \phi - (\alpha - \beta) \psi]$$

$$\omega_{,zz} = 2\mu^2 (\beta \phi - \alpha \psi) \quad \omega_{,zzz} = -2\mu^2 [(\alpha - \beta) \phi + (\alpha + \beta) \psi]$$

par conséquent :

$$\left| N_z = -2C_f \mu^3 \sin^2 \varphi \cos \varphi [(\alpha - \beta) \phi + (\alpha + \beta) \psi] \right.$$

$$\left| N_\theta = -\frac{Eh}{r_2} [\alpha \phi + \beta \psi] \right.$$

$$\left| M_z = -2C_f \mu^2 \sin^2 \varphi (\beta \phi - \alpha \psi) \right.$$

$$\left| Q_z = 2C_f \mu^3 \sin^3 \varphi [(\alpha - \beta) \phi + (\alpha + \beta) \psi] \right.$$

$$\left| \delta r = \sin \varphi (\alpha \phi + \beta \psi) \right.$$

$$\left| \omega_z = -\mu \sin \varphi [(\alpha + \beta) \phi - (\alpha - \beta) \psi] \right.$$

1.3. Analyse du réservoir

Le chargement étant symétrique, nous pouvons alors simplifier notre solution de membrane, ceci grâce au fait que toutes les dérivées par rapport à θ s'annulent de même que N_θ et ε_θ .

Les expressions (7), (8) et (9) donnent :

$$\left| \begin{array}{l} (r N_z)_{,z} - \cot \varphi N_\theta + r_2 q_z = 0 \\ \frac{r}{r_1} N_z + N_\theta + r_2 q_u = 0 \end{array} \right. \quad (11)$$

$$\left| \begin{array}{l} N_z = C_m (\varepsilon_z + \nu \varepsilon_\theta) \\ N_\theta = C_m (\varepsilon_\theta + \nu \varepsilon_z) \end{array} \right. \quad (12)$$

$$\left| \begin{array}{l} \varepsilon_z = \sin \varphi \mu_{,z} - \frac{\omega}{r_1} \\ \varepsilon_\theta = \frac{1}{r} (\cos \varphi \mu - \sin \varphi \omega) \end{array} \right. \quad (13)$$

Le système (11) nous donne par intégration :

$$\left| \begin{array}{l} N_z = -\frac{V}{2\pi r \sin \varphi} + \frac{r_0 \sin \varphi_0}{r \sin \varphi} N_{z0} \\ N_\theta = -r_2 \left(q_u + \frac{N_z}{r_1} \right) \end{array} \right.$$

$$\text{avec } V = \frac{1}{2\pi} \int r_2 (\sin \varphi q_z + \cos \varphi q_u) dz$$

Les déformations ε_z et ε_θ sont obtenues par substitution de N_z et N_θ dans les équations (12).

Les déplacements u et w sont obtenus par substitution de ε_z et ε_θ dans le système différentiel (13).

Nous avons ainsi :

$$Eh \delta r = -r (N_\theta - N_z)$$

$$Eh w_z = \cot \varphi (1+\nu) (N_\theta - N_z) + r (N_{\theta,z} - \nu N_{z,z})$$

1.3.1. Principes de la méthode d'analyse utilisée

a) supprimer un nombre suffisant de liaisons c'est à dire séparer la structure en 3 éléments distincts : dôme, anneau et cylindre.

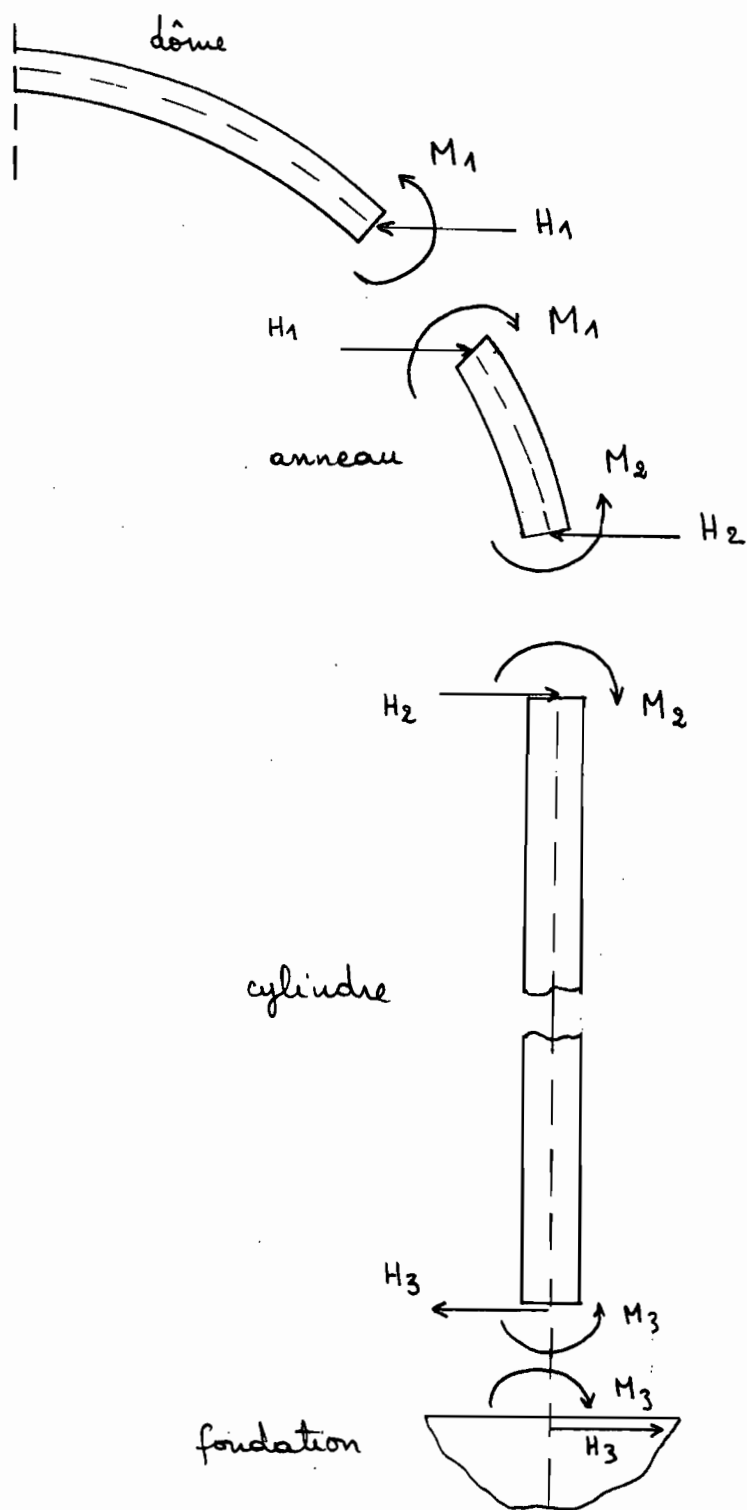
b) extérioriser les forces d'interaction qui sont ici $H_1, M_1, H_2, M_2, H_3, M_3$.

c) analyser chaque élément sous l'effet des forces d'interaction, des forces de volume et de surface qui lui sont appliquées.

d) calcul des forces d'interaction tenant compte des conditions de compatibilité de part et d'autre de chaque coupure.

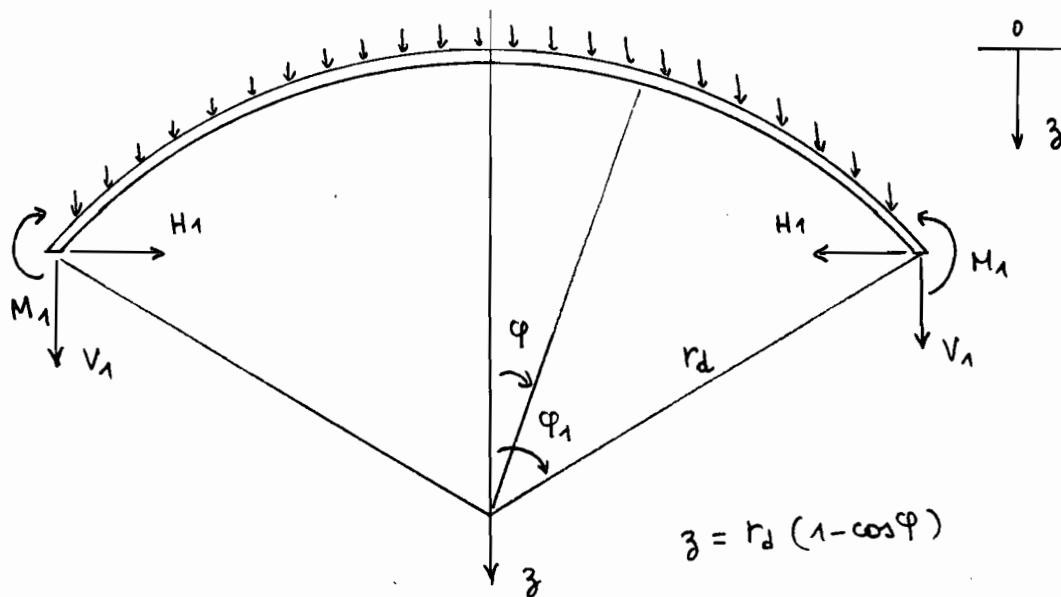
e) calcul des contraintes et déplacements de toute la structure.

1.3.2. Coupe théorique effectuée



1.3.3. Analyse du dôme

. indice d par la suite signifie dôme



conditions de bordure

- 1) déplacement circonférentiel $v_d = 0$
- 2) déplacement vertical $u_d \sin \varphi + w_d \cos \varphi = 0$
- 3) résultante horizontale des contraintes

$$H_1 = -N_z^d \cos \varphi_1 + Q_z^d \sin \varphi_1$$
- 4) moment flechissant $M_z^d = M_1$

La juxtaposition de la solution particulière et de la solution homogène des effets de bordure donne :

$$N_3^d = \left(-\frac{1}{1 + \cos \varphi} \right) r_d \omega_d - 2 C_{fd} \mu_d^3 \sin^2 \varphi_1 \cos \varphi_1 [(\alpha_1 - \beta_1) \phi_1 + (\alpha_1 + \beta_1) \psi_1]$$

$$N_0^d = \left(-\cos \varphi + \frac{1}{1 + \cos \varphi} \right) r_d \omega_d - \frac{E t_d}{r_d} (\alpha_1 \phi_1 + \beta_1 \psi_1)$$

$$M_3^d = -2 C_{fd} \mu_d^2 \sin^2 \varphi_1 (\beta_1 \phi_1 - \alpha_1 \psi_1)$$

$$Q_3^d = 2 C_{fd} \mu_d^3 \sin^3 \varphi_1 [(\alpha_1 - \beta_1) \phi_1 + (\alpha_1 + \beta_1) \psi_1]$$

$$E t_d S r_d^d = \sin \varphi \left(\cos \varphi - \frac{1 + \nu}{1 + \cos \varphi} \right) r_d^2 \omega_d + E t_d \sin \varphi_1 (\alpha_1 \phi_1 + \beta_1 \psi_1)$$

$$E t_d \omega_3^d = (2 + \nu) \sin \varphi r_d \omega_d - E t_d \mu_d \sin \varphi_1 [(\alpha_1 + \beta_1) \phi_1 - (\alpha_1 - \beta_1) \psi_1]$$

avec :
$$C_{fd} = \frac{E t_d^3}{12 (1 - \nu^2)}$$

$$\mu_d = \left[\frac{3 (1 - \nu^2)}{\sin^4 \varphi_1 (r_d t_d)^2} \right]^{1/4}$$

$$\left| \begin{array}{l} \phi_1 = e^{\mu_d (z - z_1)} \cos(\mu_d (z - z_1)) \\ \psi_1 = e^{\mu_d (z - z_1)} \sin(\mu_d (z - z_1)) \end{array} \right.$$

Pour $z = z_1$ ($\varphi = \varphi_1$) on a :

$$\begin{aligned} \bullet \quad -N_3^d \cos \varphi_1 + Q_3^d \sin \varphi_1 &= \frac{\cos \varphi_1}{1 + \cos \varphi_1} r_d \omega_d \\ &+ 2 C_{fd} M_d^3 \sin^2 \varphi_1 (\alpha_1 - \beta_1) = H_1 \\ \bullet \quad M_3^d &= -2 C_{fd} M_d^2 \sin^2 \varphi_1 \beta_1 = M_1 \end{aligned}$$

dont on tire :

$$\left| \begin{aligned} \alpha_1 &= \frac{1}{2 C_{fd} M_d^3 \sin^2 \varphi_1} \left(H_1 - M_d M_1 - \frac{\cos \varphi_1}{1 + \cos \varphi_1} r_d \omega_d \right) \\ \beta_1 &= -\frac{M_1}{2 C_{fd} M_d^2 \sin^2 \varphi_1} \end{aligned} \right.$$

L'état de contrainte s'exprime donc par :

$$\left| \begin{aligned} N_3^d &= N_{30}^d + N_{31}^d H_1 + N_{32}^d M_1 \\ N_\theta^d &= N_{\theta 0}^d + N_{\theta 1}^d H_1 + N_{\theta 2}^d M_1 \\ M_3^d &= M_{30}^d + M_{31}^d H_1 + M_{32}^d M_1 \\ Q_3^d &= Q_{30}^d + Q_{31}^d H_1 + Q_{32}^d M_1 \\ \delta_r^d &= \delta_{r0}^d + \delta_{r1}^d H_1 + \delta_{r2}^d M_1 \\ \omega_3^d &= \omega_{30}^d + \omega_{31}^d H_1 + \omega_{32}^d M_1 \end{aligned} \right.$$

Dans le programme, l'état de contrainte s'exprime par :

$$FD(I) = VC(I) + DM(I,1) H_1 + DM(I,2) H_2$$

FD \equiv contrainte, moment, déplacement, rotation

VC \equiv vecteur de charge du dôme

$$\begin{aligned}
 E_{1d} W_{20} &= 2 H_2 r_2^2 \sin^2 \phi_1 \phi_1 \\
 E_{1d} W_{21} &= -2 H_2 r_2^2 \sin^2 \phi_1 (\phi_1 - \psi_1) \\
 E_{1d} W_{20} &= (2 + \nu) \sin \phi_1 + 2 H_2 r_2^2 \sin^2 \phi_1 \cos \phi_1 (\phi_1 - \psi_1) \quad [r_2 \omega_d]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 E_{1d} \delta_{20} &= 2 H_2 r_2^2 \sin^2 \phi_1 (\phi_1 + \psi_1) \\
 E_{1d} \delta_{21} &= 2 H_2 r_2^2 \sin^2 \phi_1 \phi_1 \\
 E_{1d} \delta_{20} &= \left[\sin \phi_1 (\cos \phi_1 - 1 + \nu) - 2 H_2 r_2^2 \sin^2 \phi_1 \cos \phi_1 \frac{\nu + \cos \phi_1}{1 + \cos \phi_1} \right] \phi_1 \quad [r_2 \omega_d]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \phi_{20} &= 2 H_2 r_2^2 \sin^2 \phi_1 \psi_1 \\
 \phi_{21} &= \sin^2 \phi_1 (\phi_1 + \psi_1) \\
 \phi_{20} &= \left[\sin^2 \phi_1 \cos \phi_1 \frac{\nu + \cos \phi_1}{1 + \cos \phi_1} - \sin^2 \phi_1 (\phi_1 + \psi_1) \right] \quad [r_2 \omega_d]
 \end{aligned}$$

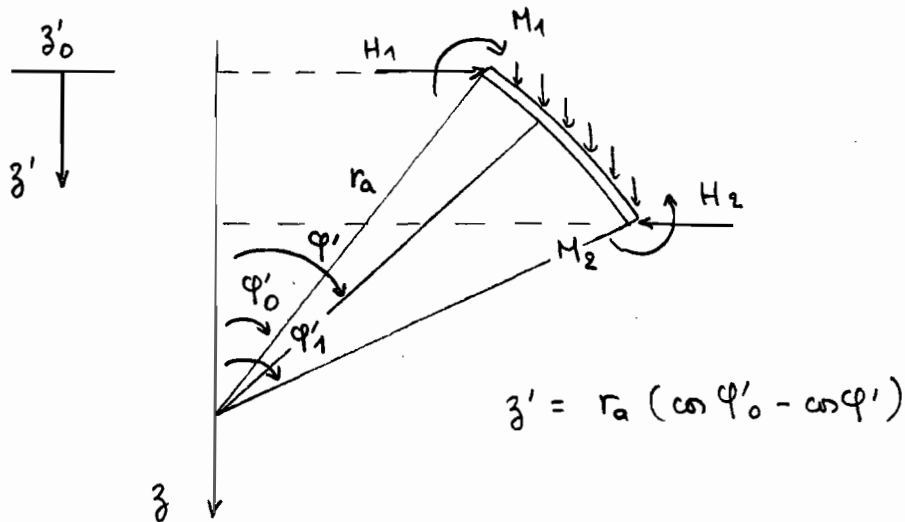
$$\begin{aligned}
 H_{20} &= \frac{H_2}{\phi_1 - \psi_1} \\
 H_{21} &= \frac{H_2}{\psi_1} \\
 H_{20} &= \left[-\frac{1}{\cos \phi_1} \frac{\nu + \cos \phi_1}{1 + \cos \phi_1} \psi_1 \right] \quad [r_2 \omega_d]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 W_{20} &= 2 H_2 r_2^2 \sin^2 \phi_1 (\phi_1 + \psi_1) \\
 W_{21} &= -2 H_2 r_2^2 \sin^2 \phi_1 \phi_1 \\
 W_{20} &= \left[-\cos \phi_1 + \frac{\nu + \cos \phi_1}{1 + \cos \phi_1} + 2 H_2 r_2^2 \sin^2 \phi_1 \cos \phi_1 \frac{\nu + \cos \phi_1}{1 + \cos \phi_1} \right] \phi_1 \quad [r_2 \omega_d]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 W_{20} &= 2 H_2 r_2^2 \cos \phi_1 \psi_1 \\
 W_{21} &= -\cos \phi_1 (\phi_1 + \psi_1) \\
 W_{20} &= \left[-\frac{\nu}{1 + \cos \phi_1} + \frac{\nu + \cos \phi_1}{\cos \phi_1} (\phi_1 + \psi_1) \right] \quad [r_2 \omega_d]
 \end{aligned}$$

1.3.4. Analyse de l'anneau

. indice a par la suite signifie anneau



Conditions de bordure

- 1) déplacement circouferentiel $v_a = 0$
- 2) déplacement vertical $w_a \sin \varphi' + \omega_a \cos \varphi' = 0$
- 3) résultante horizontale des contraintes

$$H_{1,2} = -N_z^a \cos \varphi'_{0,1} + Q_z^a \sin \varphi'_{0,1}$$
- 4) Moment fléchissant $M_z^a = M_{1,2}$

avec H_1, M_1 où $\varphi' = \varphi'_0$

et H_2, M_2 où $\varphi' = \varphi'_1$

L'état de contrainte s'exprime par la juxtaposition des 2 types de solution.

$$N_3^a = r_a \omega_a \left(\frac{\cos \varphi' - \cos \varphi'_0}{\sin^2 \varphi'} \right) - r_a \frac{\sin^2 \varphi'_0}{\sin^2 \varphi'} \omega_d \frac{1}{1 + \cos \varphi_1} \\ - 2 C_{fa} \mu_a^3 \sin^2 \varphi' \cos \varphi' \left[(\alpha_2 - \beta_2) \phi_2 - (\alpha_2 + \beta_2) \psi_2 + (\alpha_3 - \beta_3) \phi_3 + (\alpha_3 + \beta_3) \psi_3 \right]$$

$$N_\theta^a = -r_a \omega_a \left[\cos \varphi' + \frac{\cos \varphi' - \cos \varphi'_0}{\sin^2 \varphi'} \right] + r_a \frac{\sin^2 \varphi'_0}{\sin^2 \varphi} \omega_d \frac{1}{1 + \cos \varphi_1} \\ - \frac{E t_a}{r_a} \left[\alpha_2 \phi_2 - \beta_2 \psi_2 + \alpha_3 \phi_3 + \beta_3 \psi_3 \right]$$

$$M_3^a = 2 C_{fa} \mu_a^3 \sin^2 \varphi' \left[\beta_2 \phi_2 + \alpha_2 \psi_2 + \beta_3 \phi_3 - \alpha_3 \psi_3 \right]$$

$$Q_3^a = 2 C_{fa} \mu_a^3 \sin^3 \varphi' \left[-(\alpha_2 - \beta_2) \phi_2 + (\alpha_2 + \beta_2) \psi_2 + (\alpha_3 - \beta_3) \psi_3 + (\alpha_3 + \beta_3) \phi_3 \right]$$

$$E t_a \delta r^a = r_a^2 \omega_a \left[\sin \varphi' \cos \varphi' + (1+\nu) \left(\frac{\cos \varphi' - \cos \varphi'_0}{\sin \varphi'} \right) \right] - r_a^2 \omega_d \frac{\sin^2 \varphi'_0}{\sin \varphi'} (1+\nu) \frac{1}{1 + \cos \varphi_1} \\ + E t_a \sin \varphi' \left[\alpha_2 \phi_2 - \beta_2 \psi_2 + \alpha_3 \phi_3 + \beta_3 \psi_3 \right]$$

$$E t_a \omega_3^a = (2+\nu) r_a \omega_a \sin \varphi' \\ + E t_a \mu_a \sin \varphi' \left[(\alpha_2 + \beta_2) \phi_2 + (\alpha_2 - \beta_2) \psi_2 - (\alpha_3 + \beta_3) \phi_3 + (\alpha_3 - \beta_3) \psi_3 \right]$$

avec : $C_{fa} = \frac{E t_a^3}{12(1-\nu^2)}$

$$\mu_a = \left[\frac{3(1-\nu^2)}{\sin^4 \varphi' (r_a t_a)^2} \right]^{1/4}$$

$$z' - z'_1 = r_a (\cos \varphi'_1 - \cos \varphi')$$

$$\begin{cases} \phi_2 = e^{-\mu_a z'} \cos(\mu_a z') \\ \psi_2 = e^{-\mu_a z'} \sin(\mu_a z') \end{cases}$$

$$\begin{cases} \phi_3 = e^{\mu_a (z' - z'_1)} \cos(\mu_a (z' - z'_1)) \\ \psi_3 = e^{\mu_a (z' - z'_1)} \sin(\mu_a (z' - z'_1)) \end{cases}$$

• Pour $z' = 0$ ($\varphi' = \varphi'_0$)

$$\begin{cases} -N_3^a \cos \varphi'_0 + Q_3^a \sin \varphi'_0 = H_1 \\ M_3^a = -2 C_{fa} \mu_a^2 \sin^2 \varphi'_0 \beta_2 = M_2 \end{cases}$$

$$\alpha_2 = \frac{1}{2 C_{fa} \mu_a^3 \sin^2 \varphi'_0 \cos 2\varphi'_0} \left(H_1 - \mu_a \cos^2 \varphi'_0 M_1 - \frac{\cos \varphi'_0}{1 + \cos \varphi_1} r_a i \omega_d \right)$$

$$\beta_2 = - \frac{M_1}{2 C_{fa} \mu_a^2 \sin^2 \varphi'_0}$$

• Pour $z' = z'_1$ ($\varphi' = \varphi'_1$)

$$\begin{cases} -N_3^a \cos \varphi'_1 + Q_3^a \sin \varphi'_1 = H_2 \\ M_3^a = -2 C_{fa} \mu_a^2 \sin^2 \varphi'_1 \beta_3 = M_2 \end{cases}$$

$$\alpha_3 = \frac{1}{2 C_{fa} \mu_a^3 \sin^2 \varphi'_1} \left(H_2 - \mu_a M_2 + \frac{r_a \cos \varphi'_1}{\sin^2 \varphi'_1} (\omega_a (\cos \varphi'_1 - \cos \varphi'_0) - \omega_d \frac{\sin^2 \varphi'_0}{1 + \cos \varphi_1}) \right)$$

$$\beta_3 = - \frac{M_2}{2 C_{fa} \mu_a^2 \sin^2 \varphi'_1}$$

Comme dans le cas du dôme pu a :

$$FA \equiv N_3^a, N_0^a, M_3^a, Q_3^a, \omega_3^a, S_r^a$$

$$FA(I) = VA(I) + AM(I,1)H_1 + AM(I,2)H_2 \\ + AM(I,3)H_2 + AM(I,4)M_2$$

$$N_3^a = N_{30}^a + N_{31}^a H_1 + N_{32}^a M_1 + N_{33}^a H_2 + N_{34}^a M_2$$

$$N_0^a = N_{00}^a + N_{01}^a H_1 + N_{02}^a M_1 + N_{03}^a H_2 + N_{04}^a M_2$$

$$M_3^a = M_{30}^a + M_{31}^a H_1 + M_{32}^a M_1 + M_{33}^a H_2 + M_{34}^a M_2$$

$$Q_3^a = Q_{30}^a + Q_{31}^a H_1 + Q_{32}^a M_1 + Q_{33}^a H_2 + Q_{34}^a M_2$$

$$S_r^a = S_{r0}^a + S_{r1}^a H_1 + S_{r2}^a M_1 + S_{r3}^a H_2 + S_{r4}^a M_2$$

$$\omega_3^a = \omega_{30}^a + \omega_{31}^a H_1 + \omega_{32}^a M_1 + \omega_{33}^a H_2 + \omega_{34}^a M_2$$

Le terme $\omega_a (\cos \varphi' - \cos \varphi'_0) (1 + \cos \varphi_1) - \omega_d \sin^2 \varphi'_0 = A$
pour simplifier les équations.

$$N_{30}^a = r_a \left[A \times \left(-\frac{\sin 2\varphi'_1}{2 \operatorname{tg} \varphi'_1} (\phi_3 + \psi_3) + 1 \right) \frac{1}{\sin^2 \varphi'_1} \right. \\ \left. + \operatorname{tg} 2\varphi'_0 \omega_d (\phi_2 - \psi_2) \frac{1}{2 \operatorname{tg} \varphi'} \right] \frac{1}{(1 + \cos \varphi_1)}$$

$$N_{31}^a = -\sin \varphi'_0 (\phi_2 - \psi_2) / \operatorname{tg} \varphi' \cos 2\varphi'_0$$

$$N_{32}^a = -2 \mu_{\varphi'_0} \sin \varphi'_0 \psi_2 / \operatorname{tg} \varphi'$$

$$N_{33}^a = -\sin \varphi'_1 (\phi_3 + \psi_3) / \operatorname{tg} \varphi'$$

$$N_{34}^a = 2 \mu_{\varphi'_1} \sin \varphi'_1 \psi_3 / \operatorname{tg} \varphi'$$

$$N_{00}^a = -r_a \left[\omega_a \cos \varphi' + \frac{A}{\sin^2 \varphi'} \right] - 2r_a^2 \left[-\mu_{\varphi'_0} \sin \varphi'_0 \operatorname{tg} 2\varphi'_0 \omega_d \psi_2 + \right. \\ \left. \mu_{\varphi'_1} \cos \varphi'_1 A \psi_3 \right] / (1 + \cos \varphi_1)$$

$$N_{\theta 1}^a = -2 \mu_{\varphi'_0} \sin^2 \varphi'_0 r_a \phi_2 / \cos 2\varphi'_0$$

$$N_{\theta 2}^a = 2 \mu_{\varphi'_0}^2 \sin^2 \varphi'_0 r_a (\phi_2 - \psi_2)$$

$$N_{\theta 3}^a = -2 \mu_{\varphi'_1} \sin^2 \varphi'_1 r_a \psi_3$$

$$N_{\theta 4}^a = 2 \mu_{\varphi'_1}^2 \sin^2 \varphi'_1 r_a (\phi_3 + \psi_3)$$

$$M_{30}^a = -r_a \left[-\omega_d \operatorname{tg} 2\varphi'_0 / 2 + A / \operatorname{tg} \varphi'_1 \right] (\psi_2 - \psi_3) \frac{1}{\mu_{\varphi'} \sin \varphi' (1 + \cos \varphi_1)}$$

$$M_{31}^a = -\sin \varphi'_0 \psi_2 / \mu_{\varphi'} \sin \varphi' \cos 2\varphi'_0$$

$$M_{32}^a = \phi_2 + \psi_2$$

$$M_{33}^a = \sin \varphi'_1 \psi_3 / \mu_{\varphi'} \sin \varphi'$$

$$M_{34}^a = \phi_3 - \psi_3$$

$$Q_{30}^a = r_a \left[-\omega_d \operatorname{tg} 2\varphi'_0 (\psi_2 - \phi_2) / 2 + A (\psi_3 + \phi_3) / \operatorname{tg} \varphi'_1 \right] / (1 + \cos \varphi_1)$$

$$Q_{31}^a = \sin \varphi'_0 (\psi_2 - \phi_2) / \cos 2\varphi'_0$$

$$Q_{32}^a = -2 \mu_{\varphi'_0} \sin \varphi'_0 \psi_2$$

$$Q_{33}^a = \sin \varphi'_1 (\psi_3 + \phi_3)$$

$$Q_{34}^a = -2 \mu_{\varphi'_1} \sin \varphi'_1 \psi_3$$

$$E_{\theta} S_{r0}^a = \frac{r_a^2}{1 + \cos \varphi_1} \left[\omega_d \sin 2\varphi'_0 / 2 + (1 + \nu) A \right] \frac{1}{\sin \varphi'}$$

$$+ \frac{2 r_a^3 \sin \varphi'}{1 + \cos \varphi_1} \left[-\mu_{\varphi'_0} \omega_d \operatorname{tg} 2\varphi'_0 \sin \varphi'_0 \phi_2 + \mu_{\varphi'_1} \cos \varphi'_1 A \phi_3 \right]$$

$$E_{\theta} S_{r1}^a = 2 \mu_{\varphi'_0} r_a^2 \sin \varphi' \sin^2 \varphi'_0 \phi_2 / \cos 2\varphi'_0$$

$$E_{\theta} S_{r2}^a = -2 \mu_{\varphi'_0}^2 r_a^2 \sin \varphi' \sin^2 \varphi'_0 (\phi_2 - \psi_2)$$

$$E_{\theta} S_{r3}^a = 2 \mu_{\varphi'_1} r_a^2 \sin \varphi' \sin^2 \varphi'_1 \phi_3$$

$$E_{\theta} S_{r4}^a = -2 \mu_{\varphi'_1}^2 r_a^2 \sin \varphi' \sin^2 \varphi'_1 (\phi_3 + \psi_3)$$

$$E t_a \omega_{z_0}^a = (2+\nu) r_a \omega_a \sin \varphi' + \frac{2r_a^3 \mu_{\varphi'} \sin \varphi'}{1 + \cos \varphi_1} \left[-\mu_{\varphi'_0} \omega_a \tan^2 \varphi'_0 \sin \varphi'_0 (\psi_2 + \phi_2) + \mu_{\varphi'_1} \cos \varphi'_1 A (\psi_3 - \phi_3) \right]$$

$$E t_a \omega_{z_1}^a = 2 \mu_{\varphi'_0} \mu_{\varphi'} r_a^2 \sin \varphi' \sin^2 \varphi'_0 (\psi_2 + \phi_2) / \cos 2\varphi'_0$$

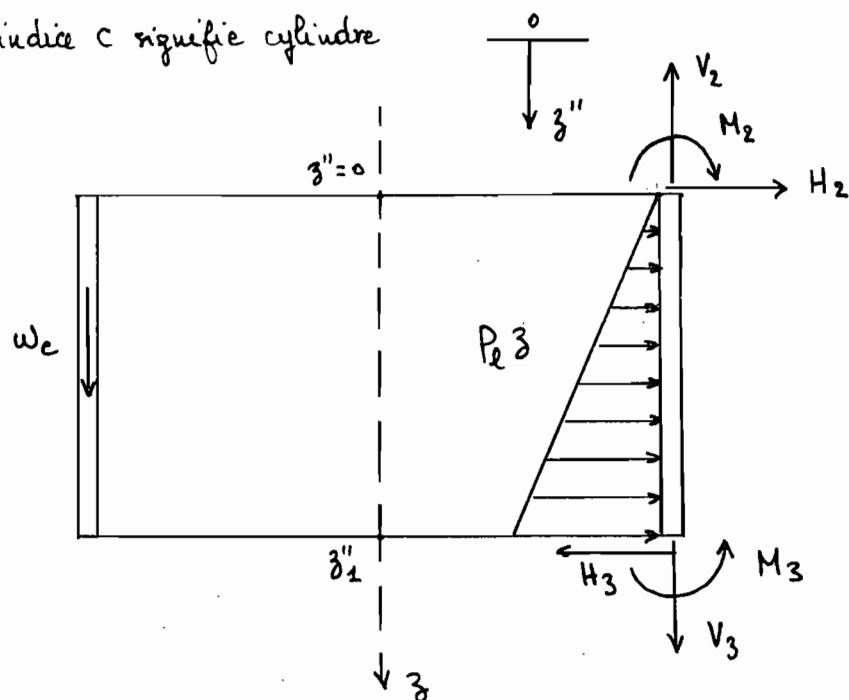
$$E t_a \omega_{z_2}^a = -4 \mu_{\varphi'_0}^2 \mu_{\varphi'} r_a^2 \sin \varphi' \sin^2 \varphi'_0 \phi_2$$

$$E t_a \omega_{z_3}^a = 2 \mu_{\varphi'} \mu_{\varphi'_1} r_a^2 \sin \varphi' \sin^2 \varphi'_1 (\psi_3 - \phi_3)$$

$$E t_a \omega_{z_4}^a = 4 \mu_{\varphi'} \mu_{\varphi'_1}^2 r_a^2 \sin \varphi' \sin^2 \varphi'_1 \phi_3$$

1.3.5 Analyse du cylindre

. indice c signifie cylindre



Conditions de bordure

$$\begin{array}{l|l}
 z''=0 & v^c = 0 \\
 & \sin\varphi'_1 N_3^c + Q_2^c \cos\varphi'_1 = V_2 \\
 & \sin\varphi'_1 Q_2^c - N_3^c \cos\varphi'_1 = H_2 \\
 & M_2^c = M_2
 \end{array}$$

$$\begin{array}{l|l}
 z''=z''_1 & v^c = 0 \\
 & u^c = 0 \\
 & Q_2^c = H_3 \\
 & M_3^c = M_3
 \end{array}$$

La juxtaposition des 2 types de solution donne :

$$N_z^c = \frac{r_a}{\sin \varphi'_1} [A] - \omega_c z''$$

$$N_\theta^c = p_l r_c z'' - \frac{E t_c}{r_c} (\alpha_4 \phi_4 - \beta_4 \psi_4 + \alpha_5 \phi_5 + \beta_5 \psi_5)$$

$$M_z^c = -2 C_{fc} \mu_c^2 (\beta_4 \phi_4 + \alpha_4 \psi_4 + \beta_5 \phi_5 - \alpha_5 \psi_5)$$

$$Q_z^c = 2 C_{fc} \mu_c^3 (-(\alpha_4 - \beta_4) \phi_4 + (\alpha_4 + \beta_4) \psi_4 + (\alpha_5 - \beta_5) \phi_5 + (\alpha_5 + \beta_5) \psi_5)$$

$$E t_c \delta r_c^e = -\gamma r_c \omega_c z'' - p_l r_c^2 z'' + \gamma r_c \frac{r_a}{\sin \varphi'_1} A$$

$$+ E t_c (\alpha_4 \phi_4 - \beta_4 \psi_4 + \alpha_5 \phi_5 + \beta_5 \psi_5)$$

$$E t_c \omega_z^c = \gamma r_c \omega_c + p_l r_c^2$$

$$+ E t_c \mu_c [(\alpha_4 + \beta_4) \phi_4 + (\alpha_4 - \beta_4) \psi_4 - (\alpha_5 + \beta_5) \phi_5 + (\alpha_5 - \beta_5) \psi_5]$$

avec :

$$C_{fc} = \frac{E t_c^3}{12 (1 - \nu^2)}$$

$$\mu_c = \left[\frac{3 (1 - \nu^2)}{(r_c t_c)^2} \right]^{1/4}$$

$$\left| \begin{array}{l} \phi_4 = e^{-\mu_c z''} \cos \mu_c z'' \\ \psi_4 = e^{-\mu_c z''} \sin \mu_c z'' \end{array} \right.$$

$$\left| \begin{array}{l} \phi_5 = e^{\mu_c (z'' - z''_1)} \cos (\mu_c (z'' - z''_1)) \\ \psi_5 = e^{\mu_c (z'' - z''_1)} \sin (\mu_c (z'' - z''_1)) \end{array} \right.$$

• Pour $z''=0$ $\varphi'' = \pi/2$

$$\left| \begin{array}{l} -N_3^c \cos \varphi'_1 + Q_2^c \sin \varphi'_1 = H_2 \\ M_3^c = M_2 \end{array} \right.$$

$$\alpha_4 = -\frac{1}{2 \sin \varphi'_1 C_{fc} \mu_c^3} \left(H_2 + \mu_c M_2 + \cos \varphi'_1 \frac{r_a}{\sin \varphi'_1} A \right)$$

$$\beta_4 = -\frac{M_2}{2 C_{fc} \mu_c^2}$$

• Pour $z''=z'_1$ $\varphi'' = \pi/2$

$$\left| \begin{array}{l} Q_2^c = 2 C_{fc} \mu_c^3 (\alpha_5 - \beta_5) = H_3 \\ M_3^c = -2 C_{fc} \mu_c^2 \beta_5 = M_3 \end{array} \right.$$

$$\alpha_5 = \frac{H_3 - \mu_c M_3}{2 C_{fc} \mu_c^3}$$

$$\beta_5 = -\frac{M_3}{2 C_{fc} \mu_c^2}$$

$$\left| \begin{array}{l} N_{z_0}^c = r_a \frac{A}{(1 + \cos \varphi_1) \sin \varphi_1} - \omega_c z'' \\ W_{z_1}^c = 0 \\ W_{z_2}^c = 0 \\ W_{z_3}^c = 0 \\ W_{z_4}^c = 0 \end{array} \right.$$

$$N_{\theta 0}^c = \rho_2 r_c z'' + 2 \mu_c r_c \left[r_a A \phi_4 \right] \frac{1}{(1 + \cos \varphi_1) \operatorname{tg} \varphi_1'}$$

$$N_{\theta 1}^c = 2 \mu_c r_c \phi_4$$

$$N_{\theta 2}^c = 2 \mu_c^2 r_c (\phi_4 - \psi_4)$$

$$N_{\theta 3}^c = -2 \mu_c r_c \phi_5$$

$$N_{\theta 4}^c = 2 \mu_c^2 r_c (\phi_5 + \psi_5)$$

$$M_{z_0}^c = r_a A \psi_4 \frac{1}{(1 + \cos \varphi_1) \operatorname{tg} \varphi_1' \mu_c}$$

$$M_{z_1}^c = \psi_4 / \mu_c$$

$$M_{z_2}^c = \phi_4 + \psi_4$$

$$M_{z_3}^c = \psi_5 / \mu_c$$

$$M_{z_4}^c = \phi_5 - \psi_5$$

$$Q_{z_0}^c = -r_a \left[A (\psi_4 - \phi_4) \right] \frac{1}{(1 + \cos \varphi_1) \operatorname{tg} \varphi_1'}$$

$$Q_{z_1}^c = +\phi_4 - \psi_4$$

$$Q_{z_2}^c = -2 \mu \psi_4$$

$$Q_{z_3}^c = \psi_5 + \phi_5$$

$$Q_{z_4}^c = -2 \mu \psi_5$$

$$E t_c \delta_{r_0}^c = -\gamma r_c \omega_c z'' - \rho_2 r_c^2 z'' + \gamma r_c r_a A \frac{1}{(1 + \cos \varphi_1) \operatorname{tg} \varphi_1'}$$

$$- 2 \mu_c r_c^2 r_a A \phi_4 \frac{1}{(1 + \cos \varphi_1) \operatorname{tg} \varphi_1'}$$

$$E t_c \delta_{r_1}^c = -2 \mu_c r_c^2 \phi_4$$

$$E t_c \delta_{r_2}^c = -2 \mu_c^2 r_c^2 (\phi_4 - \psi_4)$$

$$E_{tc} \delta_{r3}^c = 2 \mu_c r_c^2 \phi_5$$

$$E_{tc} \delta_{r4}^c = -2 \mu_c^2 r_c^2 (\phi_5 + \psi_5)$$

$$E_{tc} \omega_{30}^c = \gamma r_c \omega_c + \rho_l r_c^2$$

$$-2 \mu_c^2 r_c^2 r_a A (\phi_4 + \psi_4) \frac{1}{(1 + \omega \phi_1) \operatorname{tg} \phi_1}$$

$$E_{tc} \omega_{31}^c = -2 \mu_c^2 r_c^2 (\phi_4 + \psi_4)$$

$$E_{tc} \omega_{32}^c = -4 \mu_c^3 r_c^2 \phi_4$$

$$E_{tc} \omega_{33}^c = 2 \mu_c^2 r_c^2 (\psi_5 - \phi_5)$$

$$E_{tc} \omega_{34}^c = 4 \mu_c^3 r_c^2 \phi_5$$

1.4. Calcul des forces d'interaction

Nous considérons les conditions de compatibilité qui résultent du fait qu'aux points de jonction A_1 , A_2 et A_3 que :

- les déplacements radiaux et
- les rotations dans le plan méridien des éléments sont égaux donc :

$$\left| \begin{array}{l} \delta_r^d(z_1) = \delta_r^a(z'=0) \\ \omega_z^d(z_1) = \omega_z^a(z'=0) \\ \delta_r^a(z'_1) = \delta_r^c(z''=0) \\ \omega_z^a(z'_1) = \omega_z^c(z''=0) \\ \delta_r^c(z''_1) = 0 \\ \omega_z^c(z''_1) = 0 \end{array} \right.$$

Ceci aboutit aux relations matricielles suivantes :

$$(1) \quad FL \times B_1 = FO$$

$$(2) \quad RM \times B_2 = RO$$

FO et RO sont les vecteurs de charge et B_1 et B_2 les vecteurs à inconnus H_i , M_i .

$$FL(1,1) = \delta_{r1}^d(\beta_1) - \delta_{r1}^a(\beta'=0)$$

$$FL(1,2) = \delta_{r2}^d(\beta_1) - \delta_{r2}^a(\beta'=0)$$

$$FL(1,3) = -\delta_{r3}^a(\beta'=0)$$

$$FL(1,4) = -\delta_{r4}^a(\beta'=0)$$

$$FL(2,1) = \omega_{\beta_1}^d(\beta_1) - \omega_{\beta}^a(\beta'=0)$$

$$FL(2,2) = \omega_{\beta_2}^d(\beta_1) - \omega_{\beta_2}^a(\beta'=0)$$

$$FL(2,3) = -\omega_{\beta_3}^a(\beta'=0)$$

$$FL(2,4) = -\omega_{\beta_4}^a(\beta'=0)$$

$$FL(3,1) = -\delta_{r1}^a(\beta'_1)$$

$$FL(3,2) = -\delta_{r2}^a(\beta'_1)$$

$$FL(3,3) = \delta_{r3}^c(\beta''=0) - \delta_{r3}^a(\beta'_1)$$

$$FL(3,4) = \delta_{r4}^c(\beta''=0) - \delta_{r4}^a(\beta'_1)$$

$$FL(4,1) = -\omega_{\beta_1}^e(\beta'_1)$$

$$FL(4,2) = -\omega_{\beta_2}^a(\beta'_1)$$

$$FL(4,3) = \omega_{\beta_3}^c(\beta''=0) - \omega_{\beta_3}^a(\beta'_1)$$

$$FL(4,4) = \omega_{\beta_4}^c(\beta''=0) - \omega_{\beta_4}^a(\beta'_1)$$

$$B_1(1) = H_1$$

$$B_1(2) = M_1$$

$$B_1(3) = H_2$$

$$B_1(4) = M_2$$

$$F_0(1) = -\delta_{r_0}^d(\beta_1) + \delta_{r_0}^a(\beta''=0)$$

$$F_0(2) = \omega_{\beta_0}^d(\beta_1) + \omega_{\beta_0}^a(\beta'=0)$$

$$F_0(3) = -\delta_{r_0}^c(0) + \delta_{r_0}^a(\beta'_1)$$

$$F_0(4) = -\omega_{\beta_0}^c(0) + \omega_{\beta_0}^a(\beta'_1)$$

$$RM(1,1) = \delta_{r5}^c (z''_1)$$

$$RM(1,2) = \delta_{r6}^c (z''_1)$$

$$RM(2,1) = \omega_{z5}^c (z''_1)$$

$$RM(2,2) = \omega_{z6}^c (z''_1)$$

$$B_2(1) = H_3$$

$$B_2(2) = M_3$$

$$R_0(1) = -\delta_{r0}^c (z''_1)$$

$$R_0(2) = -\omega_{z0}^c (z''_1)$$

Chapitre 2

Presentation du
Programme

2. Description du fonctionnement du programme

2.1 généralités

Après la lecture et le calcul complémentaire des paramètres géométriques le programme procède au :

- calcul de la matrice de flexibilité $FL(I, J)$
- à la lecture des cas de chargement
- au calcul des vecteurs de charge F_0 et R_0
- à la résolution des systèmes d'Equations $FL \times B_1 = F_0$ et $RM \times B_2 = R_0$ pour déterminer les valeurs $H_1, H_2, H_3, M_1, M_2, M_3$.
- au calcul des contraintes et déplacements de chaque composante de la structure après détermination à chaque niveau des coefficients d'influence α_i, β_i .

Cas de chargement

1. surcharge toiture + réservoir plein (R_c)
2. réservoir plein - pas de surcharge
3. surcharge toiture - réservoir vide
4. Pas de surcharge - réservoir vide

2.2. Systèmes d'unités des paramètres utilisés

Les unités des paramètres utilisés dans le programme sont en système international (S.I.)

Mais il demeure toutefois que ce programme peut s'effectuer en n'importe qu'elles unités homogènes.

2.3 Interprétation des résultats

<u>paramètres de sortie</u>	<u>unités</u>
FI, FP	degré
N_z	kN/m
N_θ	kN/m
M_z	kN.m/m
Q_z	kN/m
$z = z''$	m
det = δr	m
ω_z	radian

2.4. Rôle des sous-routines

- Les sous-routines MATD, MATA, MATC calculent respectivement les coefficients d'influence pour différents niveaux de chaque composante de la structure.

- Les sous-routines FLEX et REAC calculent les coefficients de la matrice de flexibilité $FL(I,J)$ et celle de $RM(I,J)$ qui correspondent aux conditions de compatibilité.

- Les sous-routines VCHAD, VCHAA, VCHAC calculent les coefficients d'influence des charges à différentes valeurs de φ , de φ' et de z'' et les établit sous forme vectorielle.

$VD(I)$ pour le dôme

$VA(I)$ pour l'anneau

$VC(I)$ pour le cylindre

- Les sous-routines charg1 et charg2 déterminent respectivement les vecteurs de charge F_0 et R_0 .

- La sous-routine resol d'inversion de matrices permet de résoudre les équations $FL \times B_1 = F_0$ et $RM \times B_2 = R_0$.

Chapitre 3

Connaissance
du ferrociment.

3.1. Generalités

Le ferro-ciment convient particulièrement aux pays en voie de développement car :

- les produits de base qui le composent se trouvent dans n'importe quel pays.
- façonné de toutes formes, les formes traditionnelles peuvent être reproduites
- technique courante et l'utilisation du matériau ne nécessite pas un long apprentissage, la construction ne nécessite pas d'équipements lourds et est facilement reparable par la main d'œuvre locale.

Les applications potentielles prouvent ce qu'on a énoncé au début car le ferro-ciment est applicable :

- aux constructions d'embarcations indigènes
- à l'entreposage des produits alimentaires
- aux foires à bon marché
- en cas de catastrophe, de créer des abris provisoires, des installations sanitaires.

3.2. Génése et description du matériau

Le béton peut subir de grandes déformations au voisinage d'un renforcement. Si le renforcement est subdivisé en mailles de dimension réduite, le composite a tendance à se comporter comme un matériau homogène dont les caractéristiques structurales sont améliorées par rapport au béton ordinaire. La raison de cette amélioration est que la grandeur des déformations dépend de la répartition et de la subdivision du renforcement dans le composite.

. Plusieurs couches de mailles d'acier bien rattachées entre elles créent une superposition de treillis métallique. Les espaces entre les frontières des mailles sont remplis d'un mortier sable-ciment.

. La rigidité et l'épaisseur requise sont respectées et améliorées si des barres de faible diamètre sont insérées entre les différentes couches de mailles, de même ces barres peuvent être positionnées de façon à participer au travail de la section du matériau.

. Il faut utiliser des diamètres des fils d'acier des mailles assez petites dans le but de saturer uniformément la section de l'élément.

. Les agrégats utilisés doivent avoir un diamètre de 2 mm et ne pas excéder 7 mm.

. La répartition uniforme du renforcement contribue à arrêter la multiplication des fissures et à limiter leur largeur.

. Romualdi et Batson ont montré que la propagation des fissures internes dans le mortier peut être résorbée si le renforcement consiste en mailles de grandeur réduite.

La fissure en augmentant, le déplacement au bout de la fissure s'oppose au renforcement dont le module d'élasticité est plus grand.

L'efficacité de l'arrêt de la propagation des fissures dépend principalement du lien mortier-acier, ce lien étant grandement affecté par les dimensions des mailles de renforcement.

Les données suivantes ne sont pas limitatives d'autres études sur le ferro-ciment aboutissent à des épaisseurs du composite supérieures à 40 mm.

3.3. Données constantes sur le ferro-ciment

renforcement

$0,5 \leq \text{diamètre} \leq 1,5 \text{ mm}$

type acier recuit, tissé, soudé

dimension des mailles $10 \leq \leq 25 \text{ mm}$

nombre de couches de mailles $6 \leq \leq 12$

% volume acier par rapport au

volume du composite $4\% \leq \leq 8\%$

$300 \leq \leq 600 \text{ kg/m}^3$

renforcement intermédiaire

$3 \text{ mm} \leq \text{diamètre} \leq 9 \text{ mm}$

$50 \text{ mm} \leq \text{espace} \leq 100 \text{ mm}$

Mortier

$1 \leq (\text{sable/ciment})_{\text{poids}} \leq 2,5$

$0,4 \leq (\text{eau/ciment})_{\text{poids}} \leq 0,6$

courbe granulométrique régulière

100% passant tamis U.S. N° 8

10% passant tamis U.S. N° 100

Composite

$10 \text{ mm} \leq \text{épaisseur} \leq 40 \text{ mm}$

$1,5 \text{ mm} \leq \text{revêtement de l'acier} \leq 3 \text{ mm}$

3.4. la première fissuration du matériau

l'apparition de la première fissuration est définie comme la charge maximale à laquelle le matériau se comporte élastiquement.

La fissure se développe perpendiculairement à l'axe de tension, se répandant dans la structure avec une ouverture par mètre de 1/100 mm.

La fissure s'opère dans une section du matériau où la contrainte de tension du mortier est nulle et où la charge de tension est entièrement reprise par le renforcement.

N.B.: La largeur des fissures est directement proportionnelle à la surface spécifique de renforcement ou surface latérale d'acier par unité de volume du matériau. Ce terme exprime la surface totale d'acier ayant adhéré au mortier. Cela traduit le fait que le ferrociment est un matériau qui travaille par adhérence pour une distribution plus uniforme des efforts dans la structure.

l'adhérence acier-mortier donne au ferrociment des propriétés physiques et mécaniques améliorées par rapport aux autres matériaux. Le béton est ainsi mieux utilisé.

3.5. Procédés de mise en place

À l'heure actuelle, le problème des coffrages est résolu en ce qui concerne le ferrociment et les coûts de construction sont comparables à ceux des techniques conventionnelles.

La technique du béton soufflé consiste à mélanger à sec le sable et le ciment pur de les souffler dans un boyau à l'aide d'air comprimé. L'eau du mélange est introduite sous pression à l'intérieur du bec situé à l'extrémité du boyau, et le béton est soufflé sur l'armature et le moule. Ce mélange relativement sec produit un béton très peu poreux et d'une haute résistance en compression. Le moule peut être façonné à même le sol.

Le système résille-coque n'utilise pas aussi de coffrage. On utilise des fils d'acier tendus qui forment avec les couches de treillis métallique une structure suspendue classique dont tous les éléments sont en tension. Les fils d'acier en traction sont attachés à leurs extrémités à un cadre extérieur. Après le durcissement du béton coulé sur la résille, la structure voit son état de résille disparaître pour faire place à un état de voûte mince. Le cadre

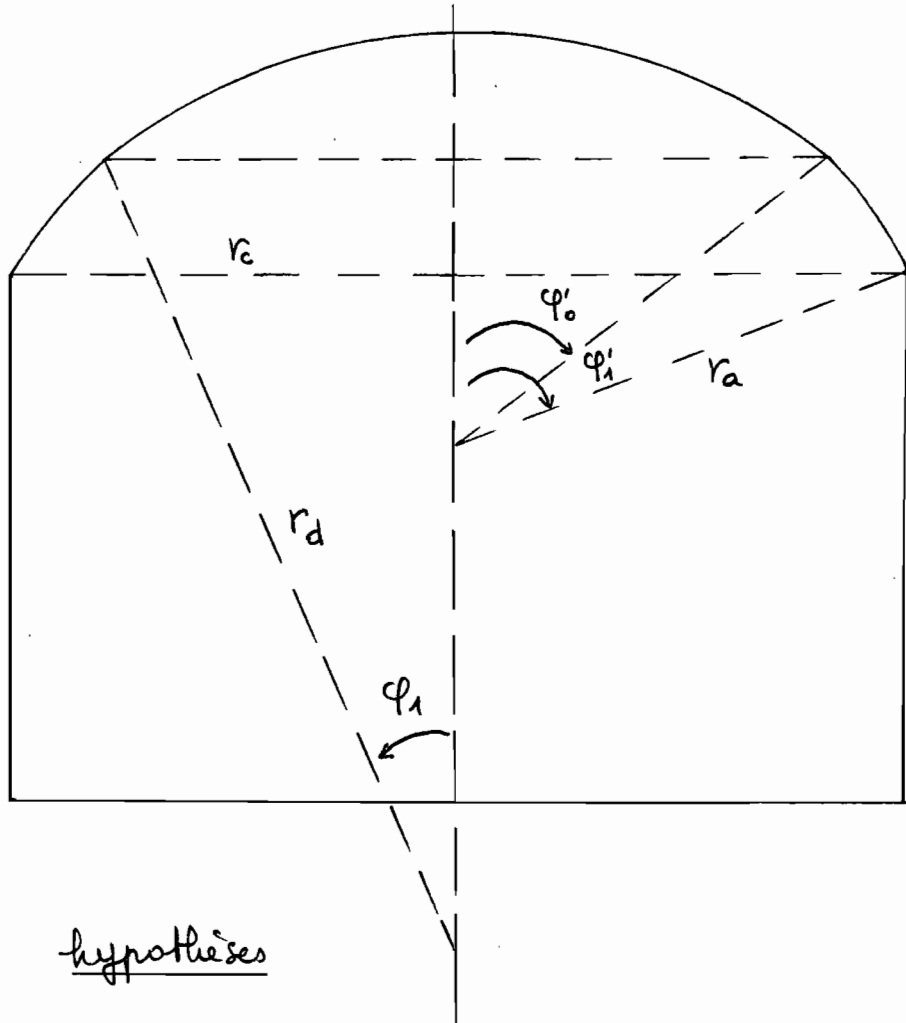
extérieur qui n'a plus de justification structurale peut alors être retiré ou gardé si l'esthétique du voile en bénéficie. Si le cadre est retiré, les fils d'acier initialement en tension sous le poids de la structure sont coupés au ras du bord extérieur du voile qui devient faiblement précontraint pour une période de courte durée.

Le procédé de fabrication du ferro-ciment le plus prometteur est celui de la préfabrication d'éléments en ferro-ciment. Pour faciliter la manutention et l'assemblage sur le chantier, on utilise un béton léger pour préfabriquer les éléments. Les résultats de différents essais ont permis de choisir un mortier de type styropor fabriqué à l'aide de ciment, de sable et de particules de polystyrène expansé. Les particules sont imperméables à l'eau et peuvent constituer 60% du volume du béton. Le poids unitaire de ce mortier peut varier entre 6 et 9 kN/m³, valeur faible comparée au 24 kN/m³ du béton normal.

Chapitre 4

Application de la théorie
des coques et plaques au
ferro-ciment . Design .

4.1. Application pratique



hypothèses

$$r_c = 4 \text{ m}$$

$$h_c = 4 \text{ m}$$

$$\varphi_1 = 30^\circ$$

4.2. Caractéristiques structurales à respecter

On choisit comme renforcement la treillis soudé avec des mailles de dimension $5\text{ cm} \times 5\text{ cm}$ et un diamètre de fil d'acier de $1,6\text{ mm}$.

$$\sigma_{\text{ultime acier}} = 600\text{ MPa}$$

$$V_R = 1,66\%$$

$$S_R = 1,06\text{ in}^2/\text{in}^3 = 0,394\text{ cm}^2/\text{cm}^3$$

V_R étant la fraction de volume de renforcement par rapport à un volume unitaire du composite.

S_R étant la surface latérale de l'acier par rapport à une unité de volume du matériau.

4.2.1. Contrainte à la première fissuration σ_{FC}

La contrainte à la traction à la première fissuration est donnée par :

$$\sigma_{FC} = (140 \times S_R/2) + \sigma_{um}$$

$$f'_c = 25\text{ MPa} \quad \sigma_{um} = 0,6 \sqrt{f'_c} = 3\text{ MPa}$$

$$\sigma_{FC} = 3,5\text{ MPa}$$

Ainsi donc les valeurs de N_z et N_θ doivent vérifier pour le cylindre :

$$N_z, N_\theta \leq 3500\text{ kN/m}^2 \times 0,04\text{ m} = 140\text{ kN/m}$$

et pour l'anneau et le dôme :

$$N_z, N_\theta \leq 3500\text{ kN/m}^2 \times 0,03\text{ m} = 105\text{ kN/m}$$

$$N_z, N_\theta \leq 3500\text{ kN/m}^2 \times 0,015\text{ m} = 52,5\text{ kN/m}$$

4.2.2. Moment à la première fissuration M_{Fc}

Dans l'article Moment capacity and Cracking behaviour of ferrocement in flexure de D. LOGAN et P. Shah :

pour $\frac{S_R}{2} = \frac{1 \text{ in}^2 / \text{in}^3}{2}$ ou a $M_{Fc} = 140 \text{ N-m}$

Les valeurs de M_3 pour le cylindre sont inférieures à $1,8 \text{ kNm/m}$, pour l'anneau et le dôme, elles sont inférieures à $0,4 \text{ kNm/m}$; ce qui correspond à :

$$M_3^c \text{ max} \leq 1,8 \text{ kNm/m} \times 0,04 = 72 \text{ N-m}$$

$$M_3^{a,d} \text{ max} \leq 0,4 \text{ kNm/m} \times 0,03 = 12 \text{ N-m}$$

4.2.3. Largeur de fissuration W_{AV}

Guerra, Naaman et Shah proposent pour les réservoirs une largeur de fissures maximale de $0,04 \text{ mm}$ et $0,2 \text{ mm}$ pour les toitures. Ces largeurs préservant respectivement des fuites de liquide et de la corrosion des armatures. La largeur de fissure doit être respectée en fonction de l'équation suivante :

$$W_{AV} = (\Delta l_{av})_{obs} \left[\frac{\sigma_{RN}}{E_R} - \frac{300}{E_R \phi} (\Delta l_{av})_{obs} - \frac{300 S_L (\Delta l_{av})_{obs}}{4 \times 280 \times 10^5} \right]$$

$(\Delta l_{av})_{obs}$ = espace entre les fissures observé expérimentalement

σ_{RN} = contrainte nominale de l'acier chargé

S_L = surface spécifique dans la direction du chargement = $\frac{S_R}{2}$

4.2.4. Approche et vérification

A partir des hypothèses sur les paramètres géométriques du réservoir et du choix de la variante de ferrociment (caractéristiques du treillis métallique), nous utilisons le programme en 2 étapes. D'abord nous fixons les épaisseurs t_d, t_a, t_c et nous faisons varier les valeurs φ'_0 et φ'_1 dans le but de déterminer les deux raccordements, aux jonctions dôme-anneau, anneau-cylindre, qui impliquent des contraintes minimales dans la structure. Une quinzaine de combinaisons (φ'_0, φ'_1) nous ont permis de retenir à plus ou moins deux degrés près les valeurs suivantes :

$$\varphi'_0 = 75^\circ$$

$$\varphi'_1 = 87,1^\circ$$

La deuxième étape consiste à fixer les deux valeurs angulaires et à faire varier les épaisseurs t_d, t_a, t_c pour déterminer les valeurs minimales de chaque élément de la structure, ceci en comparant les sollicitations engendrées dans la structure avec les valeurs de σ_{fc} et M_{fc} . Sur une dizaine d'essais nous avons retenu les valeurs suivantes :

$$t_d = 1,5 \text{ cm}$$

$$t_a = 3,0 \text{ cm}$$

$$t_c = 4,0 \text{ cm}$$

nous considérons la valeur de t_c comme étant minimale car en tenant compte des résultats des autres essais et si nous diminuons les valeurs de t_d et t_a , les contraintes au niveau du cylindre varient très peu. Par contre, on peut réduire t_a à 2,3 cm et t_d à 1,0 cm simultanément, sinon pour des raisons de réaliser pratiquement le dôme avec 1 cm d'épaisseur, on

peut conserver la valeur de $t_d = 1,5 \text{ cm}$ ou la réduire à $1,25 \text{ cm}$ et prendre $t_a = 2,4 \text{ cm}$. Les efforts engendrés dans la structure devront vérifier dans ces cas :

$$\begin{cases} N_z^d \text{ ou } N_\theta^d \leq 3500 \text{ kN/m}^2 \times 0,01 \text{ m} = 35 \text{ kN/m} \\ N_z^a \text{ ou } N_\theta^a \leq 3500 \text{ kN/m}^2 \times 0,023 \text{ m} = 80,5 \text{ kN/m} \\ N_z^d \text{ ou } N_\theta^d \leq 3500 \text{ kN/m}^2 \times 0,0125 \text{ m} = 43,75 \text{ kN/m} \\ N_z^a \text{ ou } N_\theta^a \leq 3500 \text{ kN/m}^2 \times 0,024 \text{ m} = 84,4 \text{ kN/m} \end{cases}$$

Les limitations dans le temps ne nous ayant pas permis de vérifier les valeurs plus réduites de t_d et t_a , nous tenterons de les faire après la remise du projet pour vérifier nos considérations. Les efforts M_z engendrés sont faibles par rapport à M_{Fc} à l'exception de la sollicitation au bas du cylindre qui vérifie quand même $M_z < M_{Fc}$, donc pas de problème. De même, puisque les valeurs de N_z sont des valeurs de compression dans toute la structure, il n'y a pas l'effet d'addition qu'on constate quand on a une traction et un moment fléchissant, cet effet d'addition étant critique dans ce cas, dans le cas d'une compression et d'un moment, l'effet est même bénéfique car il aide le matériau et que les effets d'addition en compression sont négligés car le matériau se comporte beaucoup mieux en compression.

En ce qui concerne, la largeur des fissures à la première fissuration, les résultats expérimentaux de Shah et Naaman donnent $\sigma_{Fc} = 3,2 \text{ MPa}$ avec :

$$\sigma_{FC} = V_R/2 (\sigma_{RL} - \sigma_{um}) + \sigma_{um} \quad (1)$$

σ_{RL} étant la contrainte de tension de l'acier dans la direction du chargement : (1) $\Rightarrow \sigma_{RL} = 39,5 \text{ MPa}$

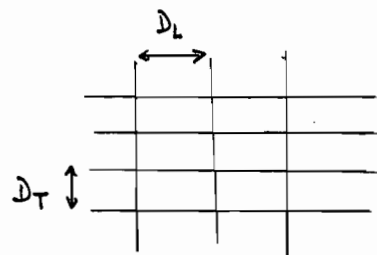
Dans l'équation pour déterminer W_{AV} , la largeur des fissures, on a : $\sigma_{RL}, \sigma_{RN}, (A_{lav})_{obs} = f(\sigma_{RL})$

E_R étant le module d'élasticité apparent dans la direction du chargement. $E_R = 29 \times 10^6 \text{ psi}$ pour les treillis soudés.

La résolution de l'équation donne $W_{AV} = 0$, ce qui signifie une largeur de fissures nulle donc il n'y a pas de fissures comme le montrent les résultats expérimentaux de Naaman et Shah avant qu'on n'atteigne la première fissuration.

Nous allons analyser le cas d'un cylindre en représentant une coupe transversale. Le choix du renforcement porte sur 5 couches de mailles de diamètre 1,6 mm et 2 treillis soudés dont la dimension des mailles est de 10 cm avec 5 mm de diamètre du fil. On considère un revêtement de 2 mm à l'intérieur comme à l'extérieur.

$$S_R = \frac{\pi \phi n}{t} \left(\frac{1}{D_L} + \frac{1}{D_T} \right)$$

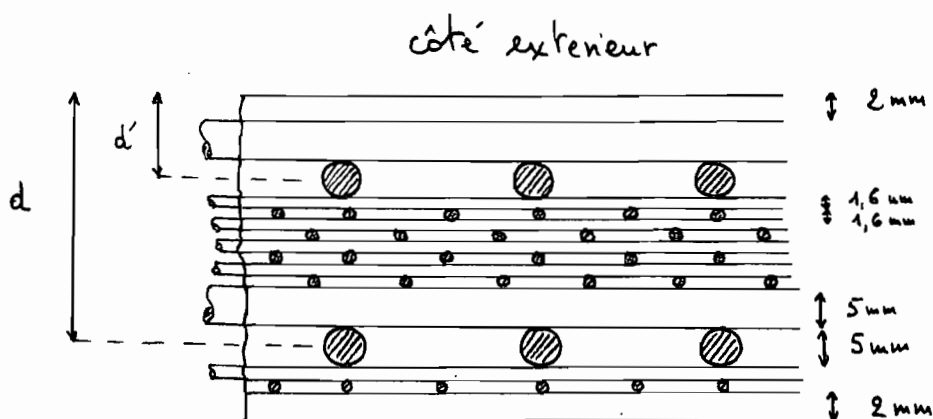


n : nombre de couches

t : épaisseur du composite

ϕ : diamètre du fil

Pour les valeurs considérées, $S_R \approx 1 \text{ in}^2/\text{in}^3$



On observe qu'après chaque composante horizontale du treillis, on a la composante verticale. Le moment critique étant le moment positif au bas du cylindre, donc le bras de levier le plus important doit être celui de l'intérieur.

$$\sigma'_{FC} = \frac{M_{FC} y}{I} \quad (2) \quad \text{avec } y = \frac{t_c}{2}$$

En ne considérant que l'apport du treillis 5 mm au moment et en supposant $c = \frac{t_c}{2}$ on a :

$$I = \frac{b c^3}{3} + n A_s (d-c)^2 + (n-1) A'_s (c-d')^2$$

$$I = 2,93 \times 10^{-6} \text{ m}^4$$

$$(2) \Rightarrow \sigma'_{FC} \approx 1 \text{ MPa}$$

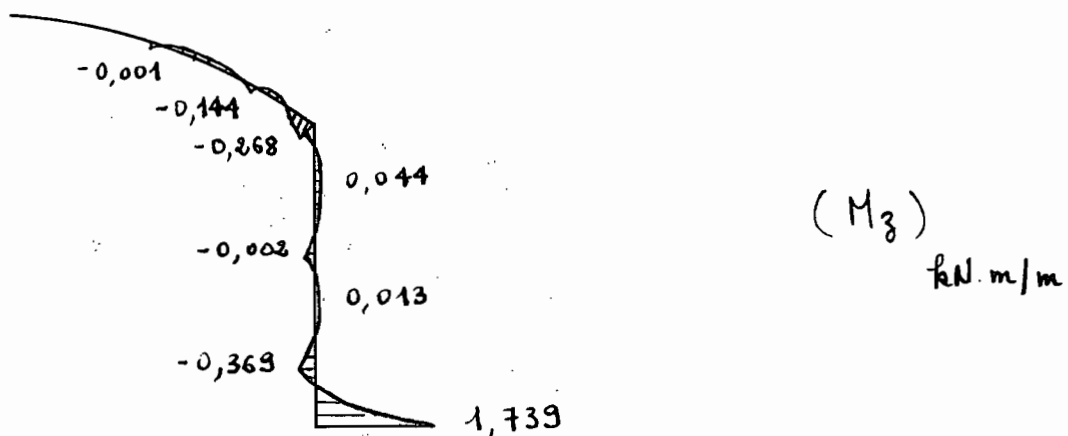
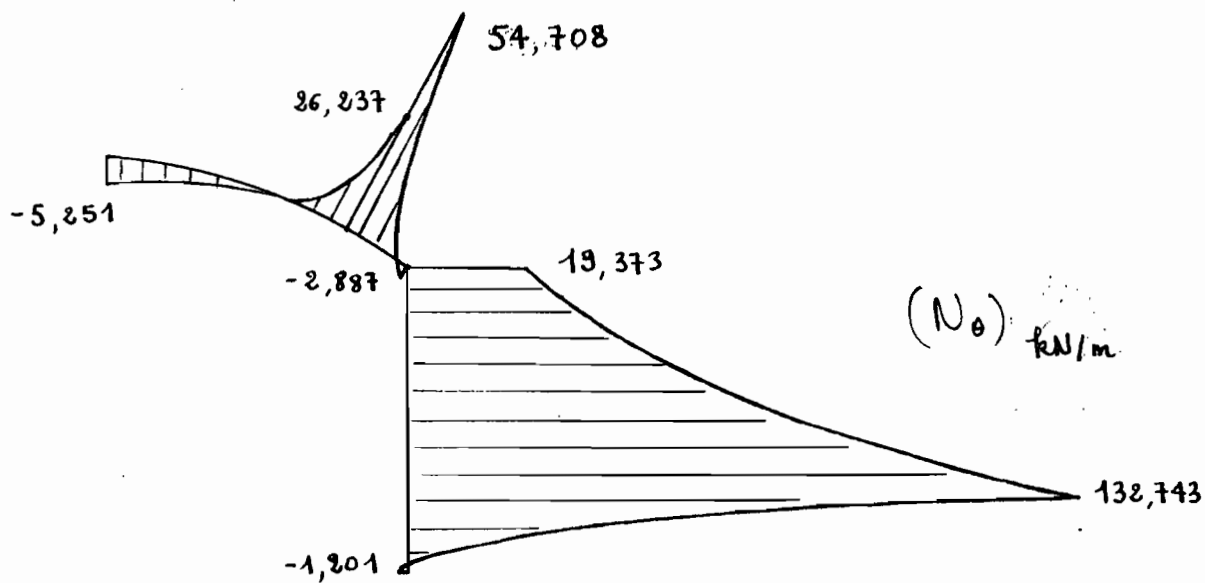
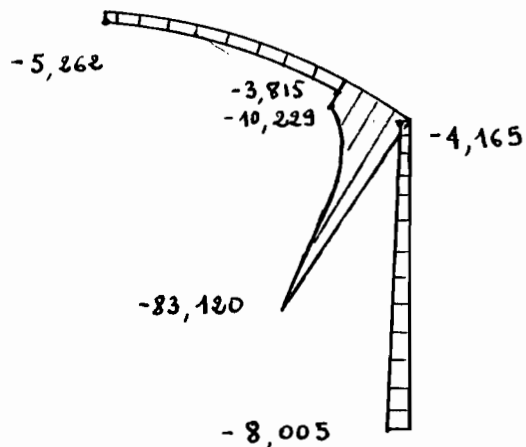
On constate que les considérations de c et y , même si elles ne sont pas correctes sont des valeurs assez proches des valeurs réelles et que l'on est sécuritaire car

$$\sigma'_{FC} < \sigma_{FC}$$

Les hypothèses de petits déplacements de la théorie des coques et plaques sont vérifiées par les valeurs de δ_r et w_3 obtenues.

Représentation graphique des résultats

- . Cas de chargement n° 1
- . échelles séparées



Conclusion

Dans un pays comme le nôtre où règne la sécheresse, le bois est un bien précieux. Pour empêcher que la déforestation ne s'accroisse à cause des constructions de pirogues et des maisons traditionnelles en campagne, une analyse des autres méthodes et matériaux pouvant substituer ce fleau s'impose. Dans ce sens, le projet de fin d'études a accompli un premier pas en montrant les possibilités qu'offre ce matériau. La démarche est à suivre quand à évaluer la rentabilité économique de ce matériau comparé aux méthodes conventionnelles de construction.

Dans l'analyse, nous avons utilisé les charges de service pour mieux visualiser les possibilités du matériau.

Discussion et Recommandations

On peut distinguer deux alternatives à l'avenir, soit de réduire les épaisseurs des éléments de la structure car certaines zones sont faiblement sollicitées et pour les zones qui ne satisfont pas à M_{fc} et σ_{fc} , les renforcer; soit d'établir $t_d = f(\varphi)$, $t_a = f(\varphi')$ et $t_c = f(z'')$ ceci en découpant chaque élément en plusieurs sous-éléments ou bien en faisant appel à la méthode des éléments finis. Dans les deux cas un gain substantiel sera enregistré, on pourra économiser sur le mortier et sur l'acier.

Bibliographie

- ANTOINE E. Naaman
Reinforcing mechanisms in ferro-cement
Massachusetts Institute of Technology
- D. LOGAN et P. Shah
Moment Capacity and Cracking behaviour of
ferrocement in flexure. ACI Journal. Decembre 1973
- R. Walkus - Scientific research worker
Lodz Technical University. Poland
- Emmanuel Gharghoury
Analyse des coques élastiques
Notes de cours de L'E.P.M. Mai 1978
- Luc Lachaux - André Picard
Calcul, propriétés et utilisation du ferrocement
Revue L'ingénieur. Novembre-December 1978
- State of the Art report on ferrocement
Rapport du comité ACI 549
Revue Concrete International. Août 1982.

May 30 10:44 1984 son.f Page 1

```

c-----programme SONIA
c
c           ce programme effectue le calcul structural d'un reservoir
c   par la theorie des coques et plaques, ce reservoir est compose de:
c           -d'un dome spherique
c           -d'un anneau spherique
c           -d'un cylindre
c
c-----definition des parametres
c
c   E       : module d'elasticite
c   POIS    : coef. de poisson
c   RD      : rayon du dome
c   FI1     : angle d'inclinaison max. du dome
c   RA      : rayon de l'anneau
c   FPO     : angle d'inclinaison min. de l'anneau
c   FP1     : angle d'inclinaison max. de l'anneau
c   RC      : rayon du cylindre
c   HC      : hauteur du cylindre
c   TD      : epaisseur du dome
c   TA      : epaisseur de l'anneau
c   TC      : epaisseur du cylindre
c   DENS    : poids specifique du ferrociment
c   PL      : poids specifique du liquide
c   WL      : surcharge du dome et de l'anneau
c   ICCH    : nombre de cas de chargements
c
c-----procedure utilisee dans le programme
c
c           apres la lecture et la determination de tous les
c   parametres geometriques on procede comme ci-dessous :
c           -calcul des matrices de flexibilite FL et RM
c           -determination des forces internes exteriorisees
c             H1, M1, H2, M2, H3, M3
c           -pour chaque element de structure, on calcule les coefficients
c             d'influence suivant differents niveaux pour connaitre les
c             efforts internes et les déplacements correspondants
c           -ces dernieres valeurs vont nous permettre de verifier le
c             choix de la variante du materiau.
c
c-----reserve d'espace
c
c   implicit real*8(a-h,o-z)
c   dimension dm(6,2), am(6,4), amm(4,4), cm(6,4), vd(6), va(6),
c   iva(4), vc(6), f0(4), r0(2), rm(2,2), fl(4,4),
c   2fd(6), fa(6), fc(6), vfg(6), vkg(6,6)
c
c-----lecture des donnees generales
c
c   open(unit=3, file='donnee')
c   open(unit=6, file='resultat', status='new')
c   rewind(3)
c   read(3,503) e, pois, dens, pl, wl, icch
c   print 502, e, pois, dens, pl, wl, icch

```

May 30 10:44 1984 son.f Page 2

```

c
c-----donnees sur le dome
c
      read(3,501) rd,td,fi1,nd
      print 504,rd,td,fi1
c
c-----donnees sur l'anneau
c
      read(3,501) ra,ta
      print 506,ra,ta
c
c-----donnees sur le cylindre
c
      read(3,501) rc,tc,hc,nc
      print 508,rc,tc,hc
c
c-----operations intermediaires
c
      pi=3.14159
      fi1=fi1*pi/180.d0
      fp0=dasin(dsin(fi1)*rd/ra)
      fp1=dasin(rc/ra)
c
c-----calcul des matrices de flexibilite
c
      fi=fi1
      call matd(e,pois,rd,td,fi,fi1,dm)
      z=0.d0
      call matc(e,pois,rc,tc,z,hc,cm)
      fp=fp0
      call mata(e,pois,ra,ta,fp0,fp,fp1,am)
      do 1 i=1,2
      do 1 j=1,4
1 amm(i,j)=am(i+4,j)
      fp=fp1
      call mata(e,pois,ra,ta,fp0,fp,fp1,am)
      do 2 i=3,4
      do 2 j=1,4
2 amm(i,j)=am(i+2,j)
      call flex(fl,dm,amm,cm)
      z=hc
      call matc(e,pois,rc,tc,z,hc,cm)
      call reac(rm,cm)

```

May 30 10:44 1984 son.f Page 3

```

c
c-----introduction des cas de chargement
c
      do 100 i=1,icch
        read(3,501) pl,wl
        print 509,1,pl,wl
        wd=(td*dens)+wl
        wa=(ta*dens)+wl
        wc=tc*dens
c
c-----calcul des vecteurs de charge F0,R0
c
      fi=fi1
      call vchad(e,pois,wd,rd,td,fi,fi1,vd)
      z=0.d0
      call vchac(e,pois,pl,wd,fi1,wa,ra,fp0,fp1,wc,rc,tc,z,vc)
      fp=fp0
      call vchaa(e,pois,wd,fi1,wa,ra,ta,fp0,fp,fp1,va)
      do 3 i=1,2
3     vaa(i)=va(i+4)
      fp=fp1
      call vchaa(e,pois,wd,fi1,wa,ra,ta,fp0,fp,fp1,va)
      do 4 i=3,4
4     vaa(i)=va(i+2)
      call charg1(f0,vd,vaa,vc)
      z=hc
      call vchac(e,pois,pl,wd,fi1,wa,ra,fp0,fp1,wc,rc,tc,z,vc)
      call charg2(r0,vc)
c
c-----resolution des equations 'FL*E=F0' et 'RM*E=R0'
c
      neq=6
      do 10 i=1,6
        vfg(i)=0.d0
        do 10 J=1,6
10     vkg(i,j)=0.d0
        nsym=1
        do 11 i=1,4
          vfg(i)=f0(i)
          do 11 J=1,4
11     vkg(i,j)=f1(i,j)
          do 12 i=1,2
            vfg(i+4)=r0(i)
            do 12 j=1,2
12     vkg(i+4,j+4)=rm(i,j)
          call resol(nsym,neq,vkg,vfg)
          print 511
          print 512,(vfg(i),i=1,5,2)
          print 513,(vfg(i),i=2,6,2)

```

May 30 10:44 1984 son.f Page 4

```
c
c-----calcul des contraintes
c
c
c-----contraintes dans le dome
c
```

```
    print 515
    print 516
    ar=-3.d0
    do 26 k1=1,nd
    ar=ar+3.d0
    fi=ar*pi/180.d0
    call vchad(e,pois,wd,rd,td,fi,fil,vd)
    call matd(e,pois,rd,td,fi,fil,dm)
    do 36 i=1,6
36  fd(i)=0.d0
    do 34 i=1,6
    do 35 j=1,2
35  fd(i)=fd(i)+dm(i,j)*vfg(j)
34  fd(i)=fd(i)+vd(i)
    print 517,ar,(fd(i),i=1,6)
26  continue
```

```
c
c-----contraintes dans l'anneau
c
```

```
    print 518
    print 519
    br=0.d0
    do 46 ll=1,10
    ar=fp0*180.d0/pi+br
    fp=ar*pi/180.d0
    call vchaa(e,pois,wd,fil,wa,ra,ta,fp0,fp,fp1,va)
    call mata(e,pois,ra,ta,fp0,fp,fp1,am)
    do 56 i=1,6
56  fa(i)=0.d0
    do 54 i=1,6
    do 55 j=1,4
55  fa(i)=fa(i)+am(i,j)*vfg(j)
54  fa(i)=fa(i)+va(i)
    print 517,ar,(fa(i),i=1,6)
    br=(fp1-fp0)*180.d0/pi/9.d0+br
46  continue
```

May 30 10:44 1984 son.f Page 5

```
c
c-----contraintes dans le cylindre
c
      print 521
      print 522
      z=-hc/10.d0
      do 66 k3=1,nc
      z=z+hc/10.d0
      call vchac(e,pois,pl,wd,fi1,wa,ra,fp0,fp1,wc,rc,tc,z,vc)
      call matc(e,pois,rc,tc,z,hc,cm)
      do 76 i=1,6
76   fc(i)=0.d0
      do 74 i=1,6
      do 75 j=1,4
75   fc(i)=fc(i)+cm(i,j)*vfg(j+2)
74   fc(i)=fc(i)+vc(i)
      print 517,z,(fc(i),i=1,6)
      66 continue
100  continue
      close(unit=3)
      close(unit=6)
      stop
```

May 30 10:44 1984 son.f Page 6

```

c
c-----format de sortie des donnees et des valeurs de contraintes
c
500 format('1')
501 format(' ',3f10.0,i5)
503 format(' ',5f10.0,i5)
502 format(' ',t10,'module d'elasticite-----',f12.3,/,t10,
1      'coef. de poisson-----',t40,f10.3,/,t10,
2      'poids specifique du mortier',t40,f10.3,/,t10,
3      'poids specifique de l'eau-',t40,f10.3,/,t10,
4      'surcharge de toiture-----',t40,f10.3,/,t10,
5      'cas de chargement -----',i5)
504 format(////',t10,'rayon du dome-----',t40,f10.3,/,t10,
1      'epaisseur du dome-----',t40,f10.3,/,t10,
2      'angle d'inclinaison max.---',t40,f10.3)
506 format(////',t10,'rayon de l'anneau-----',t40,f10.3,/,t10,
1      'epaisseur de l'anneau-----',t40,f10.3)
508 format(////',t10,'rayon du cylindre -----',t40,f10.3,/,t10,
1      'epaisseur du cylindre-----',t40,f10.3,/,t10,
2      'hauteur du cylindre-----',t40,f10.3)
509 format('1',t10,'cas de chargement NO.',i2,5x,'pl=',f7.3,
1      5x,'wl=',f6.3/,',',t8,27('*')//)
511 format(' ',t10,'efforts exteriorises',/,',',t8,24('*')//)
512 format(' ',t10,'H1=',f8.3,5x,'H2=',f8.3,5x,'H3=',f8.3)
513 format(' ',t10,'M1=',f8.3,5x,'M2=',f8.3,5x,'M3=',f8.3)
515 format(/',t10,'contraintes dans le dome',/,',',t8,28('*')//)
516 format(' ',2x,'FI',8x,'NZ',9x,'NT',9x,'MZ',9x,'QZ',9x,'DR',
1 19x,'WZ')
517 format(' ',f5.1,4(x,f10.3),2(x,d10.3))
518 format(/',t10,'contraintes dans l'anneau',/,',',t8,29('*')//)
519 format(' ',2x,'FF',8x,'NZ',9x,'NT',9x,'MZ',9x,'QZ',9x,
1 'DR',9x,'WZ')
521 format(/',t10,'contraintes dans le cylindre',/,t8,32('*')//)
522 format(' ',3x,'Z',8x,'NZ',9x,'NT',9x,'MZ',9x,'QZ',9x,
1 'DR',9x,'WZ')
end
c

```


May 30 10:44 1984 son.f Page 7

```
subroutine matd(e,pois,rd,td,fi,fil,dm)
implicit real*8(a-h,o-z)
dimension dm(6,2)
d1=dcos(fi)
d3=dcos(fil)
d4=dsin(fil)
dz=rd*(d3-d1)
ud=((3.d0*(1.d0-pois**2))/(d4**4*(rd*td)**2))**.25
te1=dexp(ud*dz)*dcos(ud*dz)
cf1=dexp(ud*dz)*dsin(ud*dz)
dm(1,1)=-d3*(te1+cf1)
dm(1,2)=2.d0*ud*d3*cf1
dm(2,1)=-2.d0*ud*rd*d4**2*te1
dm(2,2)=2.d0*ud**2*rd*d4**2*(te1+cf1)
dm(3,1)=cf1/ud
dm(3,2)=te1-cf1
dm(4,1)=d4*(te1+cf1)
dm(4,2)=-2.d0*ud*d4*cf1
dm(5,1)=2.d0*ud*rd**2*d4**3*te1/e/td
dm(5,2)=-2.d0*(ud*rd)**2*d4**3*(te1+cf1)/e/td
dm(6,1)=-2.d0*(ud*rd)**2*d4**3*(te1-cf1)/e/td
dm(6,2)=4.d0*ud**3*rd**2*d4**3*te1/e/td
return
end
```

c

May 30 10:44 1984 son.f Page 8

```

subroutine mata(e,pois,ra,ta,fp0,fp,fp1,am)
implicit real*8(a-h,o-z)
dimension am(6,4)
a1=dcos(fp)
a2=dsin(fp)
a3=dcos(fp0)
a4=dsin(fp0)
a5=dsin(fp1)
a6=dcos(2.d0*fp0)
az0=ra*(a3-a1)
az1=-ra*a1
ua=((3.d0*(1.d0-pois**2))/(a2**4*(ra*ta)**2))**.25
ua0=((3.d0*(1.d0-pois**2))/(a4**4*(ra*ta)**2))**.25
ua1=((3.d0*(1.d0-pois**2))/(a5**4*(ra*ta)**2))**.25
te2=dexp(-ua0*az0)*dcos(ua0*az0)
cf2=dexp(-ua0*az0)*dsin(ua0*az0)
te3=dexp(ua1*az1)*dcos(ua1*az1)
cf3=dexp(ua1*az1)*dsin(ua1*az1)
am(1,1)=-a4*(te2-cf2)/dtan(fp)/a6
am(1,2)=-2.d0*ua0*a4*cf2/dtan(fp)
am(1,3)=-((te3+cf3)*a5/dtan(fp)
am(1,4)=2.d0*ua1*a5*cf3/dtan(fp)
am(2,1)=-2.d0*ua0*ra*a4**2*te2/a6
am(2,2)=2.d0*ua0**2*ra*a4**2*(te2-cf2)
am(2,3)=-2.d0*ua1*ra*te3*a5**2
am(2,4)=2.d0*ua1**2*ra*(te3+cf3)*a5**2
am(3,1)=-cf2/ua0/a6
am(3,2)=te2+cf2
am(3,3)=cf3/ua1
am(3,4)=te3-cf3
am(4,1)=-a4*(te2-cf2)/a6
am(4,2)=-2.d0*ua0*a4*cf2
am(4,3)=(te3+cf3)*a5
am(4,4)=-2.d0*ua1*cf3*a5
am(5,1)=2.d0*ua0*ra**2*a2*a4**2*te2/a6/e/ta
am(5,2)=-2.d0*ua0**2*ra**2*a2*a4**2*(te2-cf2)/e/ta
am(5,3)=2.d0*ua1*ra**2*a2*te3*a5**2/e/ta
am(5,4)=-2.d0*ua1**2*ra**2*a2*(te3+cf3)*a5**2/e/ta
am(6,1)=2.d0*ua0*ua*ra**2*a2*a4**2*(te2+cf2)/a6/e/ta
am(6,2)=-4.d0*ua0**2*ua*ra**2*a2*a4**2*te2/e/ta
am(6,3)=2.d0*ua1*ua*ra**2*a2*(cf3-te3)*a5**2/e/ta
am(6,4)=4.d0*ua1**2*ua*ra**2*a2*te3*a5**2/e/ta
return
end

```

May 30 10:44 1984 son.f Page 9

```

subroutine matc(e,pois,rc,tc,z,hc,cm)
implicit real*8(a-h,o-z)
dimension cm(6,4)
uc=((3.d0*(1.d0-pois**2))/(rc*tc)**2)**.25
te4=dexp(-uc*z)*dcos(uc*z)
cf4=dexp(-uc*z)*dsin(uc*z)
te5=dexp(uc*(z-hc))*dcos(uc*(z-hc))
cf5=dexp(uc*(z-hc))*dsin(uc*(z-hc))
do 11 i=1
do 11 j=1,4
11 cm(i,j)=0.d0
cm(2,1)=2.d0*uc*rc*te4
cm(2,2)=2.d0*uc**2*rc*(te4-cf4)
cm(2,3)=-2.d0*uc*rc*te5
cm(2,4)=2.d0*uc**2*rc*(te5+cf5)
cm(3,1)=cf4/uc
cm(3,2)=te4+cf4
cm(3,3)=cf5/uc
cm(3,4)=te5-cf5
cm(4,1)=te4-cf4
cm(4,2)=-2.d0*uc*cf4
cm(4,3)=te5+cf5
cm(4,4)=-2.d0*uc*cf5
cm(5,1)=-2.d0*uc*rc**2*te4/e/tc
cm(5,2)=-2.d0*uc**2*rc**2*(te4-cf4)/e/tc
cm(5,3)=2.d0*uc*rc**2*te5/e/tc
cm(5,4)=-2.d0*uc**2*rc**2*(te5+cf5)/e/tc
cm(6,1)=-2.d0*uc**2*rc**2*(te4+cf4)/e/tc
cm(6,2)=-4.d0*uc**3*rc**2*te4/e/tc
cm(6,3)=2.d0*uc**2*rc**2*(cf5-te5)/e/tc
cm(6,4)=4.d0*uc**3*rc**2*te5/e/tc
return
end

```

c

May 30 10:44 1984 son.f Page 10

```

subroutine vchad(e,pois,wd,rd,td,fi,fi1,vd)
implicit real*8(a-h,o-z)
dimension vd(6)
d1=dcos(fi)
d2=dsin(fi)
d3=dcos(fi1)
d4=dsin(fi1)
dd1=1.d0/(1.d0+d1)
dd2=1.d0/(1.d0+d3)
du1=d2*(d1-((1.d0+pois)*dd1))
ud=((3.d0*(1.d0-pois**2))/(d4**4*(rd*td)**2))**.25
du2=2.d0*(ud*rd)**2*d3*dd2*d4**3
az=rd*(d3-d1)
tel=dexp(ud*az)*dcos(ud*az)
cf1=dexp(ud*az)*dsin(ud*az)
vd(1)=(-dd1+(d3**2*dd2*(tel+cf1)))*rd*wd
vd(2)=(-d1+dd1+2.d0*ud*rd*d4**2*d3*dd1*tel)*rd*wd
vd(3)=-d3*dd2*cf1*rd*wd/ud
vd(4)=-d4*d3*dd2*(tel+cf1)*rd*wd
vd(5)=(du1-2.d0*ud*rd*d3*d4**3*dd2*tel)*rd**2*wd/e/td
vd(6)=((2.d0+pois)*d2+du2*(tel+cf1))*rd*wd/e/td
return
end

```

c

May 30 10:44 1984 son.f Page 11

```

subroutine vchaa(e,pois,wd,fi1,wa,ra,ta,fp0,fp,fp1,va)
implicit real*8(a-h,o-z)
dimension va(6)
a1=dcos(fp)
a2=dsin(fp)
a3=dcos(fp0)
a4=dsin(fp0)
a5=dtan(fp)
a6=dcos(fp1)
a7=dsin(fp1)
az0=ra*(a3-a1)
az1=ra*(a6-a1)
aa1=(wa*(a1-a3)*(1.d0+dcos(fi1))-wd*a4**2)/a7**2
aa2=(1.d0+dcos(fi1))
aa3=wa*(a6-a3)*(1.d0+dcos(fi1))-wd*a4**2
ua=((3.d0*(1.d0-pois**2))/(a2**4*(ra*ta)**2))**.25
ua0=((3.d0*(1.d0-pois**2))/(a4**2*(ra*ta)**2))**.25
ua1=((3.d0*(1.d0-pois**2))/(dcos(fp1)**2*(ra*ta)**2))**.25
te2=dexp(-ua0*az0)*dcos(ua0*az0)
cf2=dexp(-ua0*az0)*dsin(ua0*az0)
te3=dexp(ua1*az1)*dcos(ua1*az1)
cf3=dexp(ua1*az1)*dsin(ua1*az1)
aa4=dtan(2.d0*fp0)*wd
aa5=-ua0*a4*aa4
aa6=ua1*a6*aa3
va(1)=-ra*(-aa4*(te2-cf2)/2.d0+aa3*(te3+cf3)/a5-aa1*a5)/aa2
va(2)=(-ra**2*(aa5*te2+aa6*te3/2.d0)-2.d0*ra*(wa*a1*aa2+aa1))/aa2
va(3)=ra*(a3*wd*cf2/ua0/dcos(2.d0+fp0)+a6*aa3*cf3/ua/a7**2)/aa2
va(4)=ra*(-aa4*(cf2-te2)/2.d0+aa3*(cf3+te3)/a5)/aa2
va(5)=a2*ra**2*(ra*(aa5*te2+2.d0*aa6*te3)+(wa*aa2*a1+(1.d0+pois)
1*aa1))/aa2/e/ta
va(6)=((2.d0+pois)*ra*wa*a2+ua*a2*ra**3*(aa5*(cf2+te2)+2.d0*aa6
1*(cf3-te3)))/e/ta
return
end

```

May 30 10:44 1984 son.f Page 12

```

subroutine vchac(e,pois,pl,wd,fil,wa,ra,fp0,fp1,wc,rc,tc,z,vc)
implicit real*8(a-h,o-z)
dimension vc(6)
c1=dcos(fp0)
c2=dsin(fp0)
c3=dcos(fp1)
c4=dsin(fp1)
uc=((3.d0*(1.d0-pois**2))/(rc*tc)**2)**.25
cc1=1.d0/(1.d0+dcos(fil))
cc2=(wa*(c3-c1)-c2**2*wd*cc1)*ra/c4
vc(1)=cc2-wc*z
vc(2)=pl*rc*z+2.d0*uc*rc*cc2*c3*te4
vc(3)=cc2*c3*cf4/uc
vc(4)=-cc2*(cf4-te4)*c3
vc(5)=(-pois*wc*rc*z-pl*rc**2*z+pois*rc*cc2-2.d0*uc*rc**2*c3*cc2
1*te4)/e/tc
vc(6)=(pois*rc*wc+pl*rc**2-2.d0*uc**2*rc**2*cc2*c3*(te4+cf4))/e/tc
return
end

```

May 30 10:44 1984 son.f Page 13

```
subroutine flex(fl, dm, amm, cm)
implicit real*8(a-h, o-z)
dimension fl(4,4), dm(6,2), amm(4,4), cm(6,4)
fl(1,1)=dm(5,1)-amm(1,1)
fl(1,2)=dm(5,2)-amm(1,2)
fl(1,3)=-amm(1,3)
fl(1,4)=-amm(1,4)
fl(2,1)=dm(6,1)-amm(2,1)
fl(2,2)=dm(6,2)-amm(2,2)
fl(2,3)=-amm(2,3)
fl(2,4)=-amm(2,4)
fl(3,1)=-amm(3,1)
fl(3,2)=-amm(3,2)
fl(3,3)=cm(5,1)-amm(3,3)
fl(3,4)=cm(5,2)-amm(3,4)
fl(4,1)=-amm(4,1)
fl(4,2)=-amm(4,2)
fl(4,3)=cm(6,1)-amm(4,3)
fl(4,4)=cm(6,2)-amm(4,4)
return
end
```

c

May 30 10:44 1984 son.f Page 14

```
subroutine reac(rm,cm)
implicit real*8(a-h,o-z)
dimension rm(2,2),cm(6,4)
rm(1,1)=cm(5,3)
rm(1,2)=cm(5,4)
rm(2,1)=cm(6,3)
rm(2,2)=cm(6,4)
return
end
```

c

May 30 10:44 1984 son.f Page 15

```
subroutine charg1(f0,vd,vaa,vc)
implicit real*8(a-h,o-z)
dimension f0(4),vd(6),vaa(4),vc(6)
f0(1)=-vd(5)+vaa(1)
f0(2)=-vd(6)+vaa(2)
f0(3)=-vc(5)+vaa(3)
f0(4)=-vc(6)+vaa(4)
return
end
```

c

May 30 10:44 1984 son.f Page 16

```
subroutine charg2(r0,vc)
implicit real*8(a-h,o-z)
dimension r0(2),vc(6)
r0(1)=-vc(5)
r0(2)=-vc(6)
return
end
```

c

May 30 10:44 1984 son.f Page 17

```

      subroutine resol(nsym,neq,vkg,vfg)
c-----
c      resolution d'un systeme d'equations non symetrique par la
c      methode de gauss
c      entrees
c      nsym      eq.1 systeme non symetrique
c      neq      nombre d'equations (.ge.2)
c      vkg      matrice k stockee dans une table a 2 dimensions
c      vfg      second membre
c      sortie
c      vfg      solution
c-----
      implicit real*8(a-h,o-z)
      dimension vkg(neq,neq),vfg(neq)
c-----
      triangulation
      data zero/0.d0/
      n1=neq-1
      do 50 is=1,n1
      piv=vkg(is,is)
      if(piv) 20,10,20
10      print 2000, is
      stop
20      is1=is+1
      do 50 ii=is1,neq
      cl=vkg(ii,is)/piv
      if(cl.eq.zero) go to 50
      vfg(ii)=vfg(ii)-cl*vfg(is)
      if(nsym.ne.1) go to 32
      do 30 ij=is1,neq
30      vkg(ii,ij)=vkg(ii,ij)-cl*vkg(is,ij)
      go to 50
32      do 40 ij=ii,neq
      vkg(ii,ij)=vkg(ii,ij)-cl*vkg(is,ij)
40      vkg(ij,ii)=vkg(ii,ij)
50      continue
c-----
      resolution du systeme triangulaire
      vfg(neq)=vfg(neq)/vkg(neq,neq)
      do 70 ii=1,n1
      is1=is1-1
      cl=zero
      ij1=is1+1
      do 60 ij=ij1,neq
60      cl=cl+vkg(is1,ij)*vfg(ij)
70      vfg(is1)=(vfg(is1)-cl)/vkg(is1,is1)
2000      format(' PIVOT NUL,EQUATION',i5)
      return
      end

```

Jun 4 17:41 1984 resultat Page 1

module d'elasticite-----	20000000.000
coef. de poisson-----	.150
poids specifique du mortier	24.000
poids specifique de l'eau-	10.000
surcharge de toiture-----	1.000
cas de chargement -----	4

rayon du dome-----	7.738
epaisseur du dome-----	.015
angle d'inclinaison max.--	30.000

rayon de l'anneau-----	4.005
epaisseur de l'anneau-----	.030

rayon du cylindre -----	4.000
epaisseur du cylindre-----	.040
hauteur du cylindre-----	4.000

cas de chargement NO. 1 pl= 10.000 wl= 1.000

efforts exteriorises

H1= 2.777 H2= 1.462 H3= 11.850
 M1= -.144 M2= -.221 M3= 1.739

contraintes dans le dome

FI	NZ	NT	MZ	QZ	DR	WZ
.0	-5.262	-5.251	.000	.000	-.132e-06	-.779e-05
3.0	-5.265	-5.232	.000	.000	.586e-05	-.456e-05
6.0	-5.276	-5.172	.000	.000	.116e-04	-.276e-05
9.0	-5.294	-5.072	.000	.000	.170e-04	-.159e-05
12.0	-5.318	-4.933	.000	-.001	.217e-04	.459e-05
15.0	-5.349	-4.786	.000	-.003	.262e-04	.388e-04
18.0	-5.390	-4.763	-.001	-.002	.321e-04	.158e-03
21.0	-5.465	-5.122	.000	.013	.433e-04	.343e-03
24.0	-5.601	-4.977	.011	.058	.483e-04	-.368e-03
27.0	-5.509	4.158	.027	-.033	-.684e-04	-.506e-02
30.0	-3.815	26.237	-.144	-1.054	-.349e-03	-.281e-03

contraintes dans l'anneau

FP	NZ	NT	MZ	QZ	DR	WZ
75.0	-10.229	54.708	-.133	2.277	-.349e-03	-.281e-03
76.4	-11.891	42.140	.035	1.187	-.268e-03	-.420e-03
77.7	-13.920	30.198	.110	.404	-.190e-03	-.379e-03
79.1	-16.469	21.166	.122	-.115	-.129e-03	-.263e-03
80.4	-19.763	15.517	.093	-.445	-.909e-04	-.148e-03
81.8	-24.160	12.525	.038	-.660	-.697e-04	-.898e-04
83.1	-30.293	10.630	-.034	-.806	-.552e-04	-.148e-03
84.4	-39.436	7.537	-.115	-.862	-.269e-04	-.372e-03
85.8	-54.432	1.762	-.187	-.778	.802e-05	-.380e-03
87.1	-83.120	-2.887	-.268	-.793	-.100e-03	.193e-03

contraintes dans le cylindre

Z	NZ	NT	MZ	QZ	DR	WZ
.0	-4.165	19.373	-.221	1.462	-.100e-03	.193e-03
.4	-4.549	22.289	.044	.098	-.115e-03	.368e-04
.8	-4.933	31.472	.022	-.093	-.161e-03	.178e-03
1.2	-5.317	47.478	.000	-.021	-.241e-03	.209e-03
1.6	-5.701	63.906	-.002	.004	-.324e-03	.202e-03
2.0	-6.085	79.754	.002	.018	-.403e-03	.198e-03
2.4	-6.469	96.267	.013	.034	-.486e-03	.223e-03
2.8	-6.853	116.325	.002	-.159	-.587e-03	.274e-03
3.2	-7.237	132.743	-.179	-.766	-.669e-03	.280e-04
3.6	-7.621	93.845	-.369	.708	-.475e-03	-.114e-02
4.0	-8.005	-1.201	1.739	11.850	-.272e-09	-.659e-09

cas de chargement NO. 2 pl= 10.000 wl= .000

efforts exteriorises

H1= .739 H2= .410 H3= 11.817
 M1= -.038 M2= -.043 M3= 1.734

contraintes dans le dome

FI	NZ	NT	MZ	QZ	DR	WZ
.0	-1.393	-1.390	.000	.000	-.348e-07	-.206e-05
3.0	-1.394	-1.385	.000	.000	.155e-05	-.121e-05
6.0	-1.397	-1.369	.000	.000	.308e-05	-.736e-06
9.0	-1.401	-1.343	.000	.000	.449e-05	-.428e-06
12.0	-1.408	-1.306	.000	.000	.576e-05	.121e-05
15.0	-1.416	-1.267	.000	-.001	.693e-05	.103e-04
18.0	-1.427	-1.261	.000	-.001	.849e-05	.419e-04
21.0	-1.447	-1.355	.000	.003	.114e-04	.909e-04
24.0	-1.482	-1.315	.003	.015	.127e-04	-.976e-04
27.0	-1.458	1.089	.007	-.009	-.180e-04	-.134e-02
30.0	-1.013	6.885	-.038	-.277	-.917e-04	-.756e-04

contraintes dans l'anneau

FP	NZ	NT	MZ	QZ	DR	WZ
75.0	-2.706	14.087	-.035	.605	-.917e-04	-.756e-04
76.4	-3.247	10.785	.009	.314	-.700e-04	-.113e-03
77.7	-3.907	7.647	.029	.105	-.491e-04	-.102e-03
79.1	-4.737	5.275	.032	-.031	-.330e-04	-.717e-04
80.4	-5.809	3.792	.024	-.116	-.226e-04	-.418e-04
81.8	-7.239	3.006	.010	-.168	-.167e-04	-.266e-04
83.1	-9.234	2.514	-.008	-.200	-.126e-04	-.417e-04
84.4	-12.208	1.721	-.028	-.205	-.469e-05	-.999e-04
85.8	-17.086	.325	-.044	-.171	.368e-05	-.770e-04
87.1	-26.422	-.261	-.062	-.182	-.364e-04	.145e-03

contraintes dans le cylindre

Z	NZ	NT	MZ	QZ	DR	WZ
.0	-1.324	7.079	-.043	.410	-.364e-04	.145e-03
.4	-1.708	17.449	.019	-.005	-.885e-04	.151e-03
.8	-2.092	31.692	.006	-.031	-.160e-03	.198e-03
1.2	-2.476	47.862	-.001	-.005	-.241e-03	.204e-03
1.6	-2.860	63.944	-.001	.002	-.322e-03	.199e-03
2.0	-3.244	79.732	.002	.017	-.401e-03	.198e-03
2.4	-3.628	96.260	.013	.034	-.484e-03	.223e-03
2.8	-4.012	116.313	.002	-.159	-.585e-03	.274e-03
3.2	-4.396	132.732	-.178	-.764	-.667e-03	.285e-04
3.6	-4.780	93.987	-.369	.705	-.474e-03	-.113e-02
4.0	-5.164	-.775	1.734	11.817	-.825e-10	-.282e-09

cas de chargement NO. 3 pl= .000 wl= 1.000

efforts exteriorises

H1= 2.777 H2= 1.546 H3= .090
 M1= -.144 M2= -.261 M3= .014

contraintes dans le dome

FI	NZ	NT	MZ	QZ	DR	WZ
.0	-5.262	-5.251	.000	.000	-.132e-06	-.779e-05
3.0	-5.265	-5.232	.000	.000	.586e-05	-.456e-05
6.0	-5.276	-5.172	.000	.000	.116e-04	-.276e-05
9.0	-5.294	-5.072	.000	.000	.170e-04	-.159e-05
12.0	-5.318	-4.933	.000	-.001	.217e-04	.460e-05
15.0	-5.349	-4.786	.000	-.003	.262e-04	.388e-04
18.0	-5.390	-4.762	-.001	-.002	.321e-04	.158e-03
21.0	-5.465	-5.122	.000	.013	.433e-04	.343e-03
24.0	-5.601	-4.979	.011	.058	.483e-04	-.369e-03
27.0	-5.509	4.154	.027	-.032	-.683e-04	-.506e-02
30.0	-3.815	26.261	-.144	-1.054	-.350e-03	-.276e-03

contraintes dans l'anneau

FP	NZ	NT	MZ	QZ	DR	WZ
75.0	-10.230	54.756	-.131	2.282	-.350e-03	-.276e-03
76.4	-11.891	42.274	.037	1.190	-.269e-03	-.412e-03
77.7	-13.920	30.469	.112	.402	-.191e-03	-.367e-03
79.1	-16.467	21.625	.123	-.126	-.132e-03	-.248e-03
80.4	-19.759	16.200	.093	-.469	-.954e-04	-.131e-03
81.8	-24.153	13.421	.035	-.702	-.756e-04	-.767e-04
83.1	-30.285	11.644	-.042	-.871	-.619e-04	-.146e-03
84.4	-39.427	8.427	-.130	-.950	-.328e-04	-.394e-03
85.8	-54.424	2.081	-.211	-.881	.590e-05	-.443e-03
87.1	-83.115	-3.845	-.302	-.890	-.936e-04	.707e-04

contraintes dans le cylindre

Z	NZ	NT	MZ	QZ	DR	WZ
.0	-4.165	18.097	-.261	1.546	-.936e-04	.707e-04
.4	-4.549	7.107	.037	.151	-.389e-04	-.167e-03
.8	-4.933	-.326	.024	-.092	-.207e-05	-.279e-04
1.2	-5.317	-.564	.001	-.024	-.117e-05	.897e-05
1.6	-5.701	-.056	-.002	.003	-.400e-05	.395e-05
2.0	-6.085	.031	.000	.002	-.472e-05	.557e-06
2.4	-6.469	.011	.000	.000	-.491e-05	.639e-06
2.8	-6.853	.032	.000	-.001	-.530e-05	.124e-05
3.2	-7.237	.033	-.001	-.006	-.559e-05	-.629e-06
3.6	-7.621	-.386	-.003	.006	-.379e-05	-.939e-05
4.0	-8.005	-1.201	.014	.090	-.278e-09	-.556e-09

cas de chargement NO. 4 pl= .000 wl= .000

efforts exteriorises

H1= .739 H2= .494 H3= .058
M1= -.038 M2= -.083 M3= .009

contraintes dans le dome

FI	NZ	NT	MZ	QZ	DR	WZ
.0	-1.393	-1.390	.000	.000	-.347e-07	-.206e-05
3.0	-1.394	-1.385	.000	.000	.155e-05	-.121e-05
6.0	-1.397	-1.369	.000	.000	.308e-05	-.736e-06
9.0	-1.401	-1.343	.000	.000	.449e-05	-.426e-06
12.0	-1.408	-1.306	.000	.000	.576e-05	.121e-05
15.0	-1.416	-1.267	.000	-.001	.693e-05	.103e-04
18.0	-1.427	-1.260	.000	-.001	.848e-05	.419e-04
21.0	-1.447	-1.355	.000	.003	.114e-04	.908e-04
24.0	-1.482	-1.317	.003	.015	.128e-04	-.979e-04
27.0	-1.458	1.084	.007	-.008	-.179e-04	-.134e-02
30.0	-1.013	6.909	-.038	-.277	-.920e-04	-.710e-04

contraintes dans l'anneau

FP	NZ	NT	MZ	QZ	DR	WZ
75.0	-2.707	14.135	-.034	.609	-.920e-04	-.710e-04
76.4	-3.247	10.919	.011	.316	-.709e-04	-.105e-03
77.7	-3.907	7.918	.031	.103	-.509e-04	-.901e-04
79.1	-4.735	5.735	.033	-.042	-.360e-04	-.565e-04
80.4	-5.805	4.475	.024	-.140	-.271e-04	-.253e-04
81.8	-7.233	3.903	.007	-.210	-.227e-04	-.134e-04
83.1	-9.226	3.528	-.016	-.265	-.194e-04	-.399e-04
84.4	-12.199	2.610	-.043	-.293	-.106e-04	-.122e-03
85.8	-17.078	.644	-.068	-.274	.156e-05	-.139e-03
87.1	-26.417	-1.218	-.097	-.280	-.300e-04	.224e-04

contraintes dans le cylindre

Z	NZ	NT	MZ	QZ	DR	WZ
.0	-1.324	5.803	-.083	.494	-.300e-04	.224e-04
.4	-1.708	2.267	.012	.048	-.126e-04	-.530e-04
.8	-2.092	-.106	.008	-.029	-.104e-05	-.838e-05
1.2	-2.476	-.180	.000	-.008	-.955e-06	.336e-05
1.6	-2.860	-.018	-.001	.001	-.206e-05	.175e-05
2.0	-3.244	.009	.000	.001	-.248e-05	.662e-06
2.4	-3.628	.004	.000	.000	-.274e-05	.750e-06
2.8	-4.012	.021	.000	-.001	-.311e-05	.107e-05
3.2	-4.396	.022	-.001	-.004	-.341e-05	-.130e-06
3.6	-4.780	-.245	-.002	.004	-.236e-05	-.575e-05
4.0	-5.164	-.775	.009	.058	-.889e-10	-.179e-09