ECOLE POLYTECHNIQUE de THIES

PROJET

de

FIN D'ETUDES

Titre : RESERVOIRS en Ferrociment

Auteur : MAKHAN SYLLA

Directeur de Projet : M. Moustapha NDIAYE

Année : 1984 - 1985

Je dédie ce mémoire à :

- ma mère
- mon grand père qui a eu à m'assister jusqu'aux dernières heures de sa vie
- ma famille
- NDIAYE . S. CISSOKO
- tous mes amis

REMERCIEMENTS

Je remercie Mr. MOUSTAPHA NDIAYE qui a su à m'encadrer pour ce projet.
Et, je profite de cette occasion, pour adresser les mêmes mots, à tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à ma formation.

SOMMAIRE

En raison de la nature du projet, il s'est avéré nécessaire d'opérer à la connaissance du Ferrociment, sur lequel le choix du matériau a été porté, avant de procéder à l'étude de la base théorique du comportement des coques minces, qui, pour une meilleure compréhension, a nécessité une révision approfondie des cours d'Algèbre linéaire et d'Analyse vectorielle.
En outre, un apprentissage au FORTRAN 77, a été fait pour les besoins de l'Analyse où les expressions furent assez complexes.
C'est, donc, dans cet esprit que l'essentiel du travail a été fait, dans ce rapport dont, le corps est divisé en quatre parties principales, comme indiqué sur la table des matières.

TABLE des MATIERES

Chapitre 1 : Le Ferrociment et ses propriétés

Chapitre 2 : Analyse

3.

Table des Matières (suite)

DEFINITION des DIFFERENTS paramètres

Désignation	Notation		Unités
	Texte	Programme	
• Module d'élasticité du matériau	E	e	kN/m²
• Coefficient de Poisson	ν	pois	
• Poids spécifique du liquide	γ ou γ_L	l	kN/m³
• Poids spécifique du matériau	γ_m	ds	kN/m³
• Variation de température	ΔT	t	°C
• Coefficient de dilatation thermique du matériau	θ	te	
• Surcharge sur le dome et l'anneau	w_l	wl	kN/m²
• Charge sur le dome	w_d	wd	"
• Charge sur l'anneau	w_a	wa	"
• Charge sur l'anneau inférieur	w_{a1}	wa1	"
• Charge sur le dome inférieur	w_{d1}	wa1	"
• Charge sur le cylindre	w_c	wc	"

• Angle d'inclinaison minimal : - Anneau	φ'_0	fp0	Degrés
- calotte sph. inférieure	φ''_0	fs0	"
- Dome inférieur	φ'''_0	ft0	"
• Angle d'inclinaison maximal :			
- Dome	φ_1	fi1	"
- Anneau	φ'_1	fp1	"
- calotte inférieure	φ''_1	fs1	"
- ~~Dome infer~~			
• Rayons - dome	r_d	rd	m
- Anneau	r_a	ra	"
- Cylindre	r_c	rc	"
- Calotte inférieure	r_{a1}	ra1	"
- Dome inférieur	r_{d1}	rd1	"
• Epaisseurs :			
- Dome	t_d	td	m
- Anneau	t_a	ta	"
- Calotte inférieure	t_{a1}	ta1	"
- Dome inférieur	t_{d1}	td1	"
- Cylindre	t_c	tc	"

INTRODUCTION

Face à la crise économique mondiale actuelle qui, se traduit par un renchérissement du prix de certains produits, une baisse de l'aide internationale, une augmentation de la dette extérieure de la plupart des pays sous développés où, ces faits ont pour conséquence logique, la baisse du pouvoir d'achat des populations, des mesures s'imposent dans nos jeunes pays, encore, trop vulnérables. Et parmi celles-ci, devra figurer, l'adoption, dans les programmes de développement, de matériaux nouveaux qui, de par leurs caractéristiques, constitueront, une veritable révolution technique. C'est ainsi que je citerai, en exemple, le ferrociment qui, bien qu'ayant les mêmes aspects que le béton conventionnel, diffère de celui-ci par sa légèreté, sa facilité de mise en oeuvre, son coût et sa meilleure tenue en tension. Son utilisation est très variée et il convient à certaines formes architecturales complexes. Cependant, sa vulgarisation est freinée par l'application, au niveau de l'Analyse, de théories élaborées telles que celle des Coques et Plaques qui, sont une idéalisation mathématiques de certains éléments structuraux, en Génie Civil.

En outre, lorsque ceux-ci sont sur des appuis appropriés, ils sont soumis à des contraintes membranaires, sauf, au voisinage, des variations brusques d'épaisseurs, ou des ouvertures, et, aux zones adja-

centes aux courbures.
Ce qui explique, en partie, le choix porté à la nature du réservoir, dont l'étude se présente dans les pages suivants.

CHAPITRE 1

Le Ferrociment et ses Propriétés

1.1 Généralités

Le ferrociment est constitué de mortier et de plusieurs couches d'armature comprenant des barres de petits diamètres et des treillis métalliques, à mailles ou espacements réduits.

Il diffère du béton armé conventionnel et du béton précontraint par l'arrangement de ses éléments de renforcement qui, contribuent à la formation d'un matériau composite affichant une meilleure tenue, du point de vue de la résistance, de la déformation, voire, une plus grande compétitivité dans les applications potentielles.

La mise en œuvre du Ferrociment comprend quatre phases correspondant à :

- La mise en place de l'ossature
- L'application des fils et des treillis métalliques à l'ossature
- La mise en place du mortier ou du plâtre
- La cure.

Alors que la seconde étape est caractérisée par l'emploi d'une main d'œuvre intense, les première et troisième, ne requièrent pas de main d'œuvre qualifiée, ce qui est un avantage considérable pour les pays sous développés où, l'utilisation de ce matériau doit être encouragée pour les raisons que voici :

- Disponibilité des matériaux et existence des techniques courantes dans la plupart des pays
- Absence d'équipement et d'outillage lourd dans la construction

- Réparations pouvant être faites par les populations locales, sauf dans certains cas où, le besoin d'un personnel qualifié peut se faire sentir (Construction Navale par exemple)
- Possibilité de le façonner dans différentes formes
- Plus grande durabilité que pour le bois.
- Coût moindre, comparativement à l'acier importé
- Applications dans la confection de, réservoirs, silos, séchoirs à grains, dépôts pour l'entreposage de denrées alimentaires. Il trouve aussi son intérêt dans le bâtiment et la construction, pour ne citer que ceux-là.

Quant au mortier utilisé dans le ferrociment, il comporte du ciment Portland, auquel est souvent ajouté du Pouzzolane et, du sable passant tamis n°8. Toutefois, dépendant des caractéristiques des éléments de renforcement (mailles du treillis métallique, répartition, etc...), un gravier fin doit être utilisé. Comme pour tous les ciments hydrauliques, les propriétés physiques et la microstructure du mortier résultant, dépendant de la composition chimique du ciment, de la nature du sable, du rapport eau-ciment et des conditions de cure du produit fini. Ainsi :

- le rapport sable-ciment sera compris entre 1,5 et 2,5
- le rapport Eau-ciment variera de 0,35 à 0,5
- Pour le sable, le passant tamis n° 16, a donné des résultats satisfaisants. Cependant le premier doit être caractérisé par une courbe granulométrique régulière où le pourcentage passant est 100 pour le tamis # 8 et 10 pour le # 100.

1.2 Propriétés Physiques et Mécaniques.

La plupart des caractéristiques propres au ferrociment, émanent de l'existence d'un renforcement bidirectionnel, constitué de fils de diamètre relativement réduit, offrant une plus grande surface de contact et une meilleure adhérence que dans le cas du béton conventionnel.
Ainsi, la surface et le volume spécifiques, sont quelques uns des paramètres, définissant la subdivision et la distribution des éléments de renforcement, dont la connaissance est fondamentale pour une meilleure compréhension des propriétés du ferrociment présentées dans les parties ci-après :

1.2.1 Résistance à la traction

En raison de la faible résistance, du mortier, en traction, celle du ferrociment est principalement gouvernée par les caractéristiques de l'armature, sa nature et son orientation par rapport à la direction d'application de la charge.
Dans le cas de la tension directe, elle est toutefois proportionnelle au degré de subdivision du renforcement et plus précisément à la surface spécifique.
Ainsi, pour une orientation normale, la résistance à la traction est essentiellement égale à celle de l'armature (type étiré, soudé ou tressé), alors que, dans le cas du grillage à mailles hexagonales, la plus grande résistance est obtenue, lorsque la direction d'application de la force est parallèle à celle des fils tressés.

1.2.2 Résistance en Compression

A la différence de la tension, la matrice contribue directement à la résistance en compression, laquelle est aussi influencée, par l'orientation et le mode d'arrangement du treillis métallique.

1.2.3 Résistance en Flexion

Elle reflète l'influence combinée des facteurs gouvernant aussi bien la tension que la compression : taux, type, orientation et géométrie intrinsèque du treillis.

Les résultats obtenus, par les différents travaux menés dans ce pays, ont été très concluants et, les meilleures performances ont été obtenues avec l'utilisation de l'acier étiré et du treillis soudé.

1.2.4 Résistance à la fissuration

En tension comme en flexion, la résistance à la fissuration est fonction, du degré de subdivision du renforcement, c'est à dire, de la surface spécifique de la composante longitudinale de celui-ci.

Si le renforcement est constitué de treillis métalliques, l'espacement moyen entre fissures est inversement proportionnel à la surface spécifique, bien que, d'autres facteurs tels que la géométrie, soient aussi influents.

Quant à la largeur des fissures, dont, la propagation peut être limitée par l'utilisation d'un treillis à mailles réduites, elle est plus accentuée dans le cas du béton conventionnel.

Notons que, pour des fils de même diamètre, l'utilisation du treillis soudé, entraine des fissures moindres que dans le cas du treillis tressé.

1.2.5 Retrait

Le retrait, dans la matrice de mortier, dépend essentiellement de sa teneur en eau, qui, en retour, est gouvernée par, la maniabilité pour la mise en place, la grosseurs des grains de sable, la présence d'éléments additifs tels que le pouzzolane, les agents entraineurs d'air ou réducteurs d'eau.
Un autre facteur de ce phénomène, est la résistance offerte par le renforcement qui, est fonction de, la fraction volumétrique dans la direction considérée, la surface spécifique, du type de treillis, et des dimensions des mailles.
Toutefois, le choix de certaines techniques de mise en place, telles que le pompage, le gunitage et l'emploi d'une quantité minimale d'eau ou l'utilisation d'un sable grossier, seront le reflet d'un effort conscient pour limiter le retrait.

1.2.6 Le Fluage

Comme pour le retrait, le fluage dans le ferrociment, est supposé être fonction de celui de la matrice et de la résistance offerte par le renforcement. Cependant, son effet peut être réduit avec un bas rapport volumétrique de la pâte sur l'aggrégat et un, de la, contrainte appliquée sur la résistance.
De plus, il peut être influencé, à long terme, par la fraction volumétrique du renforcement dans la direction de chargement.

1.2.7 Durabilité

Les mesures requises, pour assurer une meilleure durabilité du béton armé conventionnel, sont aussi applicables au Ferrociment.
Cependant, la faible enveloppe protectrice attribuée aux éléments de renforcement, la petitesse de leurs

sections et l'utilisation d'un enrobage de zinc, sont des facteurs facilitant la corrosion.

Mais, les effets nuisibles peuvent être contrecarrés en:

- fixant le rapport eau/ciment à 0.5, pour une bonne étanchéisation. Celui-ci peut être réduit, dans le cas de l'eau salée, à 0.45 pour une meilleure résistance aux sulfates.
- utilisant de l'air entraîné, dans une proportion de 9/100 du volume du mortier, pour pallier à l'action du gel et du dégel.
- ajoutant 100 ppm de trioxide de chrome au mélange d'eau, pour empêcher la formation de zincate de calcium et d'Hydrogène, qui engendrera la réaction alkalis-zinc. Avec une telle mesure, les risques de corrosion galvanique (réaction produite, lorsque le treillis métallique galvanisé et l'acier ordinaire, sont en contact avec les solutions électrolytiques présentes dans le mortier) peuvent être écartés aussi.

1.2.8 Résistance au Feu.

En raison de la faible épaisseur des formes structurales et de l'enveloppe des éléments de renforcement, le ferrociment a une résistance au feu, très peu appréciable.

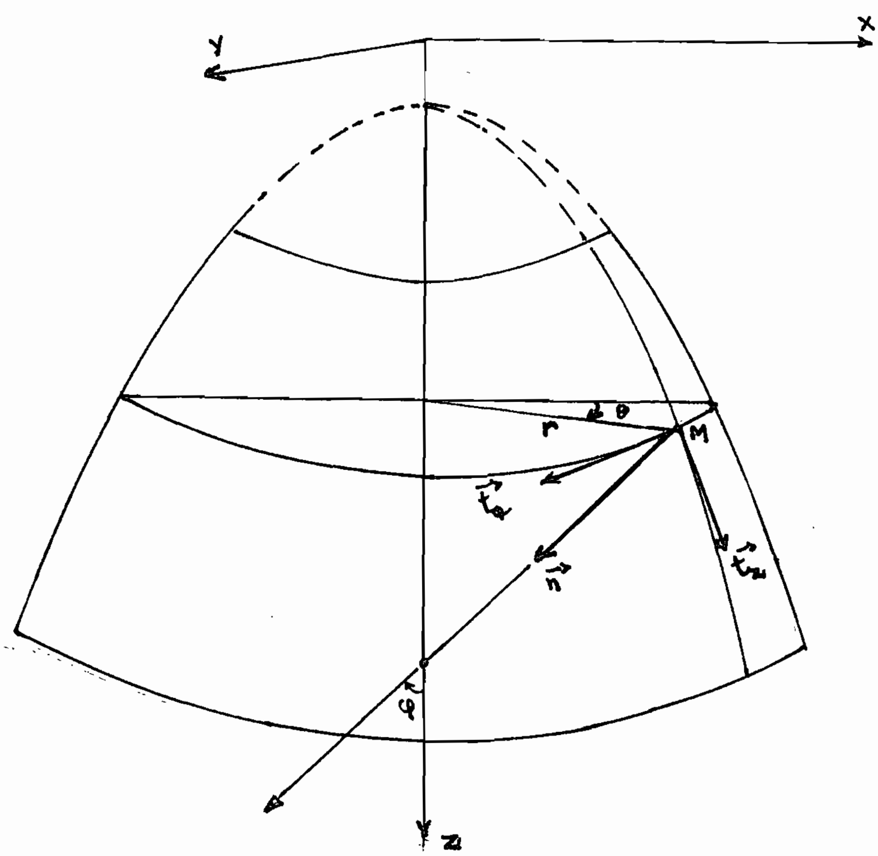
CHAPITRE 2

Analyse

2.1 Rappel de quelques notions sur la base théorique du comportement des coques minces

2.1.1 Système d'équations fondamental

Compte tenu de la configuration d'une coque de révolution, il est possible d'adopter comme lignes de coordonnées, les méridiens et les parallèles.
En rapportant alors la surface moyenne à un trièdre orthogonal direct tel que l'axe des z coïncide avec celui de la coque, la position d'un point sera définie par la cote z de son parallèle et l'angle θ du plan de son méridien avec le plan xz.



$\vec{t_z}$, $\vec{t_\theta}$, $\vec{n}$ étant les vecteurs unitaires du trièdre fondamental et M correspondant au point de rencontre des deux familles de courbes on a :

$$\vec{t_z}\left|\begin{array}{l} r_{,z}\cos\theta\sin\varphi \\ r_{,z}\sin\theta\sin\varphi \\ \sin\varphi \end{array}\right. \qquad \vec{t_\theta}\left|\begin{array}{l} -\sin\theta \\ \cos\theta \\ 0 \end{array}\right.$$

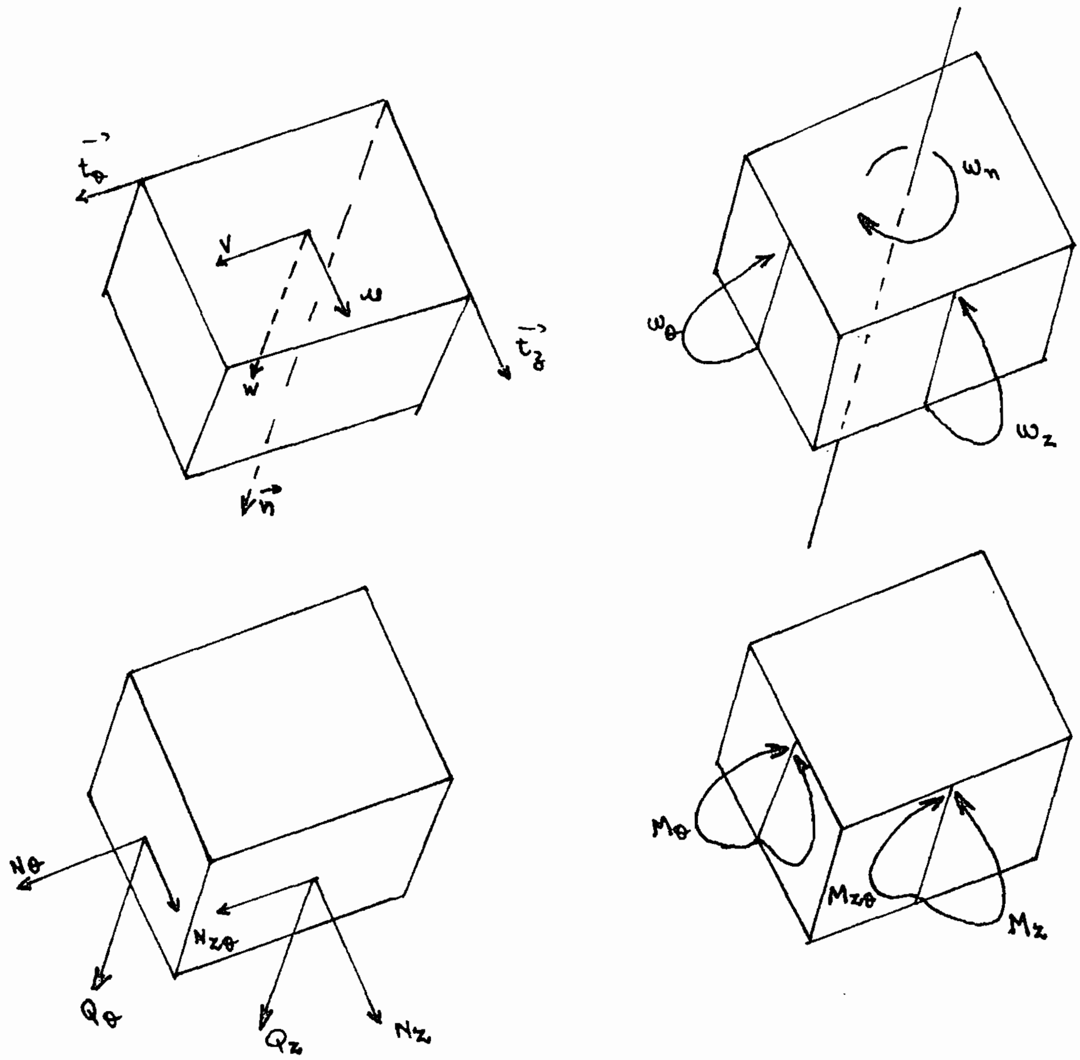
$$\vec{t_n}\left|\begin{array}{l} -\sin\varphi\cos\theta \\ -\sin\varphi\sin\theta \\ \cos\varphi \end{array}\right. \qquad M\left|\begin{array}{l} x = r(z)\cos\theta \\ y = r(z)\sin\theta \\ z = z \end{array}\right.$$

Si nous convenons d'appeler par r_1 et r_2, les rayons de courbure des sections normales $\vec{t_z}$ et $\vec{t_\theta}$, mesurés positivement dans la direction de $\vec{n}$, nous aurons pour les courbures :

$$k_z = r_{,zz}\sin^3\varphi = -\frac{1}{r_1}$$

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

2.1.1.2. Convention de signes.



avec :

- u, v, w : Déplacements dans les directions $\vec{t_z}$, $\vec{t_\theta}$, $\vec{n}$
- ω_θ, ω_z, ω_n : rotations de $\vec{n}$ dans les plans $(\vec{n}, \vec{t_z})$, $(\vec{n}, \vec{t_\theta})$ et autour de $\vec{n}$

2.1.1.2 Equations fondamentales

Equations d'équilibre.

$$\left|\begin{array}{l} (r N_z)_{,z} + \frac{1}{\sin\varphi} N_{z\theta,\theta} - \cot\varphi\, N_\theta - \frac{r_2}{r_1} Q_z + r_2\, q_z = 0 \\ r N_{z\theta,z} + \frac{1}{\sin\varphi} N_{\theta,\theta} + 2\cot\varphi\, N_{z\theta} - Q_\theta + r_2\, q_\theta = 0 \\ (r Q_z)_{,z} + \frac{1}{\sin\varphi} Q_{\theta,\theta} + \frac{r_2}{r_1} N_z + N_\theta + r_2\, q_n = 0 \end{array}\right. \qquad (S_1)$$

$$\left|\begin{array}{l} (r M_z)_{,z} + \frac{1}{\sin\varphi} M_{z\theta,\theta} - \cot\varphi\, M_\theta - r_2\, Q_z = 0 \\ r M_{z\theta,z} + \frac{1}{\sin\varphi} M_{\theta,\varphi} + 2\cot\varphi\, M_{z\theta} - r_2\, Q_\theta = 0 \end{array}\right. \qquad (S_2)$$

Equations constitutives

$$\left|\begin{array}{l} N_z = c_m\,(\varepsilon_z + \nu\,\varepsilon_\theta) \\ N_\theta = c_m\,(\varepsilon_\theta + \nu\,\varepsilon_z) \\ N_{z\theta} = c_m\,(1-\nu)\,\varepsilon_{z\theta} \end{array}\right. \qquad (S_3)$$

$$\left|\begin{array}{l} M_z = c_f\,(K_z + \nu\,K_\theta) \\ M_\theta = c_f\,(K_\theta + \nu\,K_z) \\ M_{z\theta} = c_f\,(1-\nu)\,K_{z\theta} \end{array}\right. \qquad (S_4)$$

avec

$$\left|\begin{array}{l} c_m = \frac{E\,h}{1-\nu^2} \\ c_f = \frac{E\,h^3}{12\,(1-\nu^2)} \end{array}\right.$$

Relations cinématiques.

$$\left|\begin{aligned} \varepsilon_z &= \sin\varphi\, u_{,z} - \frac{w}{r_1} \\ \varepsilon_\theta &= \frac{1}{r}\left(v_{,\theta} + \cos\varphi\, u - \sin\varphi\, w\right) \\ 2\varepsilon_{z\theta} &= \sin\varphi\, v_{,z} + \frac{1}{r}\left(u_{,\theta} - \cos\varphi\, v\right) \end{aligned}\right. \qquad (55)$$

$$\left|\begin{aligned} K_z &= \sin\varphi\, \omega_{z,z} \\ K_\theta &= \frac{1}{r}\left(\omega_{\theta,\theta} + \cos\varphi\, \omega_z\right) \\ 2K_{z\theta} &= \sin\varphi\, \omega_{\theta,z} + \frac{1}{r}\left(\omega_{z,\theta} - \cos\varphi\, \omega_\theta\right) + \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right)\omega_n \end{aligned}\right. \qquad (56)$$

avec
$$\left|\begin{aligned} \omega_z &= -\sin\varphi\, w_{,z} - \frac{u}{r_1} \\ \omega_\theta &= -\frac{1}{r}\left(w_{,\theta} + \sin\varphi\, v\right) \\ \omega_n &= \frac{1}{2}\left[\sin\varphi\, v_{,z} - \frac{1}{r}\left(u_{,\theta} - \cos\varphi\, v\right)\right] \end{aligned}\right.$$

NB : - Si $\vec{p}$ est la force extérieure appliquée par unité d'aire de la surface moyenne,

$$\left|\begin{aligned} q_z &= \vec{t_z}\cdot\vec{p} \\ q_\theta &= \vec{t_\theta}\cdot\vec{p} \\ q_n &= \vec{n}\cdot\vec{p} \end{aligned}\right.$$

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

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

- Dans les expressions de C_m et C_f ,
  E est le module d'élasticité
  ν est le coefficient de poisson
  h est l'épaisseur de la coque.

Compte tenu de l'importance que revêtent w_z et δ_r (déplacement dans la direction du rayon du parallèle), il serait intéressant d'ajouter, aux équations cinématiques fondamentales précédents, l'expression de δ_r :

$$\left|\, \delta_r = -\cos\varphi\, u + \sin\varphi\, w \right.$$

Par substitution dans (55-b) nous obtenons :

$$\left|\, \delta_r = -r\, \varepsilon_\theta + v_{,\theta} \right.$$

Cependant, en tenant compte de l'effet de la température, les équations constitutives deviennent:

$$\left|\begin{array}{l} N_z = C_m \left[\varepsilon_z + \nu \varepsilon_\theta - (1+\nu) \rho_T \right] \\ N_\theta = C_m \left[\varepsilon_\theta + \nu \varepsilon_z - (1+\nu) \rho_T \right] \\ N_{z\theta} = C_m \left[(1-\nu)\, \varepsilon_{z\theta} \right] \end{array}\right. \qquad (53)'$$

$$\left|\begin{array}{l} M_z = C_f \left[(K_z + \nu K_\theta) - (1+\nu) \mu_T \right] \\ M_\theta = C_f \left[(K_\theta + \nu K_z) - (1+\nu) \mu_T \right] \\ M_{z\theta} = C_f \left[(1-\nu)\, K_{z\theta} \right] \end{array}\right. \qquad (54)'$$

C_m : Coefficient de rigidité à l'extension

C_f : Coefficient de rigidité à la flexion

$$\left|\begin{array}{l} \rho_T = \dfrac{1}{h} \displaystyle\int_{-h/2}^{h/2} \theta\, \Delta T \, dt \\ \\ \mu_T = \dfrac{12}{h^3} \displaystyle\int_{-h/2}^{h/2} \theta\, \Delta T\, t \, dt \end{array}\right.$$

θ : Coefficient de dilatation thermique

ΔT : variation de température.

2.1.2 Solution du système d'Equations fondamental

Les systèmes (S1), (S2), (S3)', (S4)', (S5), (S6) constituent un système de dix sept équations différentielles et linéaires à dix sept inconnues.

La solution générale de ce système sera alors la somme d'une solution particulière du système non homogène et de la solution générale du système homogène. Et, il se trouve que la solution particulière correspond à un état de contrainte engendré dans la coque par un chargement appliqué en surface, c'est la solution membrane.

Quant à la solution du système homogène, elle représente un état de contrainte engendré dans la coque par une action de bordure, d'où le nom de "solution de bordure".

2.1.2.4 Solution membrane

$$\left|\begin{array}{l} (r N_z)_{,z} + \frac{1}{\sin\varphi} N_{z\theta,\theta} - \cot\varphi \, N_\theta + r_2 q_z = 0 \\ r N_{z\theta,z} + \frac{1}{\sin\varphi} N_{\theta,\theta} + 2 \cot\varphi \, N_{z\theta} + r_2 q_\theta = 0 \\ \frac{r_2}{r_1} N_z + N_\theta + r_2 q_n = 0 \end{array}\right. \qquad (57)$$

$$\left|\begin{array}{l} N_z = c_m \left[\varepsilon_z + \nu \varepsilon_\theta - (1+\nu) \rho_T \right] \\ N_\theta = c_m \left[\varepsilon_\theta + \nu \varepsilon_z - (1+\nu) \rho_T \right] \\ N_{z\theta} = c_m \left[(1-\nu) \varepsilon_{z\theta} \right] \end{array}\right. \qquad (58)$$

$$\left|\begin{array}{l} \varepsilon_z = \sin\varphi \, u_{,z} - \frac{w}{r_1} \\ \varepsilon_\theta = \frac{1}{r} \left(v_{,\theta} + \cos\varphi \, u - \sin\varphi \, w \right) \\ 2 \varepsilon_{z\theta} = \sin\varphi \, v_{,z} + \frac{1}{r} \left(u_{,\theta} - \cos\varphi \, v \right) \end{array}\right. \qquad (59)$$

Remarque : Les équations ci-dessus ont été obtenues en négligeant les moments de flexion et de torsion M_z, M_θ, $M_{z\theta}$ et les efforts tranchants transversaux Q_z, Q_θ dans le système d'équations fondamental.

$$r \sin\varphi = - \int_{z_0}^{z} r_2 \left(\sin\varphi \, q_z + \cos\varphi \, q_n \right) dz + r_0 \sin\varphi_0 \, N_{z_0}$$

ce qui conduit à :

$$\left| \begin{array}{l} N_z = - \dfrac{V}{2\pi r \sin\varphi} + \dfrac{r_0 \sin\varphi_0}{r \sin\varphi} N_{z_0} \\ \\ N_\theta = - r_2 \left(q_n + \dfrac{N_z}{r_1} \right) \end{array} \right. \qquad (5.11)$$

système dans lequel,

- r_0, φ_0, N_{z_0} sont les valeurs de r, φ, N_z, à $z = z_0$
- V est la résultante des forces parallèles à l'axe z et, dont l'expression est :

$$V = 2\pi \int_{z_0}^{z} r_2 \left(\sin\varphi \, q_z + \cos\varphi \, q_n \right) dz$$

b) <u>Déplacements en fonction des contraintes</u>

D'après 5(8) nous avons :

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

Ce qui entraine :

$$\left| \begin{array}{l} \varepsilon_z = \dfrac{1}{Eh} \left[N_z - \nu N_\theta \right] + \beta_T \\ \\ \varepsilon_\theta = \dfrac{1}{Eh} \left[N_\theta - \nu N_z \right] + \beta_T \end{array} \right.$$

Avec les mêmes considérations que dans la section (a)

$$\delta_r = - r\,\varepsilon_\theta$$

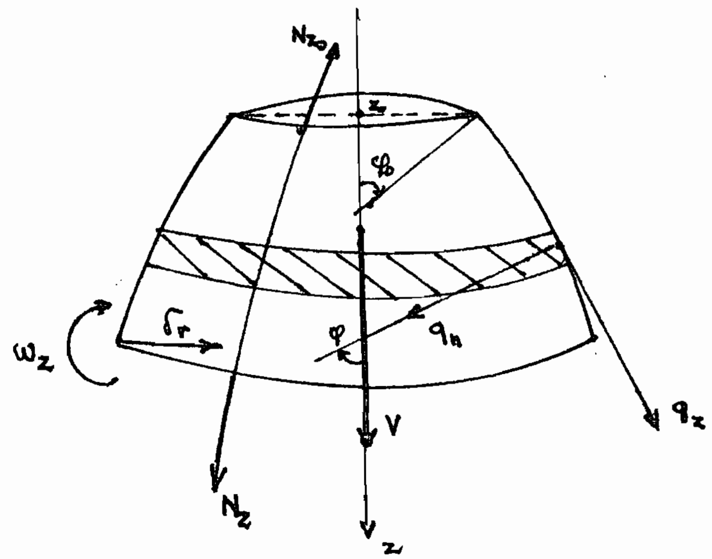
De plus, $\omega_z = r\,\varepsilon_{\theta,z} + \cot\varphi\,(\varepsilon_\theta - \varepsilon_z)$

d'où :

$$(5.13)\quad \left|\begin{array}{l} \delta_r = - r\left[\dfrac{1}{E h}\,(N_\theta - \nu N_z) + \beta_T\right] \\[2em] \omega_z = \dfrac{1}{E h}\left[r\left(N_\theta - \nu N_z\right)_{,z} + \cot\varphi\,(1+\nu)\left(N_\theta - N_z\right)\right] \end{array}\right.$$

Pour les besoins du présent projet, considérons alors le cas d'un chargement symétrique autour de l'axe.

a) Détermination des Contraintes



Compte tenu de la symétrie de chargement par rapport à z, toutes les dérivées par rapport à θ sont nulles.

Ainsi :

$$(S7) \Rightarrow \left| \begin{array}{l} (r N_z)_{,z} - \cot\varphi \, N_\theta + r_2 q_z = 0 \\ \frac{r_2}{r_1} N_z + N_\theta + r_2 q_n = 0 \end{array} \right. \quad (S10)$$

D'après (S.10.b) $N_\theta = -r_2 \left(q_n + \frac{N_z}{r_1} \right)$

Après substitution dans (S.10.a), on peut avoir l'expression de N_z à l'aide l'intégrale suivante :

2.1.2.2 Solution de bordure

Il est un fait d'expérience que l'influence d'une action, force ou déplacement, imposée à une coque le long d'une bordure non asymptotique (c'est à dire de courbure non nulle), s'amortit très rapidement quand on s'éloigne de la bordure. Mathématiquement, la solution correspondant à un tel effet de bordure se caractérisera par une variation très rapide. D'où l'intérêt de chercher une solution de forme exponentielle.

Pour ce faire, on obtient, par éliminations successives dans le système fondamental, l'équation suivante en w :

$$(E_1) \qquad w_{,\zeta\zeta\zeta\zeta\zeta} + \frac{12(1-\nu^2)}{\sin^4\varphi}\left(\frac{R}{r_2}\right)^2\left(\frac{R}{h}\right)^2 w_{,\zeta} = 0$$

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

Par substitution et intégration on obtient :

$$(E_2) : \quad w_{,\zeta\zeta\zeta\zeta} + 4\lambda^4 w = f(\theta)$$

dont une solution particulière évidente est :

$$w_p = \frac{1}{4\lambda^4} f(\theta) \quad ,$$

or w_p doit s'amortir quand on s'éloigne de la bordure, d'où la nécessité de prendre $f(\theta)=0$

L'équation différentielle fondamentale de l'effet de bordure se réduit donc à :

$$\boxed{w_{,\xi\xi\xi\xi} + 4\lambda^4 w = 0}$$

Pour des raisons de commodité pour le calcul structural, introduisons la variable z en posant :

$$\left|\begin{array}{l} \phi = e^{\mu(z-z_0)} \cos\left(\mu(z-z_0)\right) \\ \psi = e^{\mu(z-z_0)} \sin\left(\mu(z-z_0)\right) \end{array}\right.$$

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

Dès lors, les différentes expressions (déplacements, contraintes) pourront se résumer sous l'expression suivante :

$$\boxed{F = c\left[a(\theta)\,\varphi(z) + b(\theta)\,\psi(z)\right]}$$

Et, pour les besoins du projet, contentons nous de mentionner les expressions ci-après :

$$N_z = -2\, c_f\, \mu^3 \sin^2\varphi \cos\varphi \left[(\alpha - \beta)\, \phi(z) + (\alpha + \beta)\, \psi(z) \right]$$

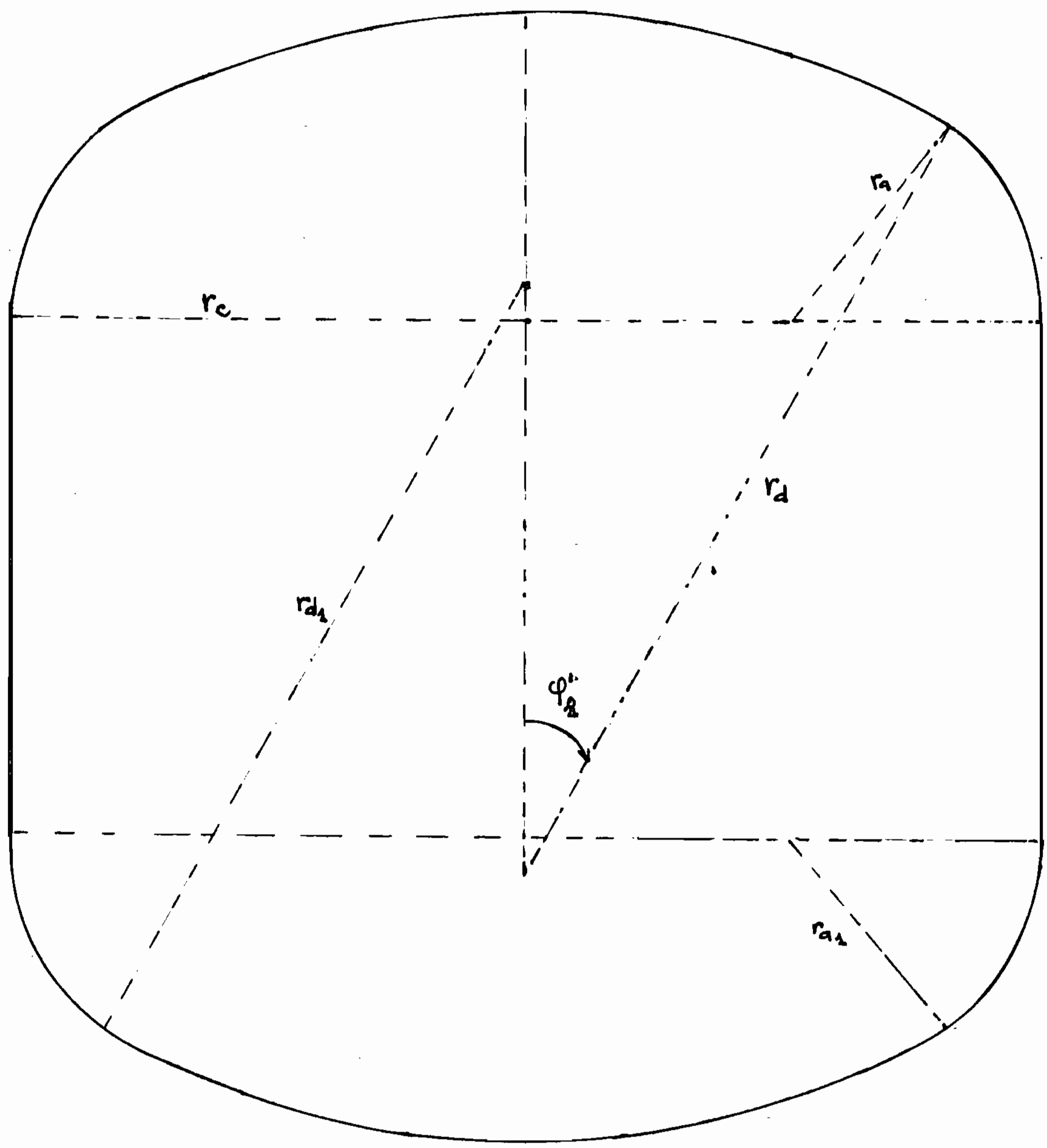
$$N_\theta = -\frac{Eh}{r_e} \left[\alpha\, \phi(z) + \beta\, \psi(z) \right]$$

$$M_z = -2\, c_f\, \mu^2 \sin^2\varphi \left[\beta\, \phi(z) - \alpha\, \psi(z) \right]$$

$$Q_z = 2\, c_f\, \mu^3 \sin^3\varphi \left[(\alpha - \beta)\, \phi(z) + (\alpha + \beta)\, \psi(z) \right]$$

$$\delta_r = \sin\varphi \left[\alpha\, \phi(z) + \beta\, \psi(z) \right]$$

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



$r_d = r_{d_1} = 7,738$ m $r_a = r_{a_1}$ 1,90 m $r_c = 4$ m

$\varphi_1 = 30°$ $\varphi'_0 = 75°$ $\varphi''_0 = 90°$ $\varphi'''_0 = 150°$

2.2 Analyse du Réservoir en Ferrociment

2.2.1 Principe de la Méthode d'Analyse

La méthode d'Analyse que nous nous proposons d'adopter, consistera à :

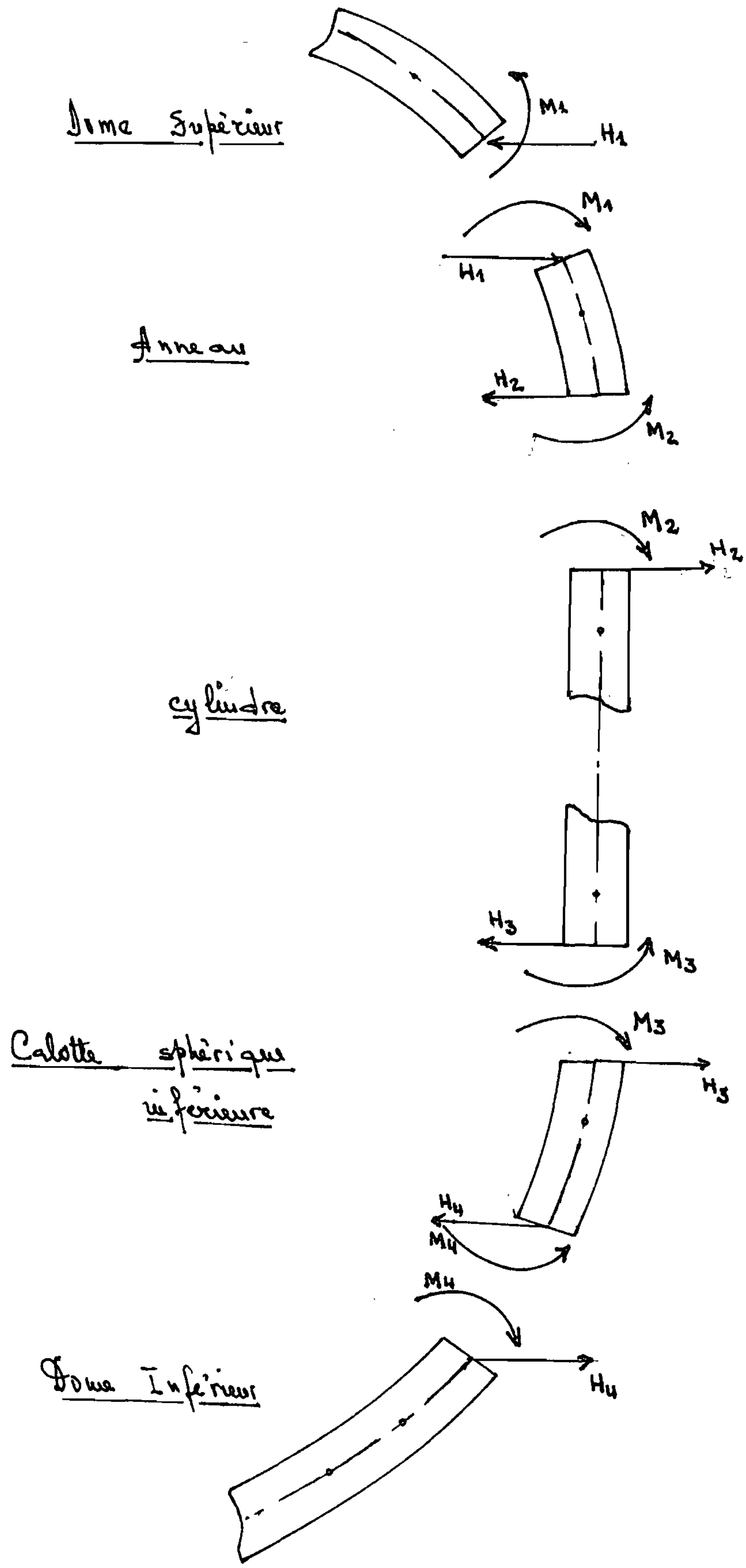
1° - Supprimer un nombre suffisant de liaisons entre les éléments distincts de la structure.

2° - Extérioriser les forces d'interaction internes, de part et d'autre de chaque coupure (cf fig. ci-après)

3° - Analyser chaque élément sous l'effet des forces d'interaction et des forces extérieures de volume et de surface qui, lui sont directement appliquées.

4° - Calculer les forces d'interaction, à partir des conditions de compatibilité des déplacements.

5° - Calculer les contraintes et les déplacements de la structure globale.


Dome Supérieur
M1
H1
Anneau
M1
H1
H2
M2
cylindre
M2
H2
H3
M3
Calotte sphérique inférieure
M3
H3
H4
M4
Dome Inférieur
M4
H4

2.2.2 Analyse du dôme sphérique Supérieur

. Dans tout ce qui suivra, l'indice 'd' désignera un paramètre quelconque se rapportant au dôme.

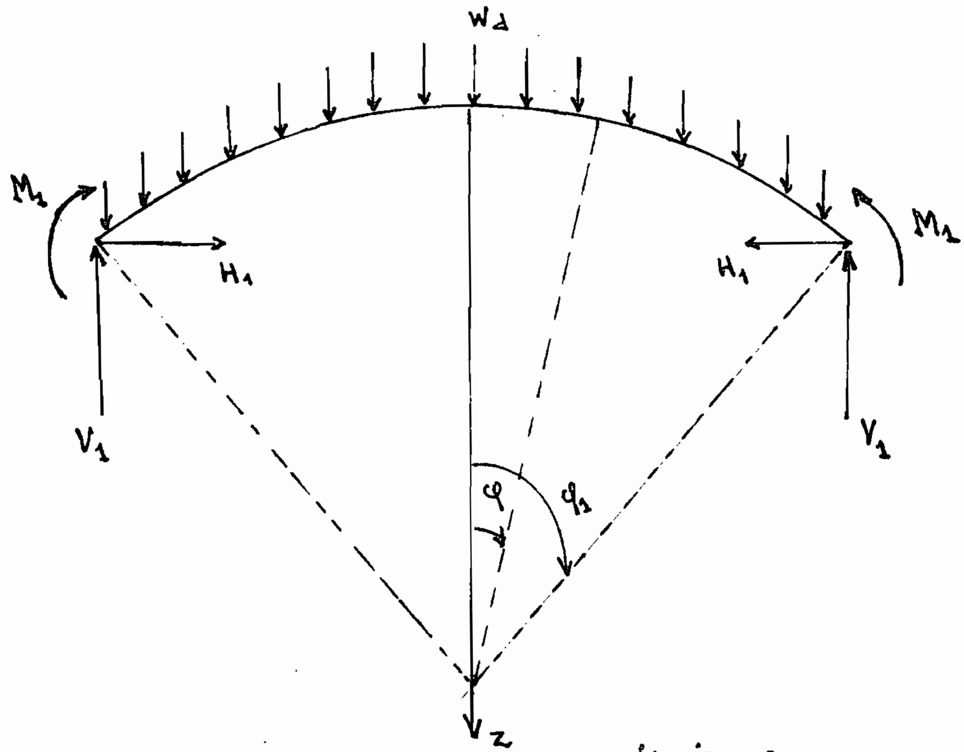


fig. 2.2.2

Avec le chargement ci-dessus,

- W_d est une charge uniformément répartie
- H_1, M_1 sont des forces d'interactions
- V_1 est une réaction d'appui.

Quant aux conditions de bordure, elles seront les suivantes :

1°. En raison de la symétrie de révolution le déplacement circonférentiel est nul soit :

$$\boxed{V_1 = 0}$$

2°. La bordure devant subir un déplacement vertical égal au raccourcissement axial du cylindre qui devient un déplacement d'ensemble, n'affectant donc ni les déformations, ni les contraintes,

$$\boxed{\text{Déplacement vertical} = v^d \sin\varphi_1 + w^d \cos\varphi_1 = 0}$$

3° - L'application de H_1 implique :

$$\boxed{H_1 = -N_{z_1}^d \cos\varphi_1 + Q_{z_1}^d \sin\varphi_1 = H_1}$$

4° - L'application de M_1 implique :

$$\boxed{M_{z_1}^d = M_1}$$

L'état de contrainte qui satisfait ces conditions, se détermine à partir de la solution générale du système d'équations différentielles d'une coque sphérique, celle-ci s'obtenant par addition de la solution membrane et de la solution de bordure établies dans les pages précédentes.

Ainsi, la solution générale contiendra donc trois constantes : c pour la solution membrane, α et β

pour la solution bordure. Mais, compte tenu de la configuration des différentes équations, seuls α et β ont un intérêt particulier et sont déterminés à partir des deux dernières conditions de bordure.

Ainsi, la solution générale sera :

$$N_z^d = \left(-\frac{1}{1+\cos\varphi}\right) r_d w_d - 2 c_{f_d} \mu_d^3 \sin^2\varphi_1 \cos\varphi_1 \left[(\alpha_1-\beta_1)\phi_1 + (\alpha_1+\beta_1)\psi_1\right]$$

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

$$M_z^d = -2 c_{f_d} \mu_d^2 \sin^2\varphi_1 \left(\beta_1\phi_1 - \alpha_1\psi_1\right)$$

$$Q_z^d = 2 c_{f_d} \mu_d^3 \sin^3\varphi_1 \left[(\alpha_1-\beta_1)\phi_1 + (\alpha_1+\beta_1)\psi_1\right]$$

$$\delta_r^d = -r_d \sin\varphi \left\{\frac{1}{E t_d}\left[-\cos\varphi + \frac{(1+\nu)}{1+\cos\varphi}\right] r_d w_d + \rho_T\right\} + \sin\varphi_1 \left(\alpha_1\phi_1 + \beta_1\psi_1\right)$$

$$\omega_z^d = \frac{1}{E t_d}\left[(2+\nu)\sin\varphi \, r_d w_d\right] - \mu_d \sin\varphi_1 \left[(\alpha_1+\beta_1)\phi_1 - (\alpha_1-\beta_1)\psi_1\right]$$

avec

$$c_{f_d} = \frac{E t_d^3}{12(1-\nu^2)}$$

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

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

$$\left| \begin{array}{l} \alpha_1 = \dfrac{1}{2 C_{fd} \mu_d^3 \sin^2 \varphi_1} \left(H_1 - \mu_d M_1 - \dfrac{\cos \varphi_1}{1 + \cos \varphi_1} r_d w_d \right) \\[2ex] \beta_1 = - \dfrac{M_1}{2 C_{fd} \mu_d^2 \sin^2 \varphi_1} \end{array} \right.$$

L' état de contrainte correspondant aux condition de la fig.2.2.2 s'exprime par :

$$\left| \begin{array}{l} N_z^d = N_{z_0}^d + N_{z_1}^d H_1 + N_{z_2}^d M_1 \\ N_\theta^d = N_{\theta_0}^d + N_{\theta_1}^d H_1 + N_{\theta_2} M_1 \\ M_z^d = M_{z_0}^d + M_{z_1}^d H_1 + M_{z_2}^d M_1 \\ Q_z^d = Q_{z_0}^d + Q_{z_1}^d H_1 + Q_{z_2}^d M_1 \\ \delta_r^d = \delta_{r_0}^d + \delta_{r_1}^d H_1 + \delta_{r_2}^d M_1 \\ \omega_z^d = \omega_{z_0}^d + \omega_{z_1}^d H_1 + \omega_{z_2}^d M_1 \end{array} \right.$$

où :

$$\left| \begin{array}{l} N_{z_0}^d = \left[- \dfrac{1}{1 + \cos \varphi} + \dfrac{\cos^2 \varphi_1}{1 + \cos \varphi_1} (\phi_1 + \psi_1) \right] r_d w_d \\[2ex] N_{z_1}^d = - \cos \varphi_1 (\phi_1 + \psi_1) \\ N_{z_2}^d = 2 \mu_d \cos \varphi_1 \psi_1 \end{array} \right.$$

$$N_{\theta_0}^d = \left[-\cos\varphi + \frac{1}{1+\cos\varphi} + 2\mu_d r_d \sin^2\varphi_1 \frac{\cos\varphi_1}{1+\cos\varphi_1} \phi_1 \right] r_d w_d$$

$$N_{\theta_1}^d = -2\mu_d r_d \sin^2\varphi_1 \, \phi_1$$

$$N_{\theta_2}^d = 2\mu_d^2 r_d \sin^2\varphi_1 \left(\phi_1 + \psi_1 \right)$$

$$M_{z_0}^d = \left(-\frac{1}{\mu_d} \times \frac{\cos\varphi_1}{1+\cos\varphi_1} \psi_1 \right) r_d w_d$$

$$M_{z_1}^d = \frac{1}{\mu_d} \psi_1$$

$$M_{z_2}^d = \phi_1 - \psi_1$$

$$Q_{z_0}^d = \left[-\sin\varphi_1 \times \frac{\cos\varphi_1}{1+\cos\varphi_1} \left(\phi_1 + \psi_1 \right) \right] r_d w_d$$

$$Q_{z_1}^d = \sin\varphi_1 \left(\phi_1 + \psi_1 \right)$$

$$Q_{z_2}^d = -2 \times \mu_d \sin\varphi_1 \, \psi_1$$

$$\delta_{r_0}^d = \left\{ \frac{1}{E t_d} \left[\cos\varphi - \frac{(1+\nu)}{1+\cos\varphi} \right] \sin\varphi - 2 \frac{\mu_d r_d}{E t_d} \times \frac{\cos\varphi_1 \sin^2\varphi_1}{1+\cos\varphi_1} \phi_1 \right\} r_d^2 w_d + r_d \sin\varphi \, \rho_T$$

$$\delta_{r_1}^d = \frac{2\mu_d r_d^2 \sin^3\varphi_1}{E t_d} \phi_1$$

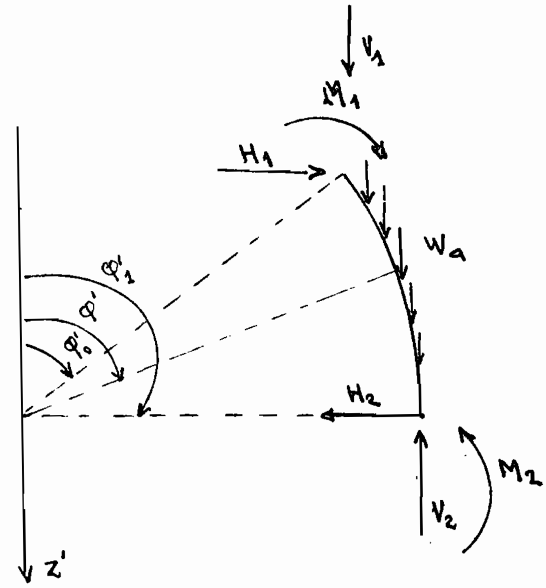
$$\delta_{r_2}^d = -\frac{2\mu_d^2 r_d^2 \sin^3\varphi_1}{E t_d} \left(\phi_1 + \psi_1 \right)$$

$$w_{z_0}^{d} = \left[\frac{1}{Et_d} (2+\nu)\sin\varphi + 2\,\frac{\mu_d^2 r_d^2}{Et_d} \times \frac{\cos\varphi_1 \sin^3\varphi_1}{1+\cos\varphi_1} (\phi_1 - \psi_1) \right] r_d w_d + r_d \sin\varphi\, \beta_T$$

$$w_{z_1}^{d} = -2 \times \frac{\mu_d^2 r_d^2 \sin^3\varphi_1}{Et_d} (\phi_1 - \psi_1)$$

$$w_{z_2}^{d} = 4 \times \frac{\mu_d^3 r_d^2 \sin^3\varphi_1}{Et_d} \phi_1$$

Analyse de l'anneau



V_1 : Poids du dôme supérieur

W_a : Charge uniforme sur l'anneau

H_1, M_1, H_2, M_2 : forces d'Interaction

V_2 : Réaction du cylindre.

Avec le chargement ci-dessus, la solution générale de l'anneau, résultera de la combinaison de la solution membrane avec les solutions d'effet de bordure, correspondant aux rebords supérieur et inférieur.

Ainsi, définissons quelques paramètres, utiles à cet effet et, que sont :

$$A_1 = -\left[\frac{\sin\varphi'}{(1+\cos\varphi')^2} r_a W_a - 2\,\frac{\sin^2\varphi'_0}{1+\cos\varphi_1} r_d W_d \times \frac{\cos\varphi'}{\sin^3\varphi'}\right]$$

$$A_2 = -\frac{r_a W_a}{1+\cos\varphi'} - \left(\frac{\sin\varphi'_0}{\sin^2\varphi'}\right) \times \left(\frac{r_d W_d}{1+\cos\varphi_1}\right) r_d W_d$$

$$B_2 = -\left(w_a r_a \cos\varphi' + A_2 / \sin^2\varphi' \right)$$

$$D_2 = -r_a \sin\varphi' \left\{ \frac{1}{E t_a} \left[- w_a r_a \cos\varphi' - A_2 \left(\gamma + \frac{1}{\sin^2\varphi'} \right) \right] + \beta_T \right\}$$

$$F_2 = \frac{1}{E t_a} \left\{ w_a r_a \sin\varphi' - \left(\gamma + \frac{1}{\sin\varphi'} \right) A_1 + 2 \frac{\cos\varphi'}{\sin^3\varphi'} A_2 \right.$$
$$\left. - \cot\varphi' (1+\gamma) \left[w_a r_a \cos\varphi' + A_2 \left(1 + \frac{1}{\sin^2\varphi'} \right) \right] \right\}$$

$$A_{b_1} = -\cos\varphi'_0 \left[\frac{r_a w_a}{1+\cos\varphi'_0} + \frac{r_d w_d}{1+\cos\varphi_1} \right]$$

$$A_{b_2} = -\cos\varphi'_1 \left[\frac{r_a w_a}{1+\cos\varphi'_1} + \left(\frac{\sin\varphi'_0}{\sin\varphi'_1} \right)^2 \times \frac{r_d w_d}{1+\cos\varphi_1} \right]$$

Dès lors, la solution générale sera comme suit :

$$N_z^a = A_2 - 2 c_{f_a} \mu_a^3 \sin^2\varphi' \cos\varphi' \left[(\alpha_2 - \beta_2) \phi_2 - (\alpha_2 + \beta_2) \psi_2 + (\alpha_3 - \beta_3) \phi_3 + (\alpha_3 + \beta_3) \psi_3 \right]$$

$$N_\theta^a = B_2 - \frac{E t_a}{r_a} \left[\alpha_2 \phi_2 - \beta_2 \psi_2 + \alpha_3 \phi_3 + \beta_3 \psi_3 \right]$$

$$M_z^a = -2 c_{f_a} \mu_a^2 \sin^2\varphi' \left[\beta_2 \phi_2 + \alpha_2 \psi_2 + \beta_3 \phi_3 - \alpha_3 \psi_3 \right]$$

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

$$\delta r^a = D_2 + \sin\varphi' \left[\alpha_2 \phi_2 - \beta_2 \psi_2 + \alpha_3 \phi_3 + \beta_3 \psi_3 \right]$$

$$w_z^a = F_2 + \mu_a \sin\varphi' \left[(\alpha_2 + \beta_2) \phi_2 + (\alpha_2 - \beta_2) \psi_2 - (\alpha_3 + \beta_3) \phi_3 + (\alpha_3 - \beta_3) \psi_3 \right]$$

où :

$$\left|\begin{array}{l} C_{f_a} = \dfrac{E t_a^3}{12(1-\nu^2)} \\[2ex] \mu_a = \left[\dfrac{3(1-\nu^2)}{\sin^4 \varphi'_1 (r_a t_a)^3}\right]^{1/4} \end{array}\right.$$

$$\left|\begin{array}{l} \phi_2 = e^{-\mu_a z'} \cos(\mu_a z') \\[2ex] \psi_2 = e^{-\mu_a z'} \sin(\mu_a z') \end{array}\right. \qquad \left|\begin{array}{l} \phi_3 = e^{\mu_a (z'-z'_1)} \cos\left[\mu_{a1}(z'-z'_1)\right] \\[2ex] \psi_3 = e^{\mu_a (z'-z'_1)} \sin\left[\mu_{a1}(z'-z'_1)\right] \end{array}\right.$$

Mais les conditions de bordure étant, pour

$\underline{z' = z'_0}$

- Déplacement circonférenciel $V_a^c = 0$
- Déplacement vertical $\mu_a \sin\varphi'_0 + w_a \cos\varphi'_0 = 0$
- La résultante horizontale des contraintes est telle que :

$$H_1 = -N_z^a \cos\varphi'_0 + Q_z^a \sin\varphi'_0$$

- le moment fléchissant $M_z^a = M_1$.

$\underline{z' = z'_1}$

- $V_a^c = 0$
- $\mu_a \sin\varphi'_1 + w_a \cos\varphi'_1 = 0$
- $H_2 = -N_z^a \cos\varphi'_1 + Q_z^a \sin\varphi'_1$
- $M_z^a = M_2$

, on obtient, en utilisant les deux dernières relations de chacun des cas considérés, les expressions ci-après pour les coefficients d'interaction :

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

$$\alpha_2 = \frac{1}{2 c_{fa} \mu_a^3 \sin^2 \varphi'_0 \cos 2\varphi'_0} \left(H_1 - \mu_a \cos 2\varphi'_0 \, M_1 - Ab_1 \right)$$

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

$$\alpha_3 = \frac{1}{2 c_{fa} \mu_a^3 \sin^2 \varphi'_1} \left(H_2 - \mu_a M_2 - Ab_2 \right)$$

Ce qui nous conduit au système suivant pour l'état des contraintes :

$$\begin{aligned}
N_z^a &= N_{z_0}^a + N_{z_1}^a H_1 + N_{z_2}^a M_1 + N_{z_3}^a H_2 + N_{z_4}^a M_2 \\
N_\theta^a &= N_{\theta_0}^a + N_{\theta_1}^a H_1 + N_{\theta_2}^a M_1 + N_{\theta_3}^a H_2 + N_{\theta_4}^a M_2 \\
M_z^a &= M_{z_0}^a + M_{z_1}^a H_1 + M_{z_2}^a M_1 + M_{z_3}^a H_2 + M_{z_4}^a M_2 \\
Q_z^a &= Q_{z_0}^a + Q_{z_1}^a H_1 + Q_{z_2}^a M_1 + Q_{z_3}^a H_2 + Q_{z_4}^a M_2 \\
\delta_r^a &= \delta_{r_0}^a + \delta_{r_1}^a H_1 + \delta_{r_2}^a M_1 + \delta_{r_3}^a H_2 + \delta_{r_4}^a M_2 \\
\omega_z^a &= \omega_{z_0}^a + \omega_{z_1}^a H_1 + \omega_{z_2}^a M_1 + \omega_{z_3}^a H_2 + \omega_{z_4}^a M_2
\end{aligned}$$

avec :

$$N_{z_0}^a = A_2 + \sin^2\varphi' \cos\varphi' \left[Ab_1 \frac{(\phi_2 - \psi_2)}{\cos 2\varphi'_0 \sin^2\varphi'_0} + Ab_2 \frac{(\phi_3 + \psi_3)}{\sin^2\varphi'_1} \right]$$

$$N_{z_1}^a = - \frac{\sin^2\varphi' \cos\varphi'}{\cos 2\varphi'_0 \sin^2\varphi'_0} (\phi_2 - \psi_2)$$

$$N_{z_2}^a = -2 \times \frac{\sin^2\varphi' \cos\varphi'}{\sin^2\varphi'_0} \mu_a \psi_2$$

$$N_{z_3}^a = - \frac{\sin^2\varphi' \cos\varphi'}{\sin^2\varphi'_1} (\phi_3 + \psi_3)$$

$$N_{z_4}^a = 2 \times \frac{\sin^2\varphi' \cos\varphi'}{\sin^2\varphi'_1} \mu_a \psi_3$$

$$N_{\theta_0}^a = B_2 + \frac{E t_a}{2 c_{f_a} \mu_a^3 r_a} \left[Ab_1 \times \frac{\phi_2}{\cos 2\varphi'_0 \sin^2\varphi'_0} + Ab_2 \times \frac{\phi_3}{\sin^2\varphi'_1} \right]$$

$$N_{\theta_1}^a = - \frac{E t_a}{2 c_{f_a} r_a \mu_a^3 \sin^2\varphi'_0 \cos 2\varphi'_0} \phi_2$$

$$N_{\theta_2}^a = \frac{E t_a}{2 c_{f_a} r_a \mu_a^2 \sin^2\varphi'_0} (\phi_2 - \psi_2)$$

$$N_{\theta_3}^a = - \frac{E t_a}{2 c_{f_a} r_a \mu_a^3 \sin^2\varphi'_1} \phi_3$$

$$N_{\theta_4}^a = \frac{E t_a}{2 c_{f_a} r_a \mu_a^2 \sin^2\varphi'_1} (\phi_3 + \psi_3)$$

$$M_{z_0}^a = \frac{\sin^2\varphi'}{\mu_a} \left[\frac{Ab_1}{\cos 2\varphi'_0 \sin^2\varphi'_0} \psi_2 - \frac{1}{\sin^2\varphi'_1} (Ab_2) \psi_3 \right]$$

$$M_{z_1}^a = - \frac{\sin^2\varphi'}{\mu_a \sin^2\varphi'_0 \cos 2\varphi'_0} \psi_2$$

$$M_{z_2}^a = \frac{\sin^2\varphi'}{\sin^2\varphi'_0} (\phi_2 + \psi_2)$$

$$M_{z_3}^a = \frac{\sin^2\varphi'}{\mu_a \sin^2\varphi'_1} \psi_3$$

$$M_{z_4}^a = \frac{\sin^2\varphi'}{\sin^2\varphi'_1} \left(\phi_3 - \psi_3 \right)$$

$$\varphi_{z_0}^a = - \sin^3\varphi' \left[\frac{1}{\cos 2\varphi'_0 \sin^2\varphi'_0} A_{b_1} (\psi_2 - \phi_2) - \frac{A_{b_2}}{\sin^2\varphi'_1} (\phi_3 + \psi_3) \right]$$

$$\varphi_{z_1}^a = \frac{\sin^3\varphi'}{\cos 2\varphi'_0 \sin^2\varphi'_0} (\psi_2 - \phi_2)$$

$$\varphi_{z_3}^a = - 2 \frac{\sin^3\varphi'}{\sin^2\varphi'_1} \left(\phi_3 + \psi_3 \right)$$

$$\varphi_{z_2}^a = - 2 \frac{\sin^3\varphi'}{\sin^2\varphi'_0} \mu_a \psi_2$$

$$\varphi_{z_4}^a = - 2 \frac{\sin^3\varphi'}{\sin^2\varphi'_1} \mu_a \psi_3$$

$$\delta r_0^a = D_2 - \frac{\sin\varphi'}{2 c_{fa} \mu_a^3} \left[\frac{A_{b_1}}{\sin^2\varphi'_0 \cos 2\varphi'_0} \phi_2 + \frac{A_{b_2}}{\sin^2\varphi'_1} \phi_3 \right]$$

$$\delta r_1^a = \frac{\sin\varphi'}{2 c_{fa} \mu_a^3 \sin^2\varphi'_0 \cos 2\varphi'_0} \phi_2$$

$$\delta r_2^a = - \frac{\sin\varphi'}{2 c_{fa} \mu_a^2 \sin^2\varphi'_0} (\phi_2 - \psi_2)$$

$$\delta r_3^a = \frac{\sin\varphi'}{2 c_{fa} \mu_a^3 \sin^2\varphi'_1} \phi_3$$

$$\delta r_4^a = - \frac{\sin\varphi'}{2 c_{fa} \mu_a^2 \sin^2\varphi'_1} \left(\phi_3 + \psi_3 \right)$$

$$w_{z_0}^{a} = F_2 + \frac{\sin\varphi'}{2\, c_{fa}\, \mu_a^2}\left[-\left(Ab_1\right) \frac{\left(\phi_2 + \psi_2\right)}{\cos 2\varphi'_0 \sin^2\varphi'_0} + Ab_2 \times \frac{\left(\phi_3 - \psi_3\right)}{\sin^2\varphi'_1}\right]$$

$$w_{z_1}^{a} = \frac{\sin\varphi'}{2\, c_{fa}\, \mu_a^2 \sin^2\varphi'_0 \cos 2\varphi'_0}\left(\phi_2 + \psi_2\right)$$

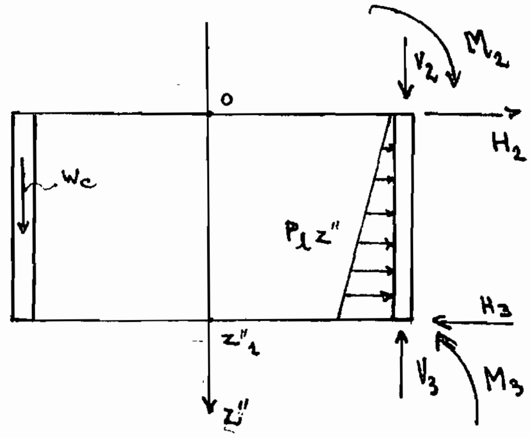
$$w_{z_2}^{a} = -\frac{\sin\varphi'}{c_{fa}\, \mu_a \sin^2\varphi'_0}\,\phi_2$$

$$w_{z_3}^{a} = -\frac{\sin\varphi'}{2\, c_{fa}\, \mu_a^2 \sin^2\varphi'_1}\left(\phi_3 - \psi_3\right)$$

$$w_{z_4}^{a} = \frac{\sin\varphi'}{c_{fa}\, \mu_a \sin^2\varphi'_1}\,\phi_3$$

2.2.4 Analyse du Cylindre

Le cylindre est soumis au système de forces suivant :



où W_c est le poids du cylindre

$P_\ell z$: Pression exercée par le liquide

V_2 : Poids du dôme supérieur et de l'anneau

H_2, M_2, H_3, M_3 : Forces et Moments d'interaction

V_3 : Action sur la calotte sphérique inférieure

Les conditions de bordure se résument ainsi :

$$z''=0 \quad \left| \begin{array}{l} V_c = 0 \\ N_z^c = V_2 \\ Q_z^c = H_2 \\ M_z^c = M_2 \end{array} \right. \qquad \text{et pour } z''=z''_1 \quad \left| \begin{array}{l} V_c = 0 \\ N_z^c = V_3 \\ Q_z^c = H_3 \\ M_z^c = M_3 \end{array} \right.$$

Comme précédemment, en combinant la solution membrane, avec les 2 solutions d'effets de bordure distinctes correspondant à $z''=0$ et à $z'=z'_1$, la solution générale sera :

$$N_z^c = -w_c z'' - r_a w_a - \sin^2\varphi'_0 \left(\frac{r_d w_d}{1+\cos\varphi_1}\right)$$

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

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

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

$$\delta_r^c = -r_c \left\{\frac{1}{E t_c}\left[(P_\ell r_c + \nu w_c) z'' + \nu\left(w_a r_a + \sin^2\varphi'_0 \times \frac{r_d w_d}{1+\cos\varphi_1}\right)\right] + \delta_T\right\} + \left[\alpha_4 \phi_4 - \beta_4 \psi_4 + \alpha_5 \phi_5 + \beta_5 \psi_5\right]$$

$$\omega_z^c = \frac{1}{E t_c}\left[r_c (P_\ell r_c + \nu w_c)\right] + \mu_c\left[(\alpha_4 + \beta_4)\phi_4 + (\alpha_4 - \beta_4)\psi_4 - (\alpha_5 + \beta_5)\phi_5 + (\alpha_5 - \beta_5)\psi_5\right]$$

<u>avec</u>

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

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

$$\phi_4 = e^{-\mu_c z''} \cos(\mu_c z'') \qquad \psi_4 = e^{-\mu_c z''} \sin(\mu_c z'') \quad ;$$

$$\phi_5 = e^{\mu_c (z'' - z''_1)} \cos\left[\mu_c (z'' - z''_1)\right] \qquad \psi_5 = e^{\mu_c (z'' - z''_1)} \sin\left[\mu_c (z'' - z''_1)\right]$$

$$\alpha_4 = -\frac{H_2 + \mu_c M_2}{2 c_{fc} \mu_c^3} \qquad \beta_4 = -\frac{M_2}{2 c_{fc} \mu_c^2} \quad ;$$

$$\alpha_5 = \frac{H_3 - \mu_c M_3}{2 c_{fc} \mu_c^3} \qquad \beta_5 = -\frac{M_3}{2 c_{fc} \mu_c^2}$$

L'Etat des contraintes sera :

$$
\begin{cases}
N_z^c = N_{z_0}^c + N_{z_3}^c H_2 + N_{z_4}^c M_2 + N_{z_5}^c H_3 + N_{z_6}^c M_3 \\
N_\theta^c = N_{\theta_0}^c + N_{\theta_3}^c H_2 + N_{\theta_4}^c M_2 + N_{\theta_5}^c H_3 + N_{\theta_6}^c M_3 \\
M_z^c = M_{z_0}^c + M_{z_3}^c H_2 + M_{z_4}^c M_2 + M_{z_5}^c H_3 + M_{z_6}^c M_3 \\
Q_z^c = Q_{z_0}^c + Q_{z_3}^c H_2 + Q_{z_4}^c M_2 + Q_{z_5}^c H_3 + Q_{z_6}^c M_3 \\
\delta_r^c = \delta_{r_0}^c + \delta_{r_3}^c H_2 + \delta_{r_4}^c M_2 + \delta_{r_5}^c H_3 + \delta_{r_6}^c M_3 \\
\omega_z^c = \omega_{z_0}^c + \omega_{z_3}^c H_2 + \omega_{z_4}^c M_2 + \omega_{z_5}^c H_3 + \omega_{z_6}^c M_3
\end{cases}
$$

où

$$
\begin{cases}
N_{z_0}^c = -w_e z'' - r_a w_a - \sin^2 \varphi'_0 \times \left(\dfrac{r_d w_d}{1 + \cos\varphi_1} \right) \\
N_{z_3}^c = N_{z_4}^c = N_{z_5}^c = N_{z_6}^c = 0
\end{cases}
$$

$$
\begin{cases}
N_{\theta_0}^c = \rho_l r_e z'' \\
N_{\theta_3}^c = 2 \mu_c r_c \phi_4 \\
N_{\theta_4}^c = 2 \mu_c^2 r_c (\phi_4 - \psi_4) \\
N_{\theta_5}^c = -2 \mu_c r_c \phi_5 \\
N_{\theta_6}^c = 2 \mu_c^2 r_c (\phi_5 + \psi_5)
\end{cases}
$$

$$
\begin{cases}
M_{z_0}^c = 0 \\
M_{z_3}^c = \dfrac{1}{\mu_c} \psi_4 \\
M_{z_4}^c = \phi_4 + \psi_4 \\
M_{z_5}^c = \dfrac{1}{\mu_c} \psi_5 \\
M_{z_6}^c = \underset{5}{\phi_6} - \psi_5
\end{cases}
$$

$$\delta r_0^c = -r_c \left\{ \frac{1}{E t_c} \left[\left(P_\ell r_c + \gamma w_c \right) z'' + \gamma \left(w_a r_a + \sin^2 \varphi'_0 \times \left(\frac{r_d w_d}{1+\cos\varphi_1} \right) \right) \right] + \beta_T \right\}$$

$$\delta r_3^c = -2 \frac{\mu_c r_c^2}{E t_c} \phi_4$$

$$\delta r_4^c = -2 \frac{\mu_c^2 r_c^2}{E t_c} \left(\phi_4 - \psi_4 \right)$$

$$\delta r_5^c = 2 \frac{\mu_c r_c^2}{E t_c} \phi_5$$

$$\delta r_6^c = -2 \frac{\mu_c^2 r_c^2}{E t_c} \left(\phi_5 + \psi_5 \right)$$

$$\omega_{z_0}^c = \frac{1}{E t_c} \left[r_c \times \left(P_\ell r_c + \gamma w_c \right) \right]$$

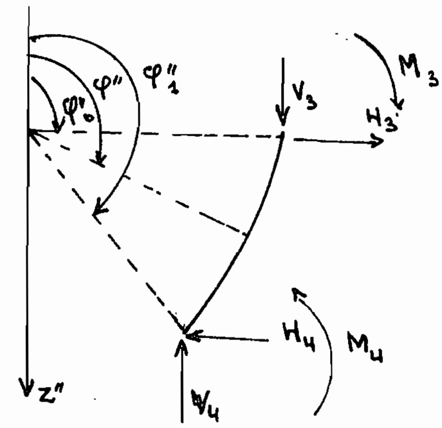
$$\omega_{z_3}^c = -2 \frac{\mu_c^2 r_c^2}{E t_c} \left(\phi_4 + \psi_4 \right)$$

$$\omega_{z_4}^c = -4 \frac{\mu_c^3 r_c^2}{E t_c} \phi_4$$

$$\omega_{z_5}^c = -2 \frac{\mu_c^2 r_c^2}{E t_c} \left(\phi_5 - \psi_5 \right)$$

$$\omega_{z_6}^c = 4 \frac{\mu_c^3 r_c^2}{E t_c} \phi_5$$

2.2.5 Analyse de la Calotte Sphérique Inférieure



H_3, M_3, H_4, M_4 : Forces et Moments d'interaction

V_3 : Poids de la partie supérieure

V_4 : Action sur le Dôme .

En négligeant le poids propre de la calotte sphérique par rapport à la pression exercée par le liquide, et en posant :

$$Ca_1 = \sin\varphi''_0 \left[\frac{\sin\varphi_1}{1+\cos\varphi_1} r_d w_d + \left(\frac{\sin\varphi'_0}{1+\cos\varphi'_0} - \frac{\sin\varphi'_1}{1+\cos\varphi'_1} \right) W_a r_a + W_c h_c \right]$$

$$Ca_2 = (\cos\varphi'' + \sin\varphi'')\,\gamma\, r_{a_1} (h_c + z) \times \frac{1}{r_{a_1}\sin\varphi''} + \gamma\, r_{a_1} (\sin\varphi'' - \cos\varphi'')$$

$$Ca_3 = (1+\nu) \left\{ \frac{1}{r_{a_1}\sin\varphi''} \left[(\sin\varphi'' - \cos\varphi'')(h_c + z'')\,\gamma\, r_{a_1} + \frac{2\cos\varphi''}{\sin^3\varphi''} ca_1 \right] - (\cos\varphi'' + \sin\varphi'')\,\gamma\, r_{a_1} \right\}$$

$$A_4 = -(\cos\varphi'' + \sin\varphi'')(h_c + z'')\,\gamma\, r_{a_1} - \frac{ca_1}{\sin^2\varphi''}$$

$$B_4 = -\cos\varphi''_1 \left\{ -(\cos\varphi''_1 + \sin\varphi''_1) \times \left[(\cos\varphi''_0 - \cos\varphi''_1) r_{a_1} + h_c \right] \gamma r_{a_1} - c_{a_1} / \sin^2\varphi''_1 \right\}$$

$$C_4 = r_{a_1} \left[\gamma (h_c + z)(\sin\varphi'' - \cos\varphi'') \right] - A_4$$

$$D_4 = -r_{a_1} \sin\varphi'' \left\{ \frac{1}{E t_{a_1}} \left[(\sin\varphi^0 - \cos\varphi'')(h_c + z) \gamma r_{a_1} - (1+\nu) A_4 \right] + \rho_7 \right\}$$

$$F_4 = \frac{1}{E t_{a_1}} \left\{ r_{a_1} \sin\varphi'' (c_{a_2} - c_{a_3}) + \cot\varphi'' (1+\nu) \times \left[(\sin\varphi'' - \cos\varphi'') \gamma r_{a_1} (h_c + z) - 2 A_4 \right] \right\}$$

La solution générale sera :

$$N_z^{a_1} = A_4 - 2 C_{f a_1} \mu_{a_1}^3 \sin^2\varphi'' \cos\varphi'' \left[(\alpha_6 - \beta_6)\phi_6 - (\alpha_6 + \beta_6)\psi_6 + (\alpha_7 - \beta_7)\phi_7 + (\alpha_7 + \beta_7)\psi_7 \right]$$

$$N_\theta^{a_1} = C_4 - \frac{E t_{a_1}}{r_{a_1}} \left[\alpha_6 \phi_6 - \beta_6 \psi_6 + \alpha_7 \phi_7 + \beta_7 \psi_7 \right]$$

$$M_z^{a_1} = -2 C_{f a_1} \mu_{a_1}^2 \sin^2\varphi^0 \left[\beta_6 \phi_6 + \alpha_6 \psi_6 + \beta_7 \phi_7 - \alpha_7 \psi_7 \right]$$

$$Q_z^{a_1} = 2 C_{f a_1} \mu_{a_1}^3 \sin^3\varphi'' \left[-(\alpha_6 + \beta_6)\phi_6 + (\alpha_6 + \beta_6)\psi_6 + (\alpha_7 \quad \beta_7)\phi_7 + (\alpha_7 + \beta_7)\psi_7 \right]$$

$$\delta_r^{a_1} = D_4 + \sin\varphi'' \left[\alpha_6 \phi_6 - \beta_6 \psi_6 + \alpha_7 \phi_7 + \beta_7 \psi_7 \right]$$

$$\omega_z^{a_1} = F_4 + \mu_{a_1} \sin\varphi'' \left[(\alpha_6 + \beta_6)\phi_6 + (\alpha_6 - \beta_6)\psi_6 - (\alpha_7 + \beta_7)\phi_7 + (\alpha_7 - \beta_7)\psi_7 \right]$$

sachant que :

$$C_{fa_1} = \frac{E t_{a_1}^3}{12(1-\nu^2)}$$

$$\mu_{a_1} = \left[\frac{3(1-\nu^2)}{\sin^4 \varphi''_1 (r_{a_1} t_{a_1})^3}\right]^{1/4}$$

$$\phi_6 = e^{-\mu_{a_1}(z'''-z'''_0)} \cos\left[\mu_{a_1}(z'''_0 - z''')\right]$$

$$\psi_6 = e^{-\mu_{a_1}(z'''-z'''_0)} \sin\left[\mu_{a_1}(z'''_0 - z''')\right]$$

$$\phi_7 = e^{+\mu_{a_1} z'''} \cos\left[\mu_a(-z''')\right]$$

$$\psi_7 = e^{\mu_{a_1} z'''} \sin\left[-\mu_a z'''\right]$$

D'autre part, les conditions de bordure étant :

Pour $\underline{z'''=0}$
$$\begin{cases} V_c^{a_1} = 0 \\ M_z^{a_1} = V_3 \\ Q_z^{a_1} = H_3 \\ M_z^{a_1} = M_3 \end{cases}$$
et,

Pour $\underline{z'''=z'''_1}$
$$\begin{cases} V_c^{a_1} = 0 \\ N_z^{a_1} \cos\varphi''_1 + Q_z^{a_1} \sin\varphi''_1 = H_4 \\ N_z^{a_1} \sin\varphi''_1 - Q_z^{a_1} \cos\varphi''_1 = V_4 \\ M_z^{a_1} = M_4 \end{cases}$$

D'après les deux dernières relations du premier cas on a :

$$\alpha_6 = -\frac{(H_3 + \mu_{a_1} M_3)}{2 C_{fa_1} \mu_{a_1}^3}$$

$$\beta_6 = -\frac{M_3}{2 C_{fa_1} \mu_{a_1}^2}$$

De même, en nous inspirant de la deuxième et de la dernière relation du second cas, les expressions de α_7 et β_7, s'établiront ainsi :

$$\left|\begin{aligned} \alpha_7 &= \frac{1}{2\, C_{fa_1}\, \mu_{a_1}^3 \sin^2\varphi''_1}\left(-H_4 - \mu_{a_1}\cos 2\varphi''_0\, M_4 + B_4\right) \\ \beta_7 &= -\frac{M_4}{2\, C_{fa_1}\, \mu_{a_1}^2 \sin^2\varphi''_1} \end{aligned}\right.$$

Dès lors, l'état des contraintes pourra se résumer de la façon suivante :

$$\left|\begin{aligned} N_z^{a_1} &= N_{z_0}^{a_1} + N_{z_5}^{a_1} H_3 + N_{z_6}^{a_1} M_3 + N_{z_7}^{a_1} H_4 + N_{z_8}^{a_1} M_4 \\ N_\theta^{a_1} &= N_{\theta_0}^{a_1} + N_{\theta_5}^{a_1} H_3 + N_{\theta_6}^{a_1} M_3 + N_{\theta_7}^{a_1} H_4 + N_{\theta_8}^{a_1} M_4 \\ M_z^{a_1} &= M_{z_0}^{a_1} + M_{z_5}^{a_1} H_3 + M_{z_6}^{a_1} M_3 + M_{z_7}^{a_1} H_4 + M_{z_8}^{a_1} M_4 \\ Q_z^{a_1} &= Q_{z_0}^{a_1} + Q_{z_5}^{a_1} H_3 + Q_{z_6}^{a_1} M_3 + Q_{z_7}^{a_1} H_4 + Q_{z_8}^{a_1} M_4 \\ \delta_r^{a_1} &= \delta_{r_0}^{a_1} + \delta_{r_5}^{a_1} H_3 + \delta_{r_6}^{a_1} M_3 + \delta_{r_7}^{a_1} H_4 + \delta_{r_8}^{a_1} M_4 \\ \omega_z^{a_1} &= \omega_{z_0}^{a_1} + \omega_{z_5}^{a_1} H_3 + \omega_{z_6}^{a_1} M_3 + \omega_{z_7}^{a_1} H_4 + \omega_{z_8}^{a_1} M_4 \end{aligned}\right.$$

Dans ce système,

$$\left|\begin{aligned} N_{z_0}^{a_1} &= A_4 - \frac{B_4 \sin^2\varphi'' \cos\varphi''}{\sin^2\varphi''_1 \cos 2\varphi''_0}\left(\phi_7 + \psi_7\right) \\ N_{z_5}^{a_1} &= \sin^2\varphi'' \cos\varphi''\left(\phi_6 - \psi_6\right) \\ N_{z_6}^{a_1} &= -2\sin^2\varphi'' \cos\varphi''\, \mu_{a_1}\, \psi_6 \\ N_{z_7}^{a_1} &= -\frac{\sin^2\varphi'' \cos\varphi''}{\cos 2\varphi''_0 \sin^2\varphi''_1}\left(\phi_7 + \psi_7\right) \\ N_{z_8}^{a_1} &= 2 \times \frac{\sin^2\varphi'' \cos\varphi''}{\sin^2\varphi''_1}\, \mu_{a_1}\, \psi_7 \end{aligned}\right.$$

$$N_{\theta_0}^{a_1} = C_4 + \frac{E t_{a_1}}{r_{a_1}} \left(\frac{B_4}{2 c_{f a_1} \mu_{a_1}^3 \sin^2 \varphi''_1} \right) \phi_7 \times \left(- \frac{1}{\cos 2\varphi''_0} \right)$$

$$N_{\theta_6}^{a_1} = \frac{E t_{a_1}}{r_{a_1}} \left(\frac{1}{2 c_{f a_1} \mu_{a_1}^2} \right) \left(\phi_6 - \psi_6 \right)$$

$$N_{\theta_5}^{a_1} = \frac{E t_{a_1}}{r_{a_1}} \left(\frac{1}{2 c_{f a_1} \mu_{a_1}^3} \right) \phi_6$$

$$N_{\theta_7}^{a_1} = + \frac{E t_{a_1}}{r_{a_1}} \left(\frac{1}{2 c_{f a_1} \mu_{a_1}^3 \sin^2 \varphi''_1} \right) \phi_7 \times \left(\frac{1}{\cos 2\varphi''_0} \right)$$

$$N_{\theta_8}^{a_1} = \frac{E t_{a_1}}{r_{a_1}} \left(\frac{1}{2 c_{f a_1} \mu_{a_1}^2 \sin^2 \varphi''_1} \right) \left(\phi_7 + \psi_7 \right)$$

$$M_{z_0}^{a_1} = + \sin^2 \varphi'' \left(\frac{B_4}{\mu_{a_1} \sin^2 \varphi''_1} \right) \psi_7 \times \left(\frac{1}{\cos 2\varphi''_0} \right)$$

$$M_{z_5}^{a_1} = \sin^2 \varphi'' \left(\frac{1}{\mu_{a_1}} \right) \psi_6$$

$$M_{z_6}^{a_1} = \sin^2 \varphi'' \left(\phi_6 + \psi_6 \right)$$

$$M_{z_7}^{a_1} = - \sin^2 \varphi'' \left(\frac{1}{\mu_{a_1} \sin^2 \varphi''_1} \right) \psi_7 \times \left(\frac{1}{\cos 2\varphi''_0} \right)$$

$$M_{z_8}^{a_1} = \sin^2 \varphi'' \left(\frac{1}{\sin^2 \varphi''_1} \right) \left(\phi_7 - \psi_7 \right)$$

$$Q_{z_0}^{a_1} = + \sin^3 \varphi'' \left(\frac{B_4}{\sin^2 \varphi''_1} \right) \left(\phi_7 + \psi_7 \right) \times \left(\frac{1}{\cos 2\varphi''_0} \right)$$

$$Q_{z_5}^{a_1} = \sin^3 \varphi'' \left[\phi_6 - \psi_6 \right]$$

$$Q_{z_6}^{a_1} = - 2 \mu_{a_1} \sin^3 \varphi'' \psi_6$$

$$Q_{z_7}^{a_1} = - \frac{\sin^3 \varphi''}{\sin^2 \varphi''_1} \left(\phi_7 + \psi_7 \right) \times \left(\frac{1}{\cos 2\varphi''_0} \right)$$

$$Q_{z_8}^{a_1} = -2\mu_{a_1} \times \frac{\sin^3\varphi''}{\sin^2\varphi''_1}\,\Psi_7$$

$$\delta_{r_0}^{a_1} = D_4 + \sin\varphi''\left(\frac{B_4}{2c_{fa_1}\mu_{a_1}^2\sin^2\varphi''_1}\right)\phi_7 \times \left(\frac{1}{\cos 2\varphi''_0}\right)$$

$$\delta_{r_5}^{a_1} = -\sin\varphi'' \times \left(\frac{1}{2c_{fa_1}\mu_{a_1}^3}\right)\phi_6$$

$$\delta_{r_6}^{a_1} = -\sin\varphi'' \times \left(\frac{1}{2c_{fa_1}\mu_{a_1}^2}\right)(\phi_6 - \psi_6)$$

$$\delta_{r_7}^{a_1} = -\sin\varphi''\left(\frac{1}{2c_{fa_1}\mu_{a_1}^3\sin^2\varphi''_1}\right)\phi_7 \times \left(\frac{1}{\cos 2\varphi''_0}\right)$$

$$\delta_{r_8}^{a_1} = -\sin\varphi''\left(\frac{1}{2c_{fa_1}\mu_{a_1}^2\sin^2\varphi''_1}\right)(\phi_7 + \psi_7)$$

$$\omega_{z_0}^{a_1} = F_4 + \frac{\sin\varphi''}{\cos 2\varphi''_0}\left(\frac{B_4}{2c_{fa_1}\mu_{a_1}^2\sin^2\varphi''_1}\right)(\phi_7 - \psi_7)$$

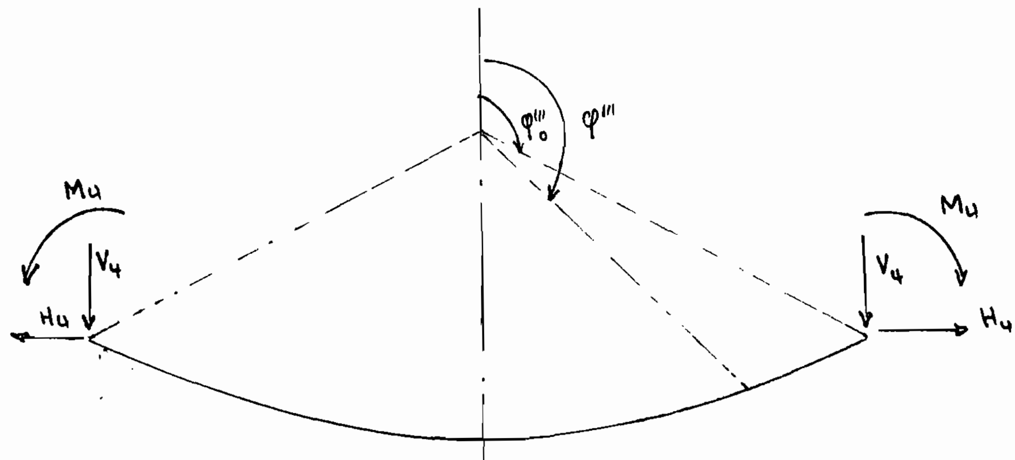
$$\omega_{z_5}^{a_1} = -\sin\varphi''\left(\frac{1}{2c_{fa_1}\mu_{a_1}^2}\right)(\phi_6 + \psi_6)$$

$$\omega_{z_6}^{a_1} = -\sin\varphi''\left(\frac{1}{c_{fa_1}\mu_{a_1}}\right)\phi_6$$

$$\omega_{z_7}^{a_1} = +\frac{\sin\varphi''}{\cos 2\varphi''_0}\left(\frac{1}{2c_{fa_1}\mu_{a_1}^2\sin^2\varphi''_1}\right)(\phi_7 - \psi_7)$$

$$\omega_{z_8}^{a_1} = 2\sin\varphi''\left(\frac{1}{2c_{fa_1}\mu_{a_1}\sin^2\varphi''_1}\right)\phi_7$$

2.2.6 Analyse du Dome Sphérique inférieur



$$w_{d1} = t_{d1}\gamma_m + \left[h_c - r_{a1}\cos\varphi'_1 + r_{d1}(1+\cos\varphi'''_0)\right]\gamma_L$$

V_4 : Poids de l'ensemble 'dome supérieur - anneau - cylindre - calotte sphérique inférieure'

H_4, M_4 : Force et moment d'interaction

w_{d1} : Réaction du sol.

La charge w_{d1} étant engendrée par l'action du poids propre du dome inferieur et de la pression exercée par l'eau, elle jouerait le même rôle que celui de w_d dans l'étude du dôme supérieur. Et, pour s'en apercevoir, il suffit de renverser la structure qui, pour les besoins de l'analyse, ~~sera soumise~~ sera soumise aux forces d'interaction et à w_{d1}.

Soient, pour ce faire, les relations suivantes :

$$d_{a1} = \sin^2\varphi_0''' \left[\frac{r_{a1} W_{a1}}{(1+\cos\varphi_1'')} + \frac{c_{a1}}{\sin^2\varphi_1''} \right]$$

$$d_{a2} = -\frac{\sin\varphi'''}{(1+\cos\varphi''')^2} r_{d_1} W_{d_1} + 2\frac{\cos\varphi'''}{\sin^3\varphi'''} d_{a1}$$

$$A_5 = -\frac{r_{d_1} W_{d_1}}{1+\cos\varphi'''} - \frac{\sin^2\varphi_0'''}{\sin^2\varphi'''} \left[\frac{r_{a1} W_{a1}}{(1+\cos\varphi_1'')} + \frac{c_{a1}}{\sin^2\varphi_1''} \right]$$

$$B_5 = W_{d_1} r_{d_1} \cos\varphi''' - \frac{A_5}{\sin^2\varphi'''}$$

$$d_{a3} = -W_{d_1} r_{d_1} \sin\varphi''' - \left(\gamma + \frac{1}{\sin^2\varphi'''}\right) d_{a2} + 2\frac{\cos\varphi'''}{\sin^3\varphi'''} A_5$$

$$D_5 = -r_{d_1}\sin\varphi''' \left\{ \frac{1}{E t_d} \left[W_{d_1} r_{d_1}\cos\varphi''' - \left(\gamma + \frac{1}{\sin^2\varphi'''}\right) A_5 \right] + \rho_T \right\}$$

$$F_5 = \frac{1}{E t_d} \left\{ d_{a3} + \cot\varphi'''(1+\gamma) \left[W_{d_1} r_{d_1}\cos\varphi''' - \left(1 + \frac{1}{\sin^2\varphi'''}\right) A_5 \right] \right\}$$

La solution générale équivaut au système ci-dessous :

$$N_z^{d_1} = A_5 - 2C_{f_{d_1}} \mu_{d_1}^3 \sin^2\varphi_0''' \cos\varphi_0''' \left[(\alpha_8 - \beta_8)\phi_8 + (\alpha_8 + \beta_8)\psi_8 \right]$$

$$N_\theta^{d_1} = B_5 - \frac{E t_{d_1}}{r_{d_1}} (\alpha_8 \phi_8 + \beta_8 \psi_8)$$

$$M_z^{d_1} = -2 C_{f_{d_1}} \mu_{d_1}^2 \sin^2\varphi_0''' (\beta_8 \phi_8 - \alpha_8 \psi_8)$$

$$Q_z^{d_1} = 2 C_{f_{d_1}} \mu_{d_1}^3 \sin^3\varphi_0''' \left[(\alpha_8 - \beta_8)\phi_8 + (\alpha_8 + \beta_8)\psi_8 \right]$$

$$\delta_r^{d_1} = D_5 + E t_{d_1} \sin\varphi_0''' (\alpha_8 \phi_8 + \beta_8 \psi_8)$$

$$\omega_z^{d_1} = F_5 - E t_{d_1} \mu_{d_1} \sin\varphi_0''' \left[(\alpha_8 + \beta_8)\phi_8 - (\alpha_8 - \beta_8)\psi_8 \right]$$

où :

$$\begin{cases} \phi_8 = e^{\mu_{d_1}(z_d - z_{d_0})} \cos\left[\mu_{d_1}(z_d - z_{d_0})\right] \\ \psi_8 = e^{\mu_{d_1}(z_d - z_{d_0})} \sin\left[\mu_{d_1}(z_d - z_{d_0})\right] \end{cases}$$

$$\begin{cases} c_{f d_1} = \dfrac{E\, t_{d_1}^3}{12(1-\nu^2)} \\ \mu_{d_1} = \left[\dfrac{3(1-\nu^2)}{\sin^4 \varphi_0''' \; (r_d t_d)^3}\right]^{1/4} \end{cases}$$

Les conditions de bordure étant :

$$\text{Pour } z_d = 0 \quad \begin{cases} N_c^{d_1} = 0 \\ N_z^{d_1} \cos\varphi_0''' + Q_z^{d_1} \sin\varphi_0''' = H_4 \\ V_4 = N_z^{d_1} \sin\varphi_0''' - Q_z^{d_1} \cos\varphi_0''' \\ M_4 = M_z^{d_1} \end{cases}$$

, les coefficients α_8 et β_8 s'obtiennent à l'aide des 2e et 3e relations. Ce qui donne :

$$\begin{cases} \beta_8 = - \dfrac{M_4}{2 c_{f d_1} \mu_{d_1}^2 \sin^2 \varphi_0'''} \\ \alpha_8 = \dfrac{(-H_4 + A \cos\varphi_0''' - \cos 2\varphi_0''' \, \mu_{d_1} M_4)}{2 c_{f d_1} \mu_{d_1}^3 \cos 2\varphi_0''' \sin^2 \varphi_0'''} \end{cases}$$

Ce qui nous permettra de résumer l'état des contraintes comme suit :

$$
\left|
\begin{aligned}
N_z^{d_1} &= N_{z_0}^{d_1} + N_{z_7}^{d_1} H_4 + N_{z_8}^{d_1} M_4 \\
N_\theta^{d_1} &= N_{\theta_0}^{d_1} + N_{\theta_7}^{d_1} H_4 + N_{\theta_8}^{d_1} M_4 \\
M_z^{d_1} &= M_{z_0}^{d_1} + M_{z_7}^{d_1} H_4 + M_{z_8}^{d_1} M_4 \\
Q_z^{d_1} &= Q_{z_0}^{d_1} + Q_{z_7}^{d_1} H_4 + Q_{z_8}^{d_1} M_4 \\
\delta_r^{d_1} &= \delta_{r_0}^{d_1} + \delta_{r_7}^{d_1} H_4 + \delta_{r_8}^{d_1} M_4 \\
\omega_z^{d_1} &= \omega_{z_0}^{d_1} + \omega_{z_7}^{d_1} H_4 + \omega_{z_8}^{d_1} M_4
\end{aligned}
\right.
$$

Avec :

$$
\left|
\begin{aligned}
N_{z_0}^{d_1} &= A_5 \left[1 - \frac{\cos^2 \varphi_0'''}{\cos 2\varphi_0'''} (\phi_8 + \psi_8) \right] \\
N_{z_7}^{d_1} &= \frac{\cos \varphi_0'''}{\cos 2\varphi_0'''} (\phi_8 + \psi_8) \\
N_{z_8}^{d_1} &= 2 \cos \varphi_0''' \, \mu_{d_1} \psi_8
\end{aligned}
\right.
$$

$$
\left|
\begin{aligned}
N_{\theta_0}^{d_1} &= B_5 - \frac{E t_{d_1}}{r_{d_1}} \left[\frac{A_5 \cos \varphi_0'''}{2 c_{f d_1} \mu_{d_1}^3 \sin^2 \varphi_0''' \cos 2\varphi_0'''} \phi_8 \right] \\
N_{\theta_7}^{d_1} &= \frac{E t_{d_1}}{r_{d_1}} \left[\frac{1}{2 c_{f d_1} \mu_{d_1}^3 \sin^2 \varphi_0''' \cos 2\varphi_0'''} \right] \phi_8 \\
N_{\theta_8}^{d_1} &= \frac{E t_{d_1}}{r_{d_1}} \left[\frac{1}{2 c_{f d_1} \mu_{d_1}^2 \sin^2 \varphi_0'''} \right] (\phi_8 + \psi_8)
\end{aligned}
\right.
$$

$$
\left|
\begin{aligned}
M_{z_0}^{d_1} &= \frac{A_5 \cos \varphi_0'''}{\mu_{d_1} \cos 2\varphi_0'''} \psi_8 \\
M_{z_7}^{d_1} &= - \frac{1}{\mu_{d_1} \cos 2\varphi_0'''} \psi_8 \\
M_{z_8}^{d_1} &= \phi_8 - \psi_8
\end{aligned}
\right.
$$

$$Q_{z_0}^{d_1} = A_5 \frac{\sin\varphi_0''' \cos\varphi_0'''}{\cos 2\varphi_0'''} \left(\phi_8 + \psi_8 \right)$$

$$Q_{z_7}^{d_1} = -\sin\varphi_0''' \left(\phi_8 + \psi_8 \right) \times \frac{1}{\cos 2\varphi_0'''}$$

$$Q_{z_8}^{d_1} = -2 \mu_{d_1} \sin\varphi_0''' \, \psi_8$$

$$\delta_{r_0}^{d_1} = D_5 + \frac{E t_{d_1}}{2 c_{f d_1} \mu_{d_1}^3 \sin\varphi_0'''} \left(\frac{A_5 \cos\varphi_0'''}{\cos 2\varphi_0'''} \right) \phi_8$$

$$\delta_{r_7}^{d_1} = -\frac{E t_{d_1}}{2 c_{f d_1} \mu_{d_1}^3 \sin\varphi_0''' \cos 2\varphi_0'''} \phi_8$$

$$\delta_{r_8}^{d_1} = -\frac{E t_{d_1}}{2 c_{f d_1} \mu_{d_1}^2 \sin\varphi_0'''} \left(\phi_8 + \psi_8 \right)$$

$$\omega_{z_0}^{d_1} = F_5 - \frac{E t_{d_1}}{2 c_{f d_1} \mu_{d_1}^2 \sin\varphi_0'''} \left(\frac{A_5 \cos\varphi_0'''}{\cos 2\varphi_0'''} \right) \left(\phi_8 - \psi_8 \right)$$

$$\omega_{z_7}^{d_1} = \frac{E t_{d_1}}{2 c_{f d_1} \mu_{d_1}^2 \sin\varphi_0''' \cos 2\varphi_0'''} \left(\phi_8 - \psi_8 \right)$$

$$\omega_{z_8}^{d_1} = \frac{E t_{d_1}}{c_{f d_1} \mu_{d_1} \sin\varphi_0'''} \phi_8$$

2.2.7 Calcul des Forces d'Interaction

Compte tenu de la compatibilité des déformations aux liaisons supprimées, avec celles de la structure réelle, nous devons avoir une égalité des déplacements radiaux et des rotations dans le plan méridien, aux points A_1, A_2, A_3, A_4. Et, pour que cela soit possible, il faudra que, les forces d'interactions, desquelles émanent ces déformations, vérifient les relations suivantes:

$$
\left|
\begin{array}{l}
\delta_r^d(z_1) = \delta_r^a(z'=0) \\
\omega_z^d(z_1) = \omega_z^a(z'=0) \\
\delta_r^a(z'_1) = \delta_r^c(z''=0) \\
\omega_z^a(z'_1) = \omega_z^c(z''=0) \\
\delta_r^c(z''_1) = \delta_r^{a_1}(z'''=0) \\
\omega_z^c(z''_1) = \omega_z^{a_1}(z'''=0) \\
\delta_r^{a_1}(z'''=z'''_1) = 0 \\
\omega_z^{a_1}(z'''=z'''_1) = 0 \\
\delta_r^{d_1}(z^{(IV)}=0) = 0 \\
\omega_z^{d_1}(z^{(IV)}=0) = 0
\end{array}
\right.
$$

Mais, avec l'amortissement rapide des solutions d'effet de bordure, (H_3, M_3) et (H_2, M_2) n'influent pratiquement pas sur (respectivement) les rebords supérieurs et inférieur du cylindre.

Ainsi, le système ci-dessus, se traduira par :

$$\left[\delta r_1^d(z=z_1)-\delta r_1^a(z'=0)\right]H_1+\left[\delta r_2^d(z=z_1)-\delta r_2^a(z'=0)\right]M_1-$$
$$\delta r_3^a(z'=0)H_2-\delta r_4^a(z'=0)M_2=\delta r_0^a(z'=0)-\delta r_0^d(z=z_1)$$

$$\left[\omega_{z_1}^d(z=z_1)-\omega_{z_1}^a(z'=0)\right]H_1+\left[\omega_{z_2}^d(z=z_1)-\omega_{z_2}^a(z'=0)\right]M_1-$$
$$\omega_{z_3}^a(z'=0)H_2-\omega_{z_4}^a(z'=0)M_2=\omega_{z_0}^a(z'=0)-\omega_{z_0}^d(z=z_1)$$

$$-\delta r_1^a(z'=z'_1)H_1-\delta r_2^a(z'=z'_1)M_1+\left[\delta r_3^c(z''=0)-\delta r_3^a(z'=z'_1)\right]H_2$$
$$+\left[\delta r_4^c(z''=0)-\delta r_4^a(z'=z'_1)\right]M_2=\delta r_0^a(z'=z'_1)-\delta r_0^c(z''=0)$$

$$-\omega_{z_1}^a(z'=z'_1)H_1-\omega_{z_2}^a(z'=z'_1)M_1+\left[\omega_{z_3}^c(z''=0)-\omega_{z_3}^a(z'=z'_1)\right]H_2$$
$$+\left[\omega_{z_4}^c(z''=0)-\omega_{z_4}^a(z'=z'_1)\right]M_2=\omega_{z_0}^a(z'=z'_1)-\omega_{z_0}^c(z''=0)$$

$$\left[\delta r_5^{a_1}(z'''=0)-\delta r_5^c(z''=h_c)\right]H_3+\left[\delta r_6^{a_1}(z'''=0)-\delta r_6^c(z''=h_c)\right]M_3$$
$$+\delta r_7^{a_1}(z'''=0)H'_4+\delta r_8^{a_1}(z'''=0)M'_4=\delta r_0^c(z''=h_c)-\delta r_0^{a_1}(z'''=0)$$

$$\left[\omega_{z_5}^{a_1}(z'''=0)-\omega_{z_5}^c(z''=h_c)\right]H_3+\left[\delta r_6^{a_1}(z'''=0)-\delta r_6^c(z''=h_c)\right]M_3$$
$$+\omega_{z_7}^{a_1}(z'''=0)H'_4+\omega_{z_8}^{a_1}(z'''=0)M'_4=\omega_{z_0}^c(z''=h_c)-\omega_{z_0}^{a_1}(z'''=0)$$

$$\delta r_5^{a_1}H_3+\delta r_6^{a_1}M_3+\delta r_7^{a_1}H'_4+\delta r_8^{a_1}M'_4=-\delta r_0^{a_1}$$
$$\omega_{z_5}^{a_1}H_3+\omega_{z_6}^{a_1}M_3+\omega_{z_7}^{a_1}H'_4+\omega_{z_8}^{a_1}M'_4=-\omega_{z_0}^{a_1}$$

$$\delta r_7^{d_1}(z^{(IV)}=0)H''_4+\delta r_8^{d_1}M''_4=-\delta r_0^{d_1}$$
$$\omega_{z_7}^{d_1}(z^{(IV)}=0)H''_4+\omega_{z_8}^{d_1}(z^{(IV)}=0)M''_4=-\omega_{z_0}^{d_1}$$

Ce qui pourrait se résumer sous la forme suivante :

$$[FL] \times [B_1] = [FO]$$
$$[AMR] \times [B_2] = [RO]$$
$$[MI] \times [B_3] = [RO_1]$$

- $[FL]$, $[AMR]$, $[MI]$ sont des matrices de flexibilité telles que :

$$
\left|
\begin{array}{l}
FL(1,1) = \delta r_1^d (z_1) - \delta r_1^a (z'=0) \\
FL(1,2) = \delta r_2^d (z_2) - \delta r_2^a (z'=0) \\
FL(1,3) = -\delta r_3^a (z'=0) \\
FL(1,4) = -\delta r_4^a (z'=0) \\
FL(2,1) = \omega_{z_1}^d (z_1) - \omega_{z_1}^a (z'=0) \\
FL(2,2) = \omega_{z_2}^d (z_1) - \omega_{z_2}^a (z'=0) \\
FL(2,3) = -\omega_{z_3}^d (z'=0) \\
FL(2,4) = -\omega_{z_4}^a (z'=0) \\
FL(3,1) = -\delta r_1^a (z'_1) \\
FL(3,2) = -\delta r_2^a (z'_1) \\
FL(3,3) = \delta r_3^c (z''=0) - \delta r_3^a (z'_1) \\
FL(3,4) = \delta r_4^c (z''=0) - \delta r_4^a (z'_1) \\
FL(4,1) = -\omega_{z_1}^a (z'_1) \\
FL(4,2) = -\omega_{z_2}^a (z'_1) \\
FL(4,3) = \omega_{z_3}^c (z''=0) - \omega_{z_3}^a (z'_1) \\
FL(4,4) = \omega_{z_4}^c (z''=0) - \omega_{z_4}^a (z'_1)
\end{array}
\right.
$$

$$
\left|
\begin{array}{l}
AMR(1,1) = \delta r_5^{a1} (z'''=0) - \delta r_5^{a1} (z''=z''_1) \\
AMR(1,2) = \delta r_6^{a1} (z'''=0) - \delta r_6^c (z''_1) \\
AMR(1,3) = \delta r_7^{a1} (z'''=0)
\end{array}
\right.
$$

$$
\begin{aligned}
AMR(1,4) &= \delta r_8^{a_1}\ (z'''=0)\\
AMR(2,1) &= \omega_{z5}^{a_1}\ (z'''=0) - \omega_{z5}^{c}\ (z''_1)\\
AMR(2,2) &= \omega_{z6}^{a_1}\ (z'''=0) - \omega_{z6}^{c}\ (z''_1)\\
AMR(2,3) &= \omega_{z7}^{a_1}\ (z'''=0)\\
AMR(2,4) &= \omega_{z8}^{a_1}\ (z'''=0)\\
AMR(3,1) &= \delta r_5^{a_1}\ (z'''_1)\\
AMR(3,2) &= \delta r_6^{a_1}\ (z''_1)\\
AMR(3,4) &= \delta r_7^{a_1}\ (z'''_1)\\
AMR(4,1) &= \omega_{z5}^{a_1}\ (z'''_1)\\
AMR(4,2) &= \omega_{z6}^{a_1}\ (z'''_1)\\
AMR(4,3) &= \omega_{z7}^{a_1}\ (z'''_1)\\
AMR(4,4) &= \omega_{z8}^{a_1}\ (z'''_1)
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
MI(1,1) &= \delta r_7^{d_1}\ (z^{(IV)}=0)\\
MI(1,2) &= \delta r_8^{d_1}\ (z^{(IV)}=0)\\
MI(2,1) &= \omega_{z7}^{d_1}\ (z^{(IV)}=0)\\
MI(2,2) &= \omega_{z8}^{d_1}\ (z^{(IV)}=0)
\end{aligned}
$$

• Les matrices : $[B_i]$ représentent les inconnues

$$
\begin{aligned}
B_1(1) &= H_1 \\
B_1(2) &= M_1 \\
B_1(3) &= H_2 \\
B_1(4) &= M_2
\end{aligned}
\qquad\qquad
\begin{aligned}
B_2(1) &= H_3 \\
B_2(2) &= M_3 \\
B_2(3) &= H'_4 \\
B_2(4) &= M'_4
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
B_3(1) &= H''_4 \\
B_3(2) &= M''_4
\end{aligned}
\quad ; \quad \underline{\text{avec}} \quad
\begin{aligned}
H'_4 + H''_4 &= H_4 \\
M'_4 + M''_4 &= M_4
\end{aligned}
$$

• Quant aux matrices [FO], [RO], [RO1], elles correspondent aux vecteurs-charges dont les éléments sont :

$$
\left|
\begin{array}{l}
FO(1) = -\delta_{r_0}^{d}(z_1) + \delta_{r_0}^{a}(z'=0) \\
FO(2) = \omega_{z_0}^{a}(z'=0) - \omega_{z_0}^{d}(z_1) \\
FO(3) = \delta_{r_0}^{a}(z'=z'_1) - \delta_{r_0}^{c}(z''=0) \\
FO(4) = \omega_{z_0}^{a}(z'=z'_1) - \omega(z''=0)
\end{array}
\right.
$$

$$
\left|
\begin{array}{l}
RO(1) = \delta_{r_0}^{c}(z''=hc) - \delta_{r_0}^{a1}(z'''=0) \\
RO(2) = \omega_{z_0}^{c}(z''=hc) - \omega_{z_0}^{a1}(z'''=0) \\
RO(3) = -\delta_{r_0}^{a1}(z'''=z'''_1) \\
RO(4) = -\omega_{z_0}^{a1}(z'''=z'''_1)
\end{array}
\right.
$$

CHAPITRE 3

Programme

(Description)

3.1 Fonctionnement du Programme

Le programme, procède, à partir des données générales, au calcul des forces d'interaction, à partir desquelles, la détermination des contraintes et déplacements, pour chacune des parties, est rendue possible.
Cependant, le principe de fonctionnement est illustré, d'une manière plus détaillée, dans l'organigramme présent en Annexe I

3.2 Fonctions des sous routines

Vu les différents systèmes établis pour symboliser l'état des contraintes, nous nous apercevons qu'il est possible de résumer celui-ci, pour les différents éléments de la structure.
Ainsi, si nous appelons par :

- [FD], [FA], [FC], [FAI], [FDI], les contraintes, les moments ou les déplacements
- [VD], [VA], [VC], [VAI], [VDI], les vecteurs charges
- [DM], [AM], [CM], [AMI], [DMI], les vecteurs renfermant les coefficients correspondant aux éléments d'interaction, nous aurons pour :

<u>le dome supérieur</u>

$$FD(I) = VD(I) + DM(I,1)\,H_1 + DM(I,2)\,M_1$$

L'anneau

$$FA(I) = VA(I) + AM(I,1)\,H_1 + AM(I,2)\,M_1 + AM(I,3)\,H_2 + AM(I,4)\,M_2$$

Le Cylindre

$$FC(I) = VC(I) + CM(I,1)\,H_2 + CM(I,2)\,M_2 + CM(I,3)\,H_3 + CM(I,4)\,M_3$$

La Calotte sphèrique Inferieure

$$FAI(I) = VAI(I) + AMI(I,1)\,H_3 + AMI(I,2)\,M_3 + AMI(I,3)\,H_4 + AMI(I,4)\,M_4$$

Le Dome sphèrique inférieur

$$FDI(I) = VDI(I) + DMI(I,1)\,H_4 + DM(I,2)\,M_4$$

A partir de ces différents considérations :

- Les vecteurs charges seront obtenus à l'aide des sous routines Vchad, Vchaa, Vchac, Vchaai, Vchadi.
- [DM], [AM], [CM], [AMI], [DMI], sont déterminés à partir de Matd, Mata, Matc, Matai, Matdi.

Quant aux autres, nous avons :

- Flex et bac qui servent à l'établissement de [FL] et [AMR], nécessaires à la confection de la matrice de rigidité générale.
- Cf0, CR0 calculent [F0] et [R0] qui entrent en ligne de compte pour [Vfq]
- Resol, est un outil pour la résolution des systèmes d'équations, et est basée sur la théorie de GAUSS.

CHAPITRE 4

Design

4.1 Détermination du Moment de Rupture

En nous référant à la thèse de Maîtrise de Me. MOUSTAPHA NDIAYE, le moment de rupture nous est donné par la relation suivante :

$$M = \frac{b d_s^3}{33} f'_m + \sum_{i=1}^{n} n_{si} A_s y_i f_{si}$$

- Cylindre

Supposons un enrobage de 2 mm et assimilons la section à celle d'une poutre rectangulaire de largeur unitaire b. En adoptant des fils de 1mm de diamètre pour les 3 couches de renforcement, nous aurons :

$$c = k_u d_s^3 = 0,35 (25-2-0,5) = 7,88 \text{ mm}$$

$$d_1 = 7,88 - 2 - 0,5 = 5,38 \text{ mm}$$

$$d_2 = 12,5 - 0,5 = 12 \text{ mm}$$

$$d_3 = 22,5 \text{ mm}$$

D'autre part, $\frac{\varepsilon_{s1}}{(d_1 - c)} = \frac{0,006}{7,88} \Rightarrow \varepsilon_{s1} = 0,002$

$$\frac{\varepsilon_{s2}}{y_2} = \frac{0,006}{c} = \frac{\varepsilon_{s3}}{y_3}$$

or $y_i = d_i - c$, on a $y_1 = -2,5$ mm

$y_2 = 4,12$ mm , $y_3 = 14,62$ mm

$\Rightarrow \varepsilon_{s2} = 0,003$ $\quad \varepsilon_{s3} = 0,011$

$\varepsilon_{si} > 0,0016$, $f_{si} = 240 + 15660 \, \varepsilon_{si}$

$\underline{f_{s1} = -271 \text{ MPa}}$ $\quad \underline{f_{s2} = 287 \text{ MPa}}$ $\quad \underline{f_{s3} = 412 \text{ MPa}}$

d'où

$$M = 2.1 \cdot 10^{-2} \text{ kN.m} > 0.1 \times 0,025 = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ kN.m}$$

le moment est donc vérifié pour le cylindre $(f'_c = 35 \text{ MPa})$

• <u>Anneau</u>

Avec les mêmes considérations que précédemment,

$c = 0{,}35(15 - 2 - 0{,}5) = 4{,}38$ mm

En prenant 2 couches de renforcement, on a :

$d_1 = 4{,}38 - 2 - 0{,}5 = 1{,}88$ mm

$d_2 = 15 - 2 - 0{,}5 = 12{,}5$ mm.

$y_i = d_i - c \Rightarrow \underline{y_1 = -2{,}5 \text{ mm}} \qquad \underline{y_2 = 8{,}12 \text{ mm}}$

$\frac{\varepsilon_{s1}}{y_1} = \frac{\varepsilon_{s2}}{y_2} = \frac{\varepsilon_3}{y_3} = \frac{0{,}006}{4{,}38}$ d'où

$\varepsilon_{s1} = 0{,}003 \qquad \varepsilon_{s2} = 0{,}011$

$\underline{f_{s1} = -287 \text{ MPa}} \qquad \underline{f_{s2} = 412 \text{ MPa}}$

$f'_m = 35$ MPa , $M = 5 \cdot 10^{-3}$ kN $> 0{,}98 \cdot 10^{-1} \times 0{,}015 = 1{,}4 \cdot 10^{-3}$

• <u>Dome Supérieur</u>

Comme pour l'anneau, $c = 0{,}35(10 - 2 - 0{,}5) = 2{,}62$

$d_1 = 2{,}62 - 2{,}5 = 0{,}12$ mm

$d_2 = 10 - 2 - 0{,}5 = 7{,}5$ mm

$y_1 = -2{,}5$ mm $\qquad y_2 = 4{,}88$ mm

$\varepsilon_{s1} = 0{,}006 \qquad \varepsilon_{s2} = 0{,}011$

$f_{s1} = 334$ MPa $\qquad f_{s2} = 412$ MPa

d'où $M = 3 \cdot 10^{-3}$ kN m $> 0{,}87 \cdot 10^{-2} \times 0{,}01 = 9 \cdot 10^{-4}$

4.2 Contraintes à la première fissuration

D'après la publication de LOGAN et SHAH, datant de décembre 1973, la contrainte à la première fissuration nous est donnée par :

$$f_{1st} = 11,032\ S_{LT} + f_m$$

S_{LT} : = surface spécifique = surface de contact de l'armature longitudinale sur le volume du mortier.

$f_m = 0,5 \sqrt{f'_c}$ $\qquad f'_c = 35$ MPa.

- Bouée supérieure

  $S_{LT} = 0,3\ mm/mm^2$, $f_{1st} = 6268\ kN/m^2 \times 0,01 = 62,8\ kN/m$

  ce qui est supérieur à $27\ kN/m$

- Anneau

  $S_{LT} = 0,2$, $f_{1st} = 5160\ kN/m^2$

  $5160 \times 0,015 = 77,5\ kN/m > 46\ kN/m$

- Cylindre

  $S_{LT} = 0,12$, $f_{1st} = 4280\ kN/m^2$

  $4280 \times 0,025 = 107\ kN/m$

  mais, le nombre de couches étant de 3, on a :

  $321 = 3 \times 107\ kN/m > 164\ kN/m$

Il ressort de ces résultats que nous sommes loin de la contrainte de fissuration.

ÇHAPITRE 5

Conclusion et Recommandations

5.1 CONCLUSION

Au regard des faibles épaisseurs trouvées pour les parties supérieures du Réservoir, et en raison des propriétés mécaniques du Ferrociment, il est possible d'avancer, bien que le projet soit inachevé, que ce matériau peut trouver toute la place qui lui est requise, dans un pays comme le nôtre.
Cela est d'autant plus justifié qu'il s'adapte à de multiples types de constructions, demeure très compétitif par rapport à l'acier importé, et reste plus durable que le bois.

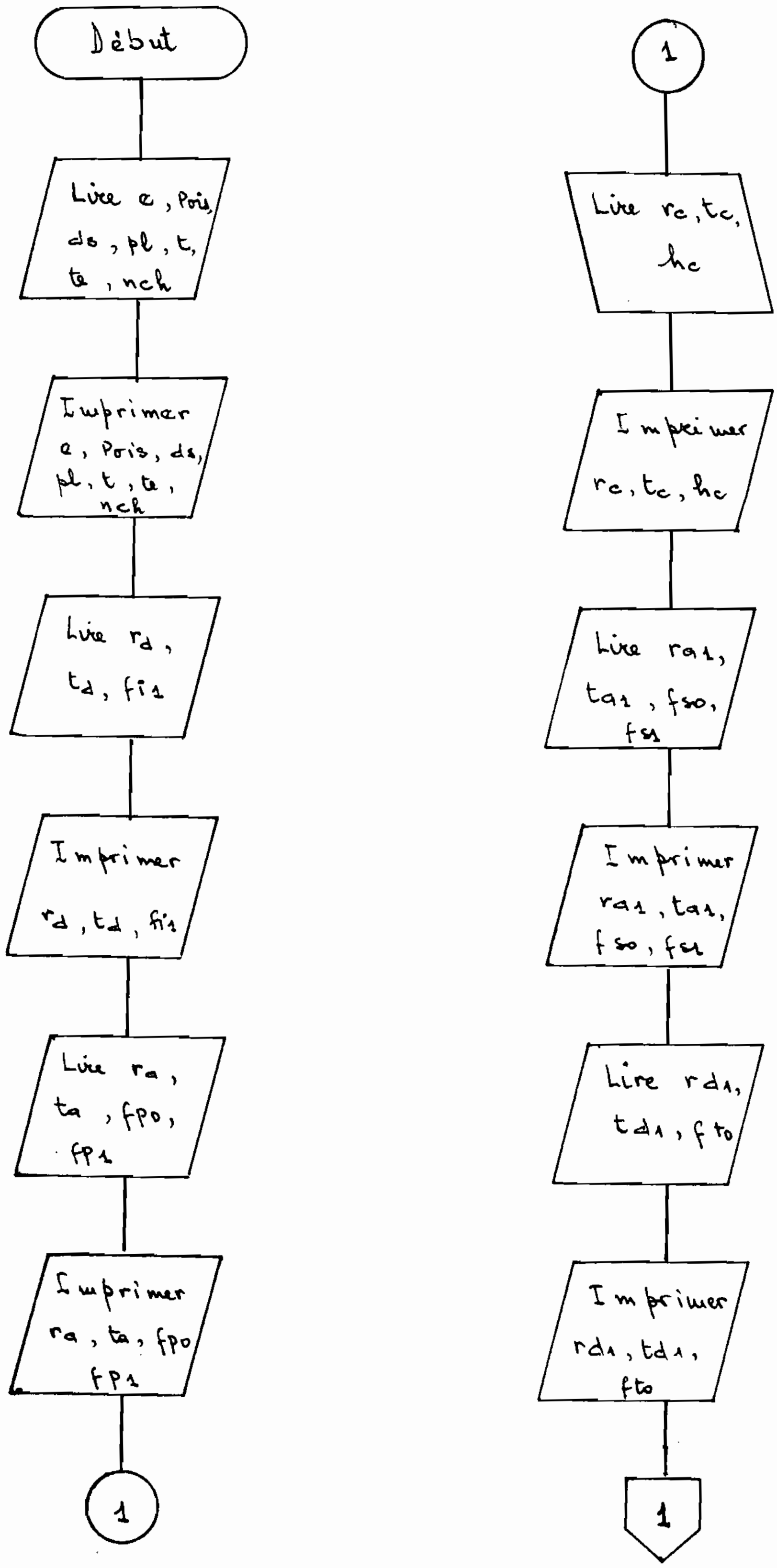
5.2 DISCUSSION et RECOMMANDATIONS

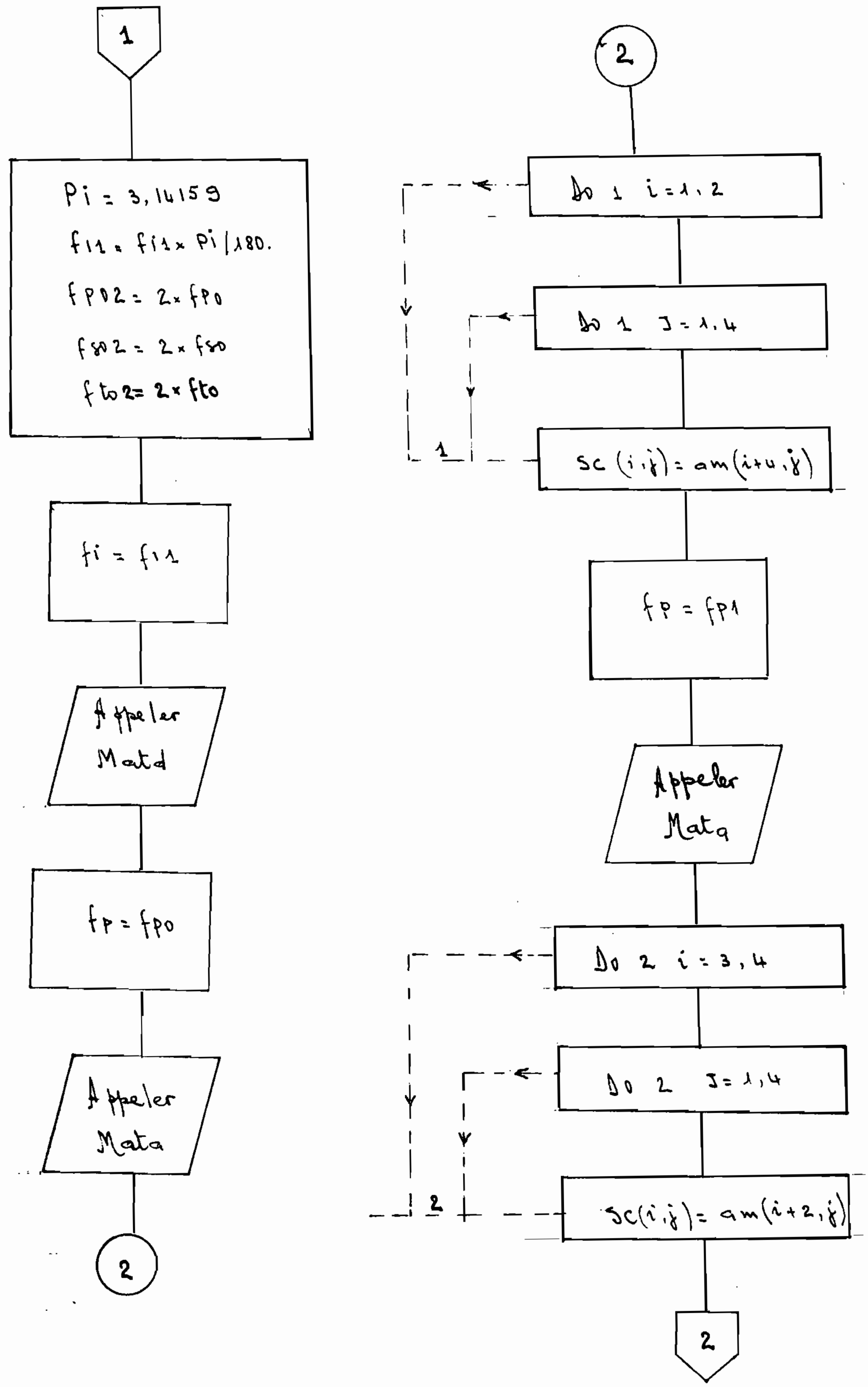
Par rapport aux résultats, les valeurs peu communes, trouvées pour les parties inférieures, émaneraient des considérations faites au niveau de l'Analyse où, nous avions supposé que le chargement du dôme inférieur, était assuré par la réaction du sol.
Et compte tenu des contraintes de temps qui n'ont pu nous permettre de surmonter les problèmes posés, il serait souhaitable de relancer le présent projet, en mettant l'accent sur les principaux points suivants:

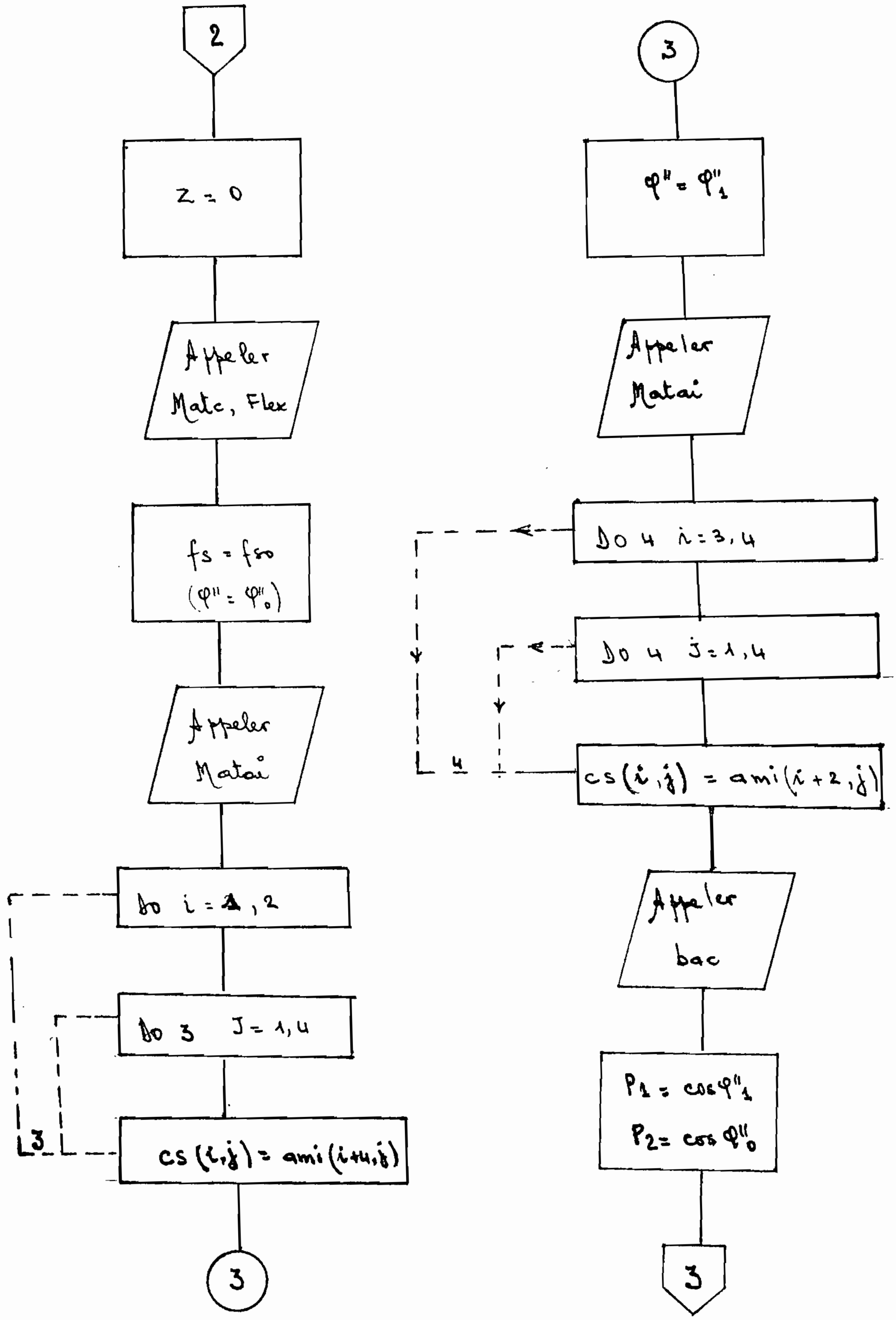
- Etude du réservoir, en tenant compte de toutes les conditions d'exploitation
- Reconsidération de l'analyse de la calotte et du dôme inférieurs

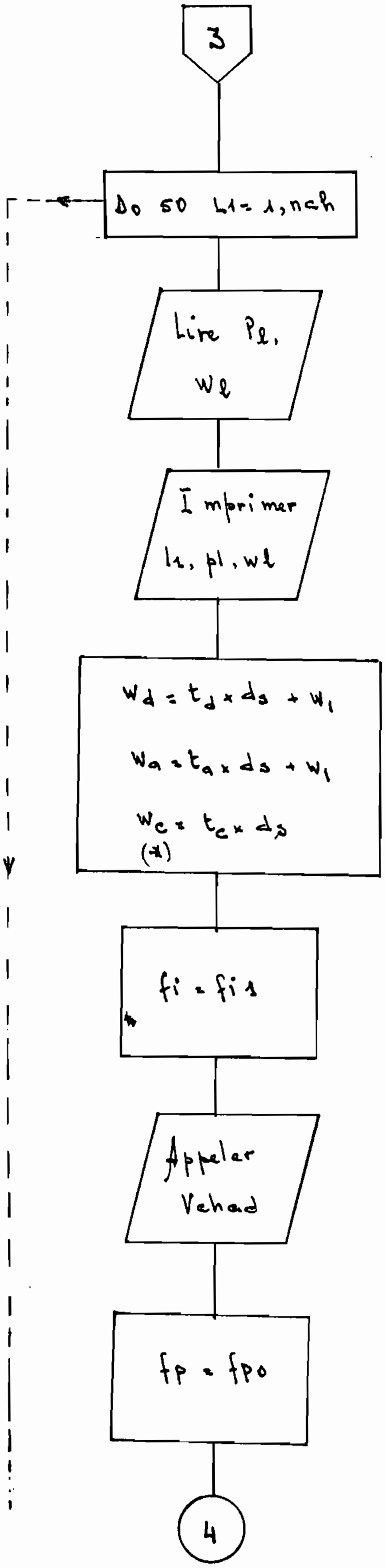
- Evaluation comparative, pour situer de façon plus précise, le Ferrociment par rapport au béton et à l'acier.
  Toutefois, il serait important de définir, dans cette partie, la capacité maximale au delà de laquelle, notre matériau cesserait d'être rentable pour les réservoirs.

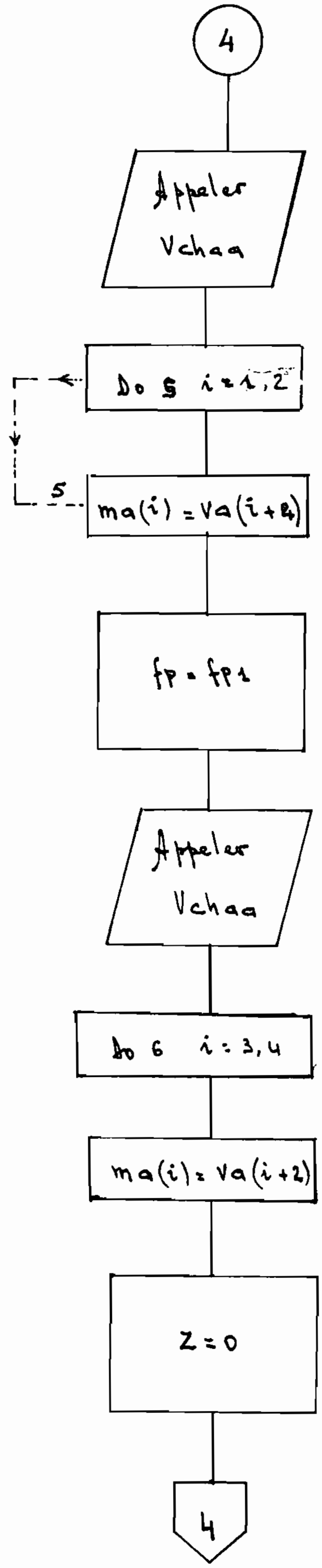
APPENDICE I : Organigramme



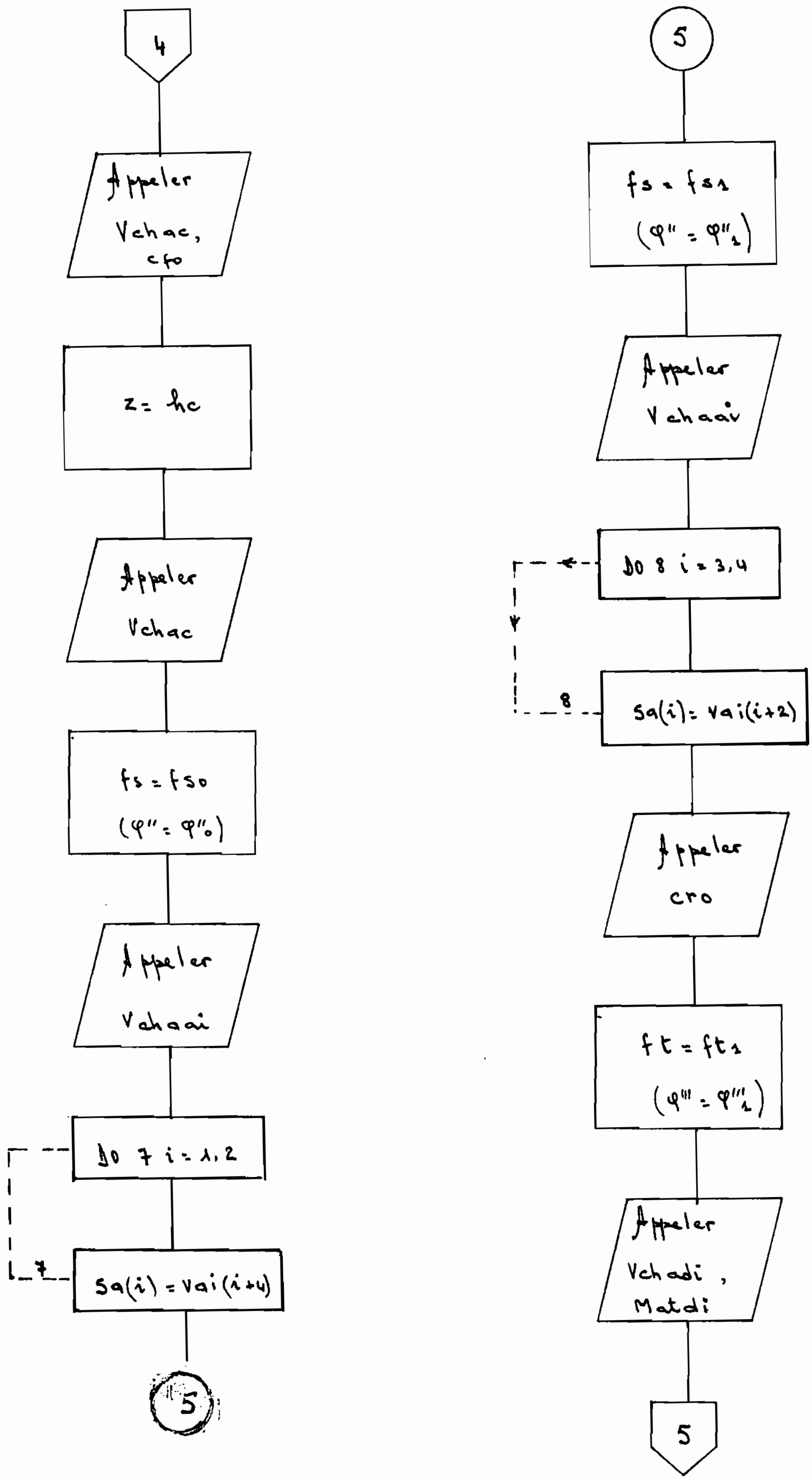

1
Pi = 3,14159
fi1 = fi1 × Pi / 180.
fp02 = 2 × fp0
fs02 = 2 × fs0
fto2 = 2 × fto
fi = fi1
Appeler Matd
fp = fp0
Appeler Mata
2
2
Do 1 i = 1, 2
Do 1 J = 1, 4
1
sc (i, j) = am (i+4, j)
fp = fp1
Appeler Mata
Do 2 i = 3, 4
Do 2 J = 1, 4
2
sc (i, j) = am (i+2, j)
2

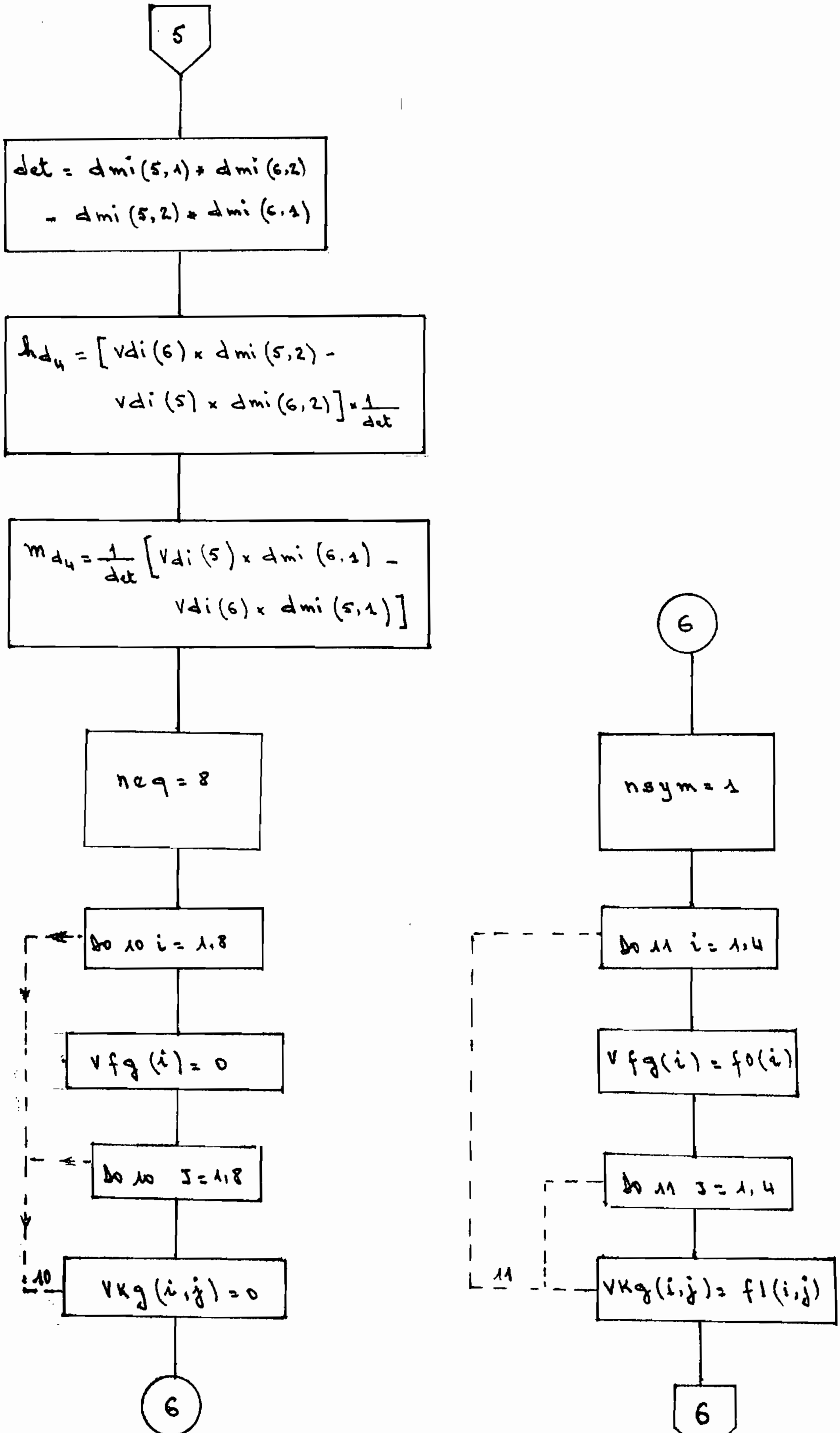

2
Z = 0
Appeler
Matc, Flex
fs = fso
(φ'' = φ''₀)
Appeler
Matai
Do i = 1, 2
Do 3 J = 1, 4
3
cs(i,j) = ami(i+4,j)
3
3
φ'' = φ''₁
Appeler
Matai
Do 4 i = 3, 4
Do 4 j = 1, 4
4
cs(i,j) = ami(i+2,j)
Appeler
bac
P1 = cos φ''₁
P2 = cos φ''₀
3

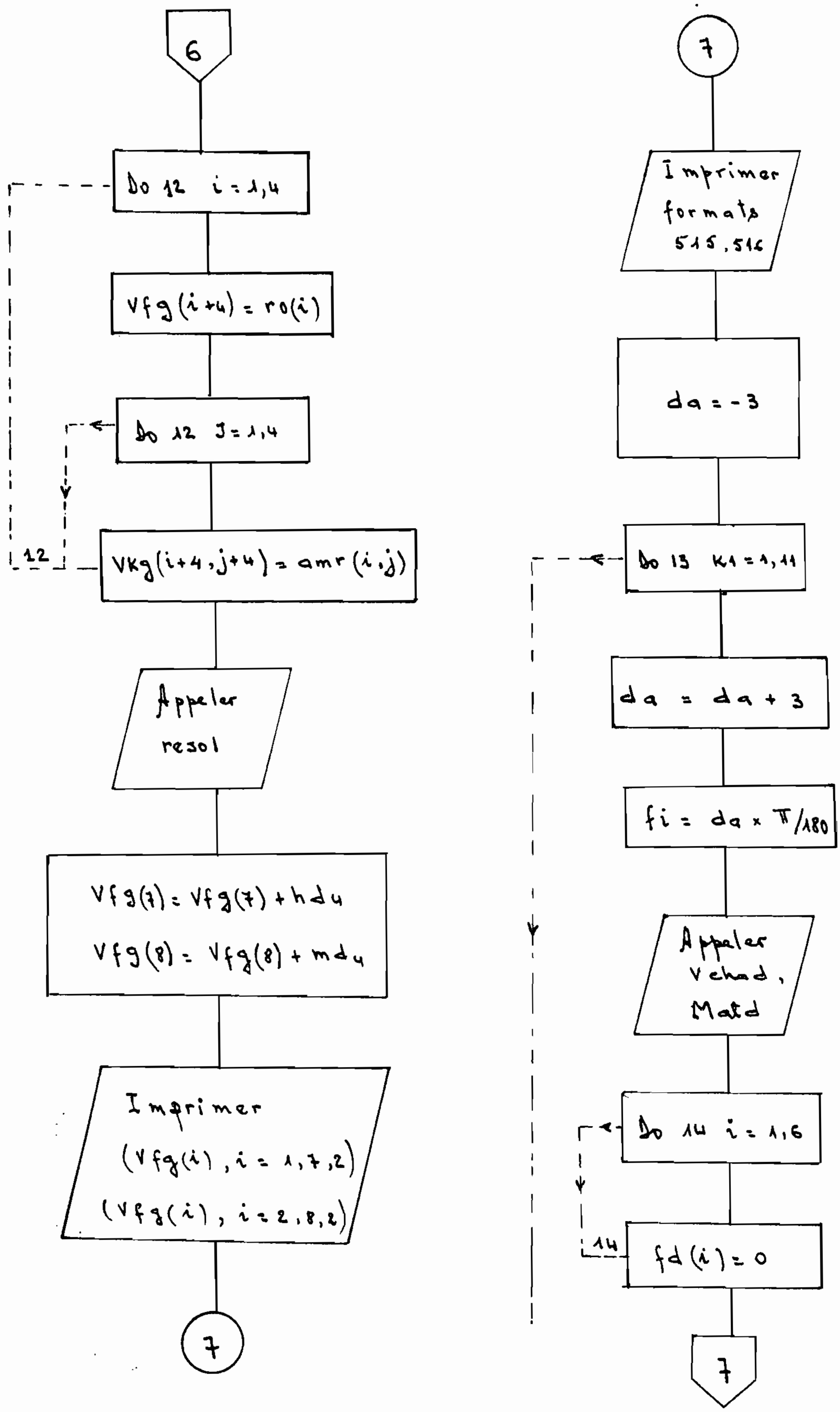


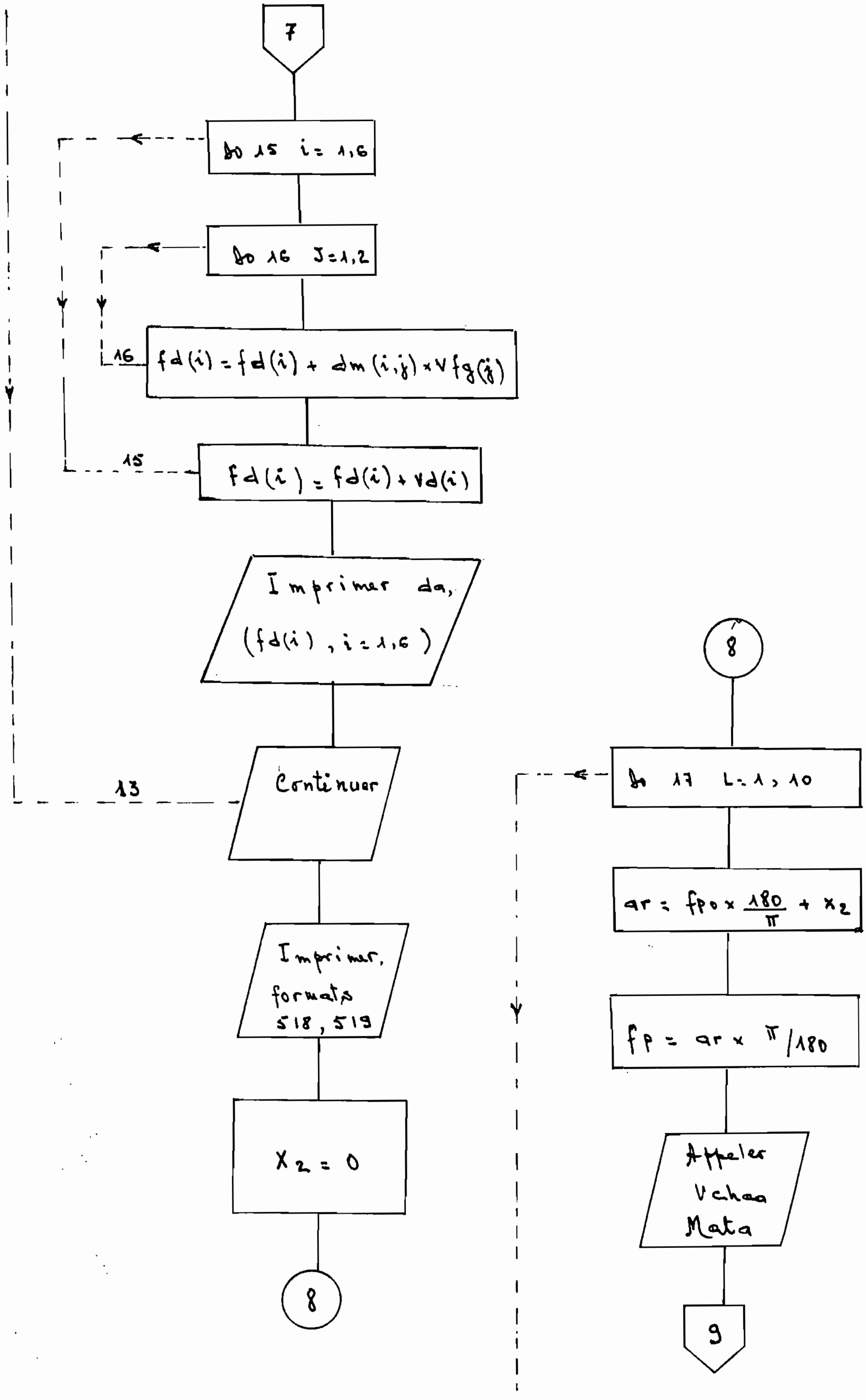


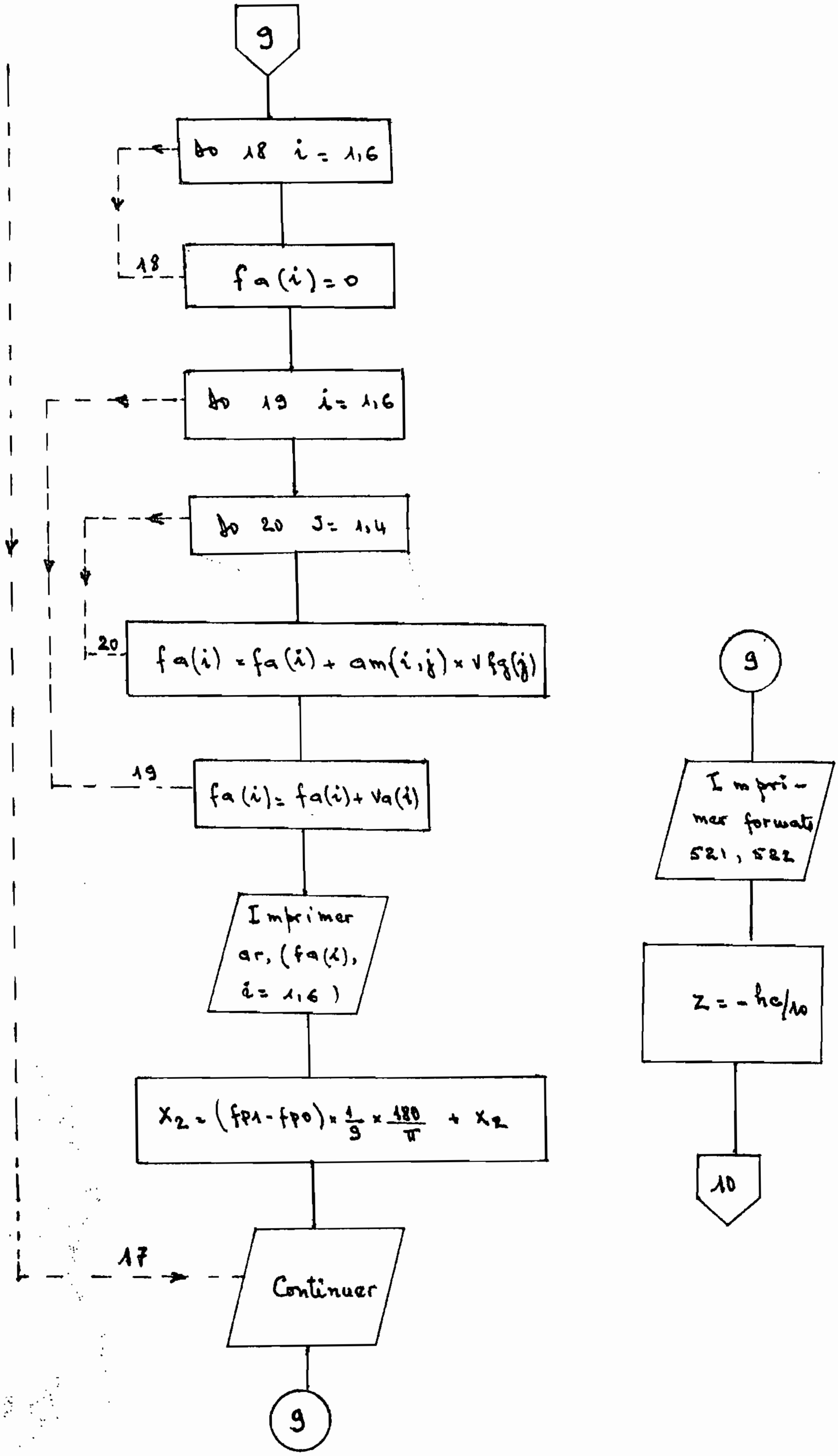
(*) $w_{d_1} = t_{d_1} \gamma_m + \left[h_c - r_{a_1} \cos\varphi'_1 + r_{d_1} (1 + \cos\varphi''_0) \right]$

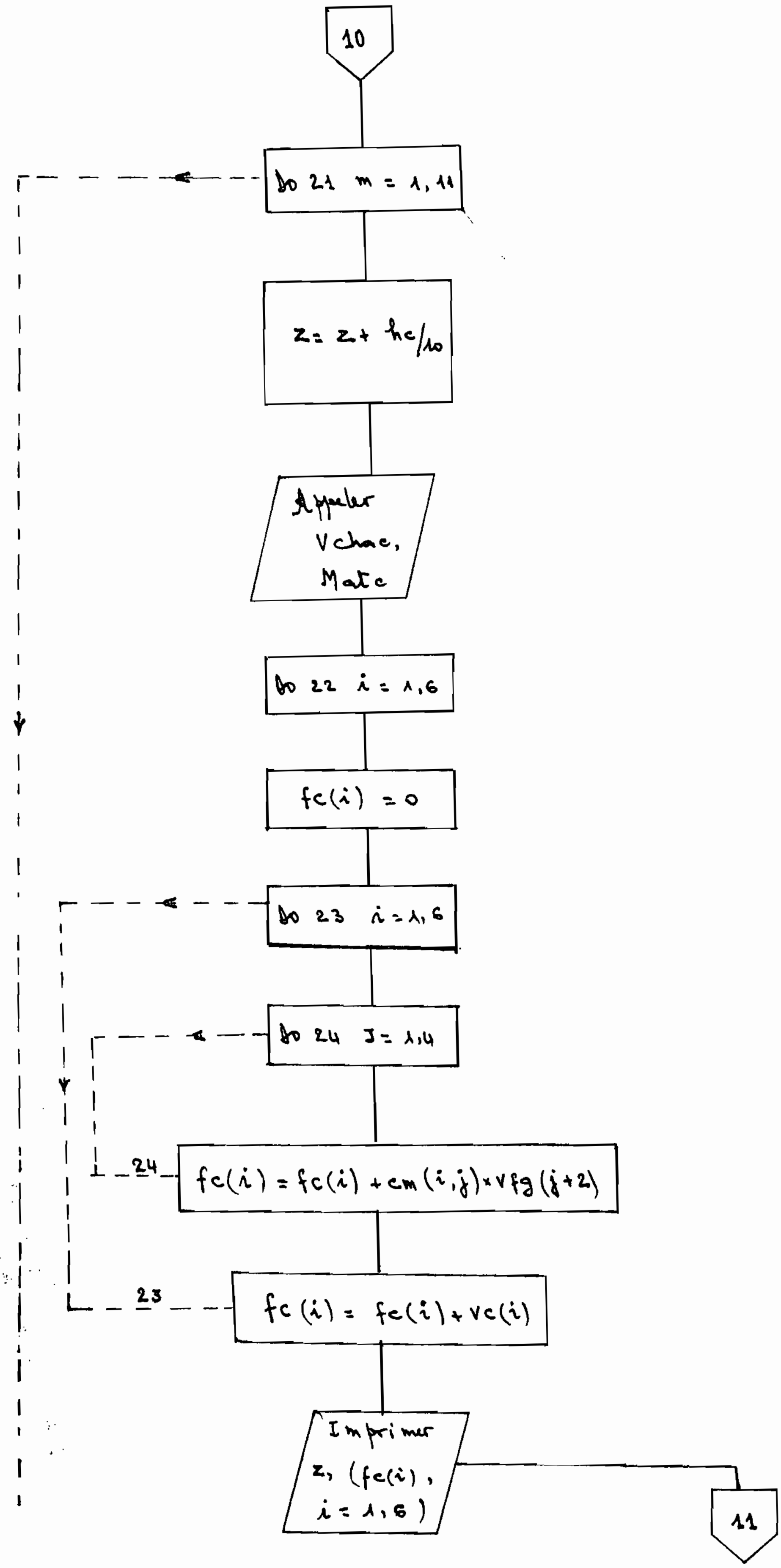

4
Appeler
Vchac,
cfo
z= hc
Appeler
Vchac
fs = fso
(φ" = φ"0)
Appeler
Vchaai
DO 7 i = 1,2
7
sa(i) = vai(i+4)
5
5
fs = fs1
(φ" = φ"1)
Appeler
Vchaai
DO 8 i = 3,4
8
sa(i) = vai(i+2)
Appeler
cro
ft = ft1
(φ''' = φ'''1)
Appeler
Vchadi ,
Matdi
5

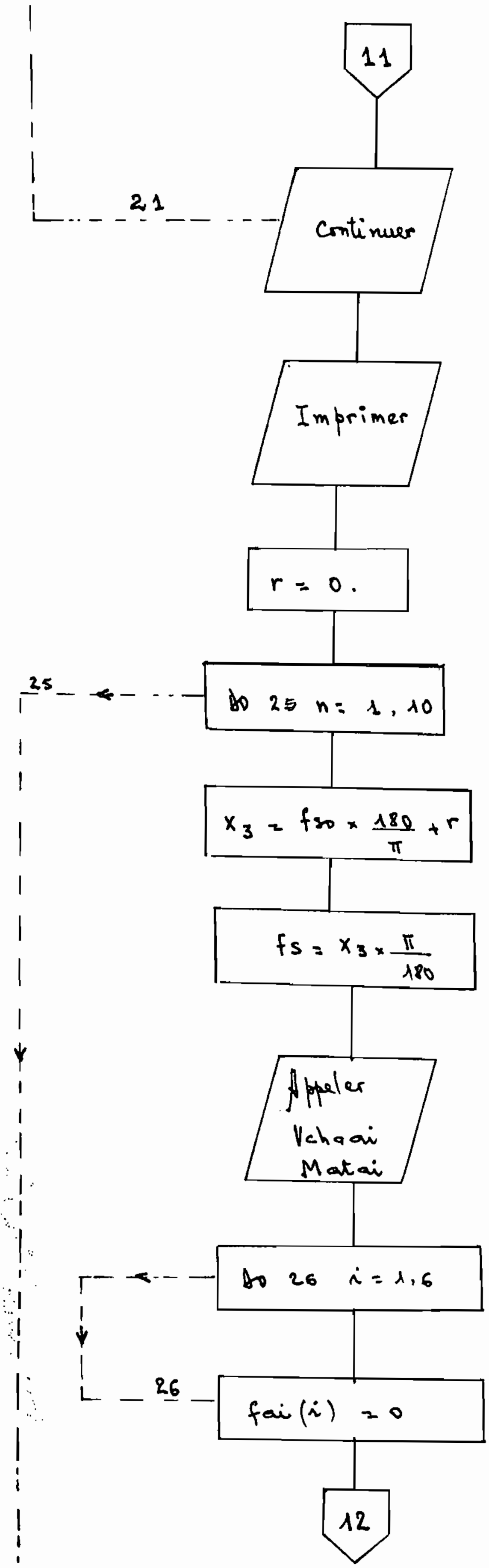

5
det = dmi(5,1) * dmi(6,2) - dmi(5,2) * dmi(6,1)
$h_{d_4} = [vdi(6) \times dmi(5,2) - vdi(5) \times dmi(6,2)] \times \frac{1}{det}$
$m_{d_4} = \frac{1}{det} [vdi(5) \times dmi(6,1) - vdi(6) \times dmi(5,1)]$
neq = 8
Do 10 i = 1,8
vfg(i) = 0
Do 10 J = 1,8
10
vkg(i,j) = 0
6
6
nsym = 1
Do 11 i = 1,4
vfg(i) = f0(i)
Do 11 J = 1,4
11
vkg(i,j) = f1(i,j)
6

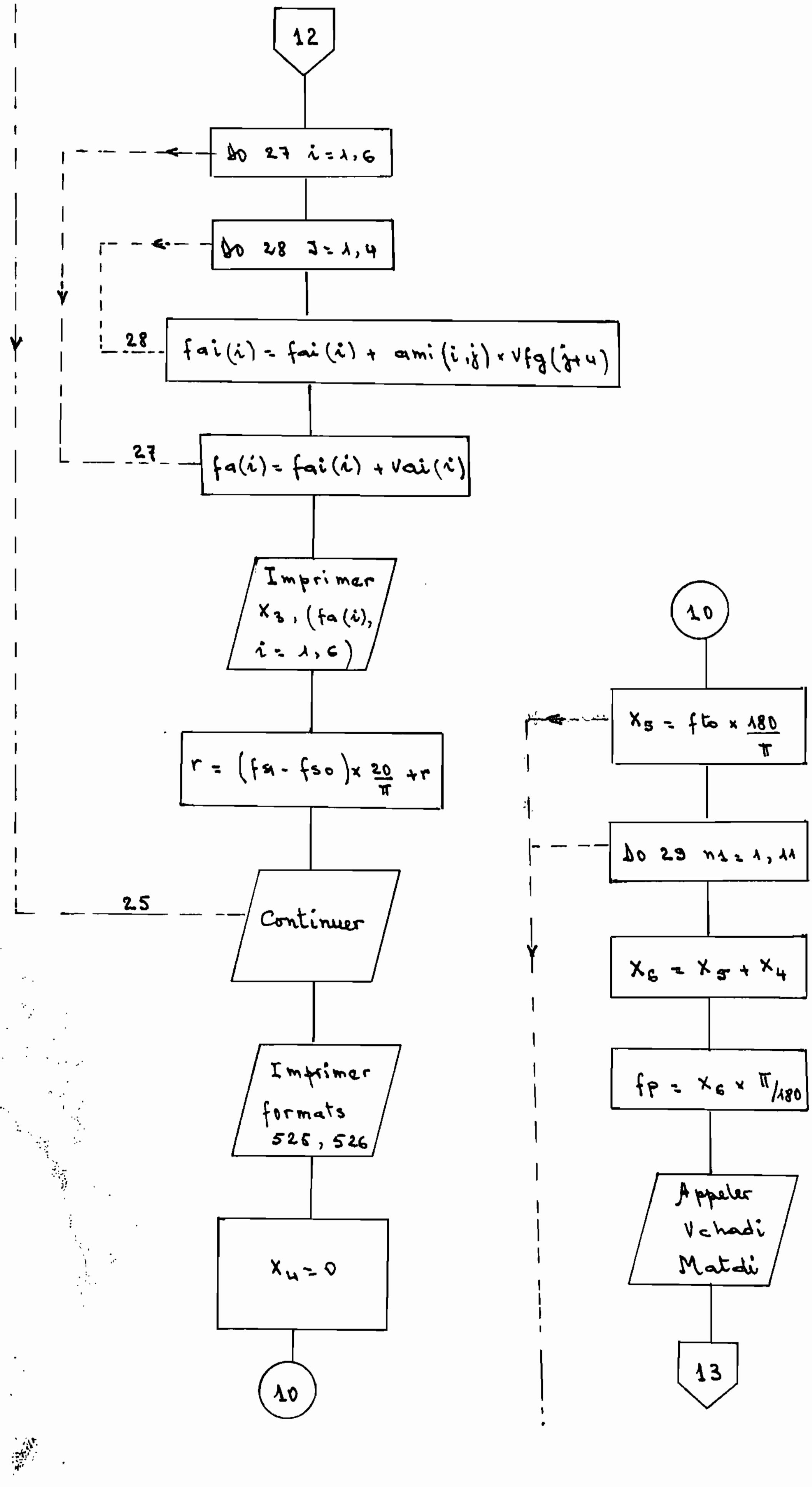

6
Do 12 i = 1,4
Vfg(i+4) = ro(i)
Do 12 J = 1,4
12
Vkg(i+4,j+4) = amr(i,j)
Appeler resol
Vfg(7) = Vfg(7) + hd4
Vfg(8) = Vfg(8) + md4
Imprimer (Vfg(i), i = 1,7,2) (Vfg(i), i = 2,8,2)
7
7
Imprimer formats 515,516
da = -3
Do 13 K1 = 1,11
da = da + 3
fi = da x π/180
Appeler Vchad, Matd
Do 14 i = 1,6
14
fd(i) = 0
7

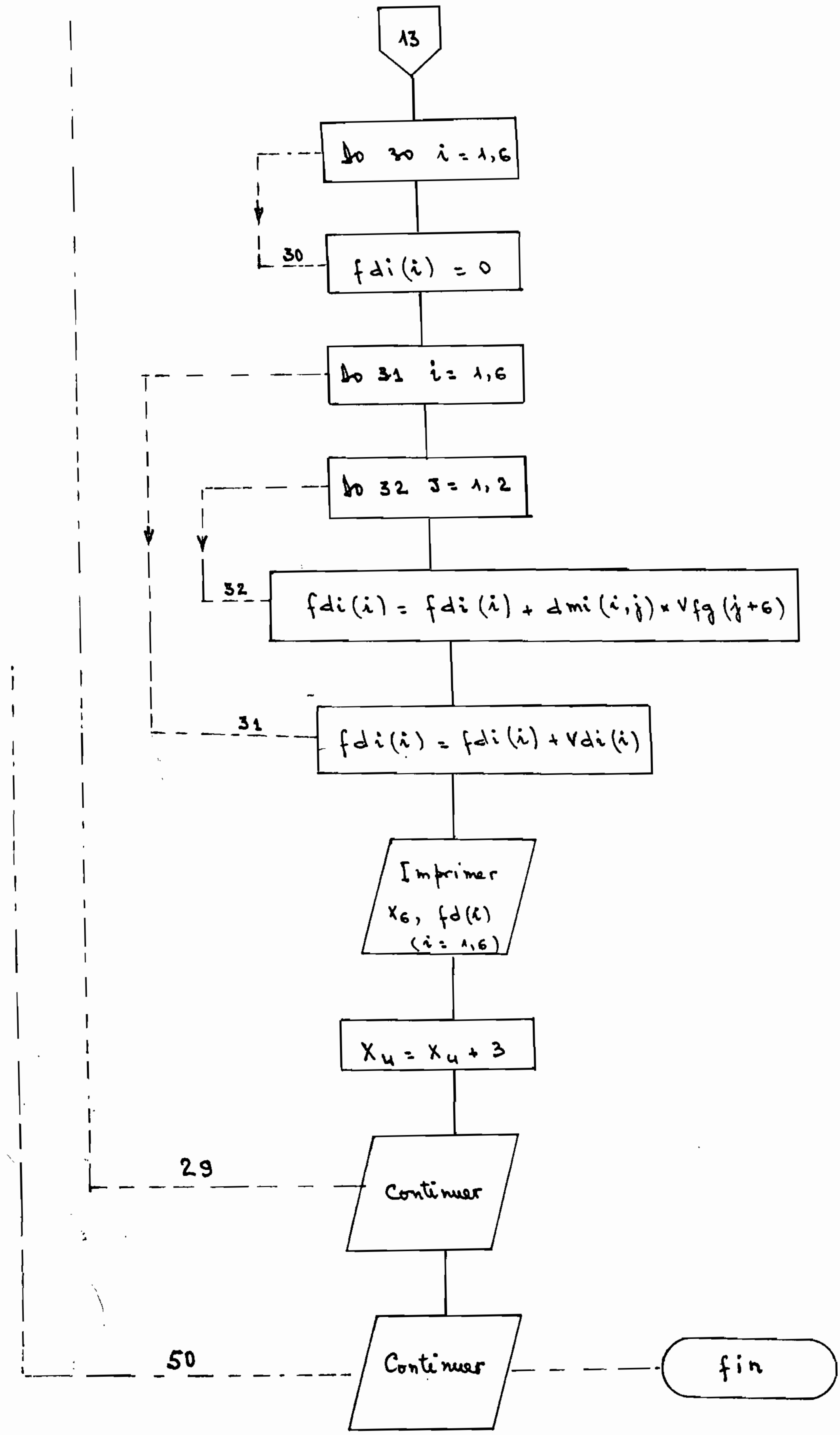

7
Do 15 i = 1,6
Do 16 J = 1,2
16
fd(i) = fd(i) + dm(i,j) × Vfg(j)
15
fd(i) = fd(i) + vd(i)
Imprimer da,
(fd(i), i = 1,6)
13
Continuer
Imprimer,
formats
518, 519
X2 = 0
8
8
Do 17 L = 1, 10
ar = fpo × 180/π + x2
fp = ar × π/180
Appeler
Vchaa
Mata
9


9
do 18 i = 1,6
18
fa(i) = 0
do 19 i = 1,6
do 20 J = 1,4
20
fa(i) = fa(i) + am(i,j) × vfg(j)
19
fa(i) = fa(i) + va(i)
Imprimer ar, (fa(i), i = 1,6)
X2 = (fp1 - fp0) × 1/9 × 180/π + X2
17
Continuer
9
9
Imprimer formats 521, 522
z = -hc/10
10


10
Do 21 m = 1, 11
z = z + hc/10
Appeler Vchac, Matc
Do 22 i = 1,6
fc(i) = 0
Do 23 i = 1,6
Do 24 J = 1,4
24
fc(i) = fc(i) + cm(i,j) × vfg(j+2)
23
fc(i) = fc(i) + vc(i)
Imprimer z, (fc(i), i = 1,6)
11


11
21
Continuer
Imprimer
r = 0.
25
Do 25 n = 1, 10
x3 = fs0 * 180/π + r
fs = x3 * π/180
Appeler
Vchoai
Matai
Do 26 i = 1, 6
26
fai (i) = 0
12


12
Do 27 i = 1, 6
Do 28 J = 1, 4
28
fai(i) = fai(i) + ami(i,j) × vfg(j+4)
27
fa(i) = fai(i) + vai(i)
Imprimer
X3, (fa(i),
i = 1, 6)
r = (fs1 - fs0) × 20/π + r
25
Continuer
Imprimer
formats
525, 526
X4 = 0
10
10
X5 = fto × 180/π
Do 29 n1 = 1, 11
X6 = X5 + X4
fp = X6 × π/180
Appeler
Vchadi
Matdi
13


13
Do 30 i = 1,6
30
fdi(i) = 0
Do 31 i = 1,6
Do 32 J = 1,2
32
fdi(i) = fdi(i) + dmi(i,j) * vfg(j+6)
31
fdi(i) = fdi(i) + vdi(i)
Imprimer
x6, fd(i)
(i = 1,6)
x4 = x4 + 3
29
Continuer
50
Continuer
fin

```
c                ---APPENDICE 2---
c
c ----------------PROGRAMME MAMK------------------------------
c
c   ce programme effectue le calcul structural d'un reservoir
c   par la theorie des coques et plaques,ledit reservoir etant
c   compose :-d'un dome spherique superieur
c            -d'un anneau spherique
c            -d'un cylindre
c            -d'une calotte spherique inferieure
c            -d'un dome spherique inferieur
c
c----------------DEFINITION DES PARAMETRES--------------------
c
c   E    :module d'elasticite
c   Pois :coefficient de Poisson
c   DS   :poids specifique du mortier
c   PL   :poids specifique du liquide
c   T    :variation de la temperature
c   TE   :coefficient de dilatation thermique
c   NCH  :nombre de cas de chargement
c   RD   :rayon du dome
c   TD   :epaisseur du dome
c   FI1  :angle d'inclinaison max. du dome
c   RA   :rayon de l'anneau
c   TA   :epaisseur 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   TC   :epaisseur du cylindre
c   HC   :hauteur du cylindre
c   RA1  :rayon de la calotte spherique inferieure
c   TA1  :epaisseur de la cal. sph. inf.
c   FSO  :angle d'inclinaison min. de la cal. sph.
c   FS1  :angle d'inclinaison max. de la cal  sph.
c   RD1  :rayon du dome inferieur
c   TD1  :epaisseur du dome inferieur
c   FTO  :angle d'inclinaison min.
c
c----------------PROCEDURE UTILISEE DANS LE PROGRAMME---------------
c
c  apres la lecture et la determination des differents parametres
c  geometriques ,on procede comme suit:
c    -calcul des matrices de flexibilite FL etAMR
c    -calcul de hd4 et de md4
c    -determination des forces d'interaction H1,M1,H2,M2,H3,M3,H4,M4
c    -pour chaque element de structure,on calcule les coefficients
c     d'influence suivant differents niveaux pour connaitre les ef-
c     forts internes et les deplacements correspondants
c    -ces dernieres valeurs vont nous permettre de verifier le choix
c              de la variante du materiau
```

```
c
c------------------RESERVE D'ESPACE ET PRECISION-----------------------
c
      implicit real*8(a-h,o-z)
      dimension vd(6),va(6),vc(6),vai(6),vdi(6),dm(6,2),am(6,4),
     1cm(6,4),ami(6,4),dmi(6,2),fl(4,4),sc(4,4),amr(4,4),cs(4,4),
     2fo(4),ma(4),ro(4),sa(4),vkg(8,8),vfg(8),fd(6),fa(6),fc(6),
     3fai(6),fdi(6)
c
c------------------LECTURE DE DONNEES GENERALES------------------------
c
      open(unit=5,file='donnees')
      open(unit=6,file='resultats')
      rewind(5)
      rewind(6)
      read *, e,pois,ds,pl,t,te,nch
      print 502,e,pois,ds,pl,t,te,nch
c
c................donnees sur le dome superieur............................
c
      read *, rd,td,fi1
      print 250
      print 504,rd,td,fi1
c
c................donnees sur l'anneau.....................................
c
      read *, ra,ta,fpo,fp1
      print 300
      print 505,ra,ta,fpo,fp1
c
c................donnees sur le cylindre..................................
c
      read *, rc,tc,hc
      print 350
      print 506,rc,tc,hc
c
c..............donnees sur la calotte spherique inferieure.................
c
      read *, ra1,ta1,fso,fs1
      print 400
      print 505,ra1,ta1,fso,fs1
c
c...............donnees sur le dome inferieur.............................
c
      read *, rd1,td1,fto
      print 450
      print 508,rd1,td1,fto
c
```

```
c................calculs necessaires.........................................
c
      pi=3.14159
      fi1=fi1*pi/180.
      fpo2=2.*fpo
      fso2=2.*fso
      fto2=2.*fto
c
c----------CALCUL DES MATRICES DE FLEXIBILITE-------------------------
c
      fi=fi1
      call matd(e,pois,rd,td,fi1,fi,dm)
      fp=fpo
      call mata(e,pois,ra,ta,fpo,fp1,fpo2,fp,am)
      do 1 i=1,2
      do 1 j=1,4
 1    sc(i,j)=am(i+4,j)
      fp=fp1
      call mata(e,pois,ra,ta,fpo,fp1,fpo2,fp,am)
      do 2 i=3,4
      do 2 j=1,4
 2    sc(i,j)=am(i+2,j)
      z=0.
      call matc(e,pois,rc,tc,hc,z,cm)
      call flex(dm,sc,cm,fl)
      z=hc
      call matc(e,pois,rc,tc,hc,z,cm)
      fs=fso
      call matai(e,pois,ra1,ta1,fso,fs1,fso2,fs,ami)
      do 3 i=1,2
      do 3 j=1,4
 3    cs(i,j)=ami(i+4,j)
      fs=fs1
      call matai(e,pois,ra1,ta1,fso,fs1,fso2,fs,ami)
      do 4 i=3,4
      do 4 j=1,4
 4    cs(i,j)=ami(i+2,j)
      call bac(cm,cs,amr)
```

```
c
c ------------------INTRODUCTION DES CAS DE CHARGEMENT-----------------------
      p1=dcos(fs1)
      p2=dcos(fto)
      do 50 l1=1,nch
      read *, pl,wl
      print 509,l1,pl,wl
      wd=td*ds+wl
      wa=ta*ds+wl
      wc=tc*ds
      wa1=ta*ds
      wd1=td1*ds+(hc-ra1*p1+rd1*(1.+p2))*p1
c
c  ..................calcul des vecteurs de charge ........ ...............
c
      fi=fi1
      call vchad(e,pois,t,te,rd,td,fi1,wd,fi,vd)
      fp=fpo
      call vchaa(e,pois,t,te,rd,fi1,ra,ta,fpo,fp1,fpo2,wd,wa,fp,va)
      do 5 i=1,2
 5    ma(i)=va(i+4)
      fp=fp1
      call vchaa(e,pois,t,te,rd,fi1,ra,ta,fpo,fp1,fpo2,wd,wa,fp,va)
      do 6 i=3,4
 6    ma(i)=va(i+2)
      z=0.
      call vchac(e,pois,pl,t,te,rd,fi1,ra,fpo,rc,tc,wd,wa,wc,z,vc)
      call cfo(vd,ma,vc,fo)
      z=hc
      call vchac(e,pois,pl,t,te,rd,fi1,ra,fpo,rc,tc,wd,wa,wc,z,vc)
      fs=fso
      call vchaai(e,pois,pl,t,te,rd,fi1,ra,fpo,fp1,hc,ra1,ta1,
     1            fso,fs1,fso2,wd,wa,wc,fs,vai)
      do 7 i=1,2
 7    sa(i)=vai(i+4)
      fs=fs1
      call vchaai(e,pois,pl,t,te,rd,fi1,ra,fpo,fp1,hc,ra1,ta1,
     1            fso,fs1,fso2,wd,wa,wc,fs,vai)
      do 8 i=3,4
 8    sa(i)=vai(i+2)
      call cro(vc,sa,ro)
c
```

```
c..................determination de hd4 et md4...........................
c
      ft=ft1
      call vchadi(e,pois,t,te,rd,fi1,ra,fpo,hc,ra1,fso,fs1,
     1                 rd1,td1,fto,fto2,wd,wa,wc,wa1,wd1,ft,vdi)
      call matdi(e,pois,rd1,td1,fto,fto2,ft,dmi)
      det=dmi(5,1)*dmi(6,2)-dmi(5,2)*dmi(6,1)
      hd4=(vdi(6)*dmi(5,2)-vdi(5)*dmi(6,2))/det
      md4=(vdi(5)*dmi(6,1)-vdi(6)*dmi(5,1))/det
c
c............resolution des equations 'FL*B=FO' et 'AMR*B=RO' ...........
      neq=8
      do 10 i=1,8
      vfg(i)=0.
      do 10 j=1,8
10    vkg(i,j)=0.
      nsym=1
      do 11 i=1,4
      vfg(i)=fo(i)
      do 11 j=1,4
11    vkg(i,j)=fl(i,j)
      do 12 i=1,4
      vfg(i+4)=ro(i)
      do 12 j=1,4
12    vkg(i+4,j+4)=amr(i,j)
      call resol(nsym,neq,vkg,vfg)
      hd4=0.
      md4=0.
      vfg(7)=vfg(7)+hd4
      vfg(8)=vfg(8)+md4
      print 511
      print 512,(vfg(i),i=1,7,2)
      print 513,(vfg(i),i=2,8,2)
c
c..............  ........calcul des contraintes............  ..........  ..
c
c..................contraintes dans le dome..........  ............
c
      print 515
      print 516
      da=-3.
      do 13 k=1,11
      da=da+3.
      fi=da*pi/180.
      call vchad(e,pois,t,te,rd,td,fi1,wd,fi,vd)
      call matd(e,pois,rd,td,fi1,fi,dm)
      do 14 i=1,6
 14   fd(i)=0.
      do 15 i=1,6
      do 16 j=1,2
 16   fd(i)=fd(i)+dm(i,j)*vfg(j)
 15   fd(i)=fd(i)+vd(i)
      print 517,da,(fd(i),i=1,6)
 13   continue
```

```
c
c.......... .  ..contraintes dans l'anneau.........................
c
      print 518
      print 519
      x2=0.
      do 17 l=1,10
      ar=fpo*180./pi+x2
      fp=ar*pi/180.
      call vchaa(e,pois,t,te,rd,fi1,ra,ta,fpo,fp1,fpo2,wd,wa,fp,va)
      call mata(e,pois,ra,ta,fpo,fp1,fpo2,fp,am)
      do 18 i=1,6
 18   fa(i)=0.
      do 19 i=1,6
      do 20 j=1,4
 20   fa(i)=fa(i)+am(i,j)*vfg(j)
 19   fa(i)=fa(i)+va(i)
      print 517,ar,(fa(i),i=1,6)
      x2=(fp1-fpo)*20./pi+x2
 17   continue
c
c.....  ...........contraintes dans le cylindre...  .... .......... ...
c
      print 521
      print 522
      z=-hc/10.
      do 21 m=1,11
      z=z+hc/10.
      call vchac(e,pois,p1,t,te,rd,fi1,ra,fpo,rc,tc,wd,wa,wc,z,vc)
      call matc(e,pois,rc,tc,hc,z,cm)
      do 22 i=1,6
 22   fc(i)=0.
      do 23 i=1,6
      do 24 j=1,4
 24   fc(i)=fc(i)+cm(i,j)*vfg(j+2)
 23   fc(i)=fc(i)+vc(i)
      print 517,z,(fc(i),i=1,6)
 21   continue
```

```
c
c............contraintes dans la calotte spherique inferieure............
c
      print 523
      print 524
      r=0.
      do 25 n=1,10
      x3=fso*180./pi+r
      fs=x3*pi/180.
      call vchaai(e,pois,pl,t,te,rd,fi1,ra,fpo,fp1,hc,ra1,ta1,fso
     1                ,fs1,fso2,wd,wa,wc,fs,vai)
      call matai(e,pois,ra1,ta1,fso,fs1,fso2,fs,ami)
      do 26 i=1,6
 26   fai(i)=0.
      do 27 i=1,6
      do 28 j=1,4
 28   fai(i)=fai(i)+ami(i,j)*vfg(j+4)
 27   fai(i)=fai(i)+vai(i)
      print 517,x3,(fai(i),i=1,6)
      r=(fs1-fso)*20./pi+r
 25   continue
c
c............contraintes dans le dome inferieur.............................
c
      print 525
      print 526
      x4=0.
      x5=fto*180./pi
      do 29 n1=1,11
      x6=x5+x4
      ft=x6*pi/180.
      call vchadi(e,pois,t,te,rd,fi1,ra,fso,hc,ra1,fso,fs1,rd1,td1,
     1          fto,fto2,wd,wa,wc,wa1,wd1,ft,vdi)
      call matdi(e,pois,rd1,td1,fto,fto2,ft,dmi)
      do 30 i=1,6
 30   fdi(i)=0.
      do 31 i=1,6
      do 32 j=1,2
 32   fdi(i)=fdi(i)+dmi(i,j)*vfg(j+6)
 31   fdi(i)=fdi(i)+vdi(i)
      print 517,x6,(fdi(i),i=1,6)
      x4=x4+3.
 29   continue
 50   continue
      close (unit=5)
      close(unit=6)
      stop
```

```
c
c-----------------FORMATS DE SORTIE DES DONNEES ET DES VALEURS----------------
c------------------------------DE CONTRAINTES-----------------------------------
c
 250  format(' ',t20,'valeurs retenues pour le dome superieur',/,t17,
     1                45('-'))
 300  format(' ',t20,'valeurs retenues pour l''anneau',/,t17,36('-'))
 350  format(' ',t20,'valeurs retenues pour le cylindre',/,t17,
     1                39('-'))
 400  format(' ',t20,'valeurs retenues pour la calotte sph. inf.',/,t17,
     1                48('-'))
 450  format(' ',t20,'valeurs retenues pour le dome inferieur',/,t17,
     1                45('-'))
 502  format(' ',t10,'module d''elasticite--------------=',f12.3,/,t10,
     1                'coefficient de poisson------------=',f10.3,/,t10,
     2                'poids specifique du mortier-------=',f10.3,/,t10,
     3                'poids specifique de l''eau--------=',f10.3,/,t10,
     4                'variation de la temperature-------=',f10.3,/,t10,
     5                'coefficient de dilation thermique-=',d10.3,/,t10,
     6                'nombre de cas de chargement-------=',i5,///)
 504  format(///' ',t10,'rayon-------------------------=',t50,f10.3/
     1               t10,'epaisseur---------------------=',t50,f10.3/
     2              ,t10,'angle d''inclinaison maximal---=',t50,f10.2/
     3               ,///)
 505  format(///' ',t10,'rayon------------------------------',t50,f10.3,
     1            /,t10,'epaisseur--------------------------',t50,f10.3,
     2            /,t10,'angle d''inclinaison minimal--------',t50,f10.2
     3           ,/,t10,'angle d''inclinaicon maximal--------',t50,f10.2
     4                   ,///)
 506  format(///' ',t10,'rayon------------------------------',t50,f10.3,
     1            /,t10,'epaisseur--------------------------',t50,f10.3,
     2            /,t10,'hauteur----------------------------',t50,f10.3,
     3                 ///)
 508  format(///' ',t10,'rayon------------------------------',t50,f10.3,
     1            /,t10,'epaisseur--------------------------',t50,f10.3,
     2            /,t10,'angle d''inclinaison minimal--------',t50,f10.2
     3                      ,///)
```

```
509   format('1',t10,'cas de chargement no.',i2,5x,'pl=',f7.3,
     1            5x,'wl=',f6.3,/,t8,26('-'),//)
511   format(' ',t10,'efforts exteriorises',/,' ',t8,24('-'),/)
512   format(' ',t10,'H1=',d14.4,5x,'H2=',d14.4,5x,'H3=',d14.4
     1                                    ,5x,'H4=',d14.4)
513   format(' ',t10,'M1=',d14.4,5x,'M2=',d14.4,5x,'M3=',d14.4
     1                                    ,5x,'M4=',d14.4)
515   format(/' ',t10,'contraintes dans le dome superieur',/,' ',t8,
     1                  38('-'),/)
516   format(' ',2x,'FI',10x,'NZ',14x,'NT',15x,'MZ',15x,'QZ',14x,'DR',
     1                  14x,'WZ',/)
517   format(' ',f5.1,4(1x,d15.4),2(1x,d15.4))
518   format(/' ',t10,'contraintes dans l''anneau',/,' ',t8,29('-'),/)
519   format(' ',2x,'FP',10x,'NZ',14x,'NT',15x,'MZ',15x,'QZ',14x,'DR',
     1                        14x,'wz',/)
521   format(/' ',t10,'contraintes dans le cylindre',/,t8,32('-'),/)
522   format(' ',3x,'Z',10x,'NZ',14x,'NT',15x,'MZ',15x,'QZ',14x,'DR',
     1                        14x,'WZ',/)
523   format(/' ',t10,'contraintes dans la calotte sph.inf.',/,t8,
     1                                  41('-'),/)
524   format(' ',2x,'FS',10x,'NZ',14x ,'NT',15x,'MZ',15x,'QZ',14x,'DR',
     1                         14x,'WZ',/)
525   format(/' ',t10,'contraintes dans le dome inferieur',/,38('-'),/)
526   format(' ',2x,'FS',10x,'NZ',14x,'NT',15x,'MZ',15x,'QZ',14x,'DR',
     1                  14x,'WZ',/)
c
      end
```

```
c
      subroutine vchaa(e,pois,t,te,rd,fi1,ra,ta,fpo,fp1,
     1                              fpo2,wd,wa,fp,va)
      implicit real*8(a-h,o-z)
      dimension va(6)
      a1=dcos(fp)
      a2=dsin(fp)
      a3=dsin(fpo)
      a4=dsin(fp1)
      a5=a1*a2**2
      a6=dcos(fpo)
      a7=dcos(fp1)
      cfa=e*ta**3/(12.d0*(1.d0-pois**2))
      ua=(3.d0*(1.d0-pois**2)/((a4**4)*(ra*ta)**3))**.25
      azo=ra*(a6-a1)
      az1=ra*(a7-a1)
      te2=dexp(-ua*azo)*dcos(ua*azo)
      cf2=dexp(-ua*azo)*dsin(ua*azo)
      te3=dexp(ua*az1)*dcos(ua*az1)
      cf3=dexp(ua*az1)*dsin(ua*az1)
      b1=dcos(fi1)
      b2=dsin(fi1)
      b3=rd*wd/(1.+b1)
      b4=dcos(fpo2)
      b5=1./(b4*a3**2)
      tx=1./(a4**2)
      ab1=-a6*(ra*wa/(1.+a6)+b3)
      ab2=-a7*(ra*wa/(1.+a7)+b3*(a3/a4)**2)
      b6=1./e/ta
      ro=t*te
      b8=1.d0/(2.d0*cfa*ua**3)
      b9=1.d0/(1.d0+a1)
      ax1=-(a2*b9**2*ra*wa-2.*a3**2*b3*a1/a2**3)
      ax=-ra*wa*b9+(a3/a2)**2*b3
      bx=-(wa*ra*a1*a2+ax/a2)
      dx=ra*a2*(b6*(wa*ra*a1+ax*(pois+1./a2**2))+ro)
      fx=b6*(wa*ra*a1-(pois+1./a2)*ax1+2.*a1/a2**2*ax
     1    a1/a2*(1.+pois)*(wa*ra*a1+ax*(1.+1./a2**2)))
      va(1)=ax+a5*(ab1*(te2-cf2)*b5+ab2*(te3+cf3)*tx)
      va(2)=bx+e*ta*b8/ra*(b5*ab1*te2+tx*ab2*te3)
      va(3)=a2**2/ua*(b5*ab1*cf2-tx*ab2*cf3)
      va(4)=-a2**3*(b5*ab1*(cf2-te2)+tx*ab2*(te3+cf3))
      va(5)=dx-b8*a2*(b5*ab1*te2+tx*ab2*te3)
      va(6)=fx+ua*b8*a2*(-ab1*b5*(te2+cf2)+ab2*(te3-cf3)*tx)
      return
      end
```

```
c
      subroutine vchac(e,pois,pl,t,te,rd,fi1,ra,fpo,rc,tc,wd,wa,wc,z,vc)
      implicit real*8(a-h,o-z)
      dimension vc(6)
      c1=dsin(fpo)
      c2=dcos(fi1)
      c3=c1**2*rd*wd/(1.d0+c2)
      c4=1./e/tc
      c5=pois*wc
      c6=pl*rc
      c7=rc*t*te
      vc(1)=-wc*z-c3-wa*ra
      vc(2)=c6*z
      vc(3)=0
      vc(4)=0
      vc(5)=-c4*rc*((c6+c5)*z+pois*(wa*ra+c3))-c7
      vc(6)=c4*(c5+c6)*rc
      return
      end
```

```
c
      subroutine vchad(e,pois,t,te,rd,td,fi1,wd,fi,vd)
      implicit real*8(a-h,o-z)
      dimension vd(6)
      d1=dcos(fi)
      d2=dsin(fi)
      d3=dcos(fi1)
      d4=dsin(fi1)
      d5=1.d0/(1.d0+d1)
      d6=1.d0/(1.d0+d3)
      d7=1/e/td
      d8=rd*wd
      ro=te*t
      dd=rd*d2*ro
      dr=2.d0*d3*d6*d4**3
      dz=rd*(d3-d1)
      ud=(3.d0*(1.d0-pois**2)/(d4**4*(rd*td)**3))**.25
      d9=ud*rd
      te1=dexp(ud*dz)*dcos(ud*dz)
      cf1=dexp(ud*dz)*dsin(ud*dz)
      vd(1)=(-d5+d3**2*d6*(te1+cf1))*d8
      vd(2)=(-d1+d5+2.d0*d9*d4**2*d3*d6*te1)*d8
      vd(3)=-1.d0/ud*d3*d6*cf1*d8
      vd(4)=-d4*d3*d6*(te1+cf1)*d8
      vd(5)=d7*((d1-(1.d0+pois)*d5)*d2-d9*dr*te1)*rd*d8-dd
      vd(6)=d7*((2.d0+pois)*d2+d9**2*dr*(te1-cf1))*d8
      return
      end
```

```
c
      subroutine flex(dm,sc,cm,fl)
      implicit real*8(a-h,o-z)
      dimension fl(4,4),dm(6,2),sc(4,4),cm(6,4)
      fl(1,1)=dm(5,1)-sc(1,1)
      fl(1,2)=dm(5,2)-sc(1,2)
      fl(1,3)=-sc(1,3)
      fl(1,4)=-sc(1,4)
      fl(2,1)=dm(6,1)-sc(2,1)
      fl(2,2)=dm(6,2)-sc(2,2)
      fl(2,3)=-sc(2,3)
      fl(2,4)=-sc(2,4)
      fl(3,1)=-sc(3,1)
      fl(3,2)=-sc(3,2)
      fl(3,3)=cm(5,1)-sc(3,3)
      fl(3,4)=cm(5,2)-sc(3,4)
      fl(4,1)=-sc(4,1)
      fl(4,2)=-sc(4,2)
      fl(4,3)=cm(6,1)-sc(4,3)
      fl(4,4)=cm(6,2)-sc(4,4)
      return
      end
c
      subroutine cfo(vd,ma,vc,fo)
      implicit real*8(a-h,o-z)
      dimension fo(4),vd(6),ma(4),vc(6)
      fo(1)=ma(1)-vd(5)
      fo(2)=ma(2)-vd(6)
      fo(3)=ma(3)-vc(5)
      fo(4)=ma(4)-vc(6)
      return
      end
```

```
c
      subroutine matai(e,pois,ra1,ta1,fso,fs1,fso2,fs,ami)
      implicit real*8(a-h,o-z)
      dimension ami(6,4)
      f1=dcos(fs)
      f2=dsin(fs)
      f3=dcos(fs1)
      f4=dsin(fs1)
      f5=1.d0/(1.d0+f1)
      f8=dcos(fso)
      cfa1=e*ta1**3/(12.*(1.-pois**2))
      zo=ra1*(f8-f1)
      ua1=(3.d0*(1.d0-pois**2)/f4**4/(ra1*ta1)**3)**.25
      g6=1./(2.*cfa1*ua1**3*f4**2)
      z1=zo
      te6=dexp(+ua1*zo)*dcos(-ua1*zo)
      cf6=dexp(+ua1*zo)*dsin(-ua1*zo)
      te7=dexp(ua1*z1)*dcos(-ua1*z1)
      cf7=dexp(ua1*z1)*dsin(-ua1*z1)
      g7=f1*f2**2
      g8=e*ta1/ra1
      g9=1.d0/(2.d0*cfa1*ua1**3)
      h1=1.d0/(ua1*f4**2)
      h2=dcos(fso2)
      ami(1,1)=g7*(te6-cf6)
      ami(1,2)=-2.d0*g7*ua1*cf6
      ami(1,3)=g7/f4**2*(te7+cf7)/h2
      ami(1,4)=2.d0*g7*ua1*cf7/f4**2
      ami(2,1)=g8*g9*te6
      ami(2,2)=g8*g9*ua1*(te6-cf6)
      ami(2,3)=g8*g6*te7/h2
      ami(2,4)=g8*g6*ua1*(te7+cf7)
      ami(3,1)=f2**2/ua1*cf6
      ami(3,2)=f2**2*(te6+cf6)
      ami(3,3)=-f2**2*h1*cf7/h2
      ami(3,4)=f2**2*(te7-cf7)/f4**2
      ami(4,1)=(te6-cf6)*f2**3
      ami(4,2)=-2.d0*ua1*cf6*f2**3
      ami(4,3)=-f2**3*(te7+cf7)/f4**2/h2
      ami(4,4)=-2.d0*ua1*cf7*f2**3/f4**2
      ami(5,1)=-f2*g9*te6
      ami(5,2)=-f2*ua1*g9*(te6-cf6)
      ami(5,3)=-f2*g6*te7/h2
      ami(5,4)=-f2*g6*ua1*(te7+cf7)
      ami(6,1)=-f2*g9*ua1*(te6+cf6)
      ami(6,2)=-f2*te6/(cfa1*ua1)
      ami(6,3)=f2*g6*ua1*(te7-cf7)/h2
      ami(6,4)=2.d0*ua1**2*g6*te7
      return
      end
```

```
c
      subroutine vchaai(e,pois,pl,t,te,rd,fil,ra,fpo,fp1,ra1,
     1                  ta1,fso,fs1,fso2,wd,wa,wc,fs,vai)
      implicit real*8(a-h,o-z)
      dimension vai(6)
      a1=dcos(fso)
      a2=dsin(fso)
      a3=dcos(fs)
      a4=dsin(fs)
      a5=dcos(fs1)
      a6=dsin(fs1)
      a7=dcos(fil)
      a8=dsin(fil)
      a9=dcos(fpo)
      ax1=dsin(fpo)
      ax2=a8*rd*wd/(1.+a7)
      ax3=dcos(fp1)
      ax4=dsin(fp1)
      ax5=(ax1/(1.+a9)-ax4/(1.+ax3))*wa*ra
      ax6=1./ra1/a4
      b1=1./(1.+a3)
      b2=1./e/ta1
      cfa1=e*ta1**3/(12.*(1.-pois**2))
      ua1=(3.*(1.-pois**2)/a6**4/(ra1*ta1)**3)**.25
      z=ra1*(a1-a3)
      az=ua1*ra1*(a1-a3)
      dz=az
      ca1=a2*(ax2+ax5+wc*hc)
      ca2=(a3+a4)*pl*ra1*(hc+z)*ax6+pl*ra1*(a4-a3)
      ca3=(1.+pois)*(((a4-a3)*(hc+z)*pl*ra1+2.*a3/a4**3*ca1)*ax6
     1'                 -(a3+a4)*pl*ra1)
      a=-(a3+a4)*(hc+z)*pl*ra1-ca1/a4**2
      b=-a5*(-(a5+a6)*((a1-a5)*ra1+hc)*pl*ra1-ca1/a6**2)
      c=ra1*pl*(hc+z)*(a4-a3)-a
      d=-ra1*a4*(b1*((a4-a3)*(hc+z)*pl*ra1-(1.+pois)*a)+t*te)
      f=b1*(ra1*a4*(ca2-ca3)+a3/a4*(1.+pois)*((a4-a3)*pl*ra1*(hc+z)
     1                 -2.*a))
      te6=dexp(-az)*dcos(-az)
      cf6=dexp(-az)*dsin(-az)
      te7=dexp(dz)*dcos(-dz)
      cf7=dexp(dz)*dsin(-dz)
      b3=1./(2.*cfa1*ua1**3*a6**2)
      b4=dcos(fso2)
      vai(1)=a-b*a3*a4**2/a6**2*(te7+cf7)/b4
      vai(2)=c-e*ta1/ra1*b*b3*te7/b4
      vai(3)=b/ua1*(a4/a6)**2*cf7/b4
      vai(4)=b*a4**3/a6**2*(te7+cf7)/b4
      vai(5)=d+b*a4*b3*te7/b4
      vai(6)=f-a4*b*b3*(te7-cf7)*ua1/b4
      return
      end
```

```
c
      subroutine resol(nsym,neq,vkg,vfg)
c-------------------------------------------------------------------
c     resolution d'un systeme d'equations non symetrique
c     par la methode de gauss.
c
c     entrees:- nsym   .eq.1 systeme non symetrique
c             - neq    nombre d'equations (.ge.2)
c             - vkg    matrice k stockee dans une
c                      table a deux dimensions
c             -vfg     second membre
c     sortie:- 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
```

```
c
      subroutine matdi(e,pois,rd1,td1,fto,fto2,ft,dmi)
      implicit real*8(a-h,o-z)
      dimension dmi(6,2)
      d1=dcos(fto)
      d2=dsin(fto)
      cfd1=e*td1**3/(12.*(1.-pois**2))
      ud1=(3.*(1.-pois**2)/d2**4/(rd1*td1)**3)**.25
      d3=e*td1/(2.*cfd1*ud1**3*d2**2)
      d4=dcos(ft)
      d5=dcos(fto2)
      ad=ud1*rd1*(d4-d1)
      te8=dexp(ad)*dcos(ad)
      cf8=dexp(ad)*dsin(ad)
      dmi(1,1)=d1*(te8+cf8)/d5
      dmi(1,2)=2.*d1*ud1*cf8
      dmi(2,1)=d3/rd1*te8/d5
      dmi(2,2)=d3/rd1*ud1*(te8+cf8)
      dmi(3,1)=-cf8/ud1/d5
      dmi(3,2)=te8-cf8
      dmi(4,1)=-d2*(te8+cf8)/d5
      dmi(4,2)=-2.*ud1*d2*cf8
      dmi(5,1)=-d3*d2*te8/d5
      dmi(5,2)=-d3*d2*ud1*(te8+cf8)
      dmi(6,1)=d3*ud1*d2*(te8-cf8)/d5
      dmi(6,2)=2.*ud1**2*d2*d3*te8
      return
      end
```

```
c
      subroutine vchadi(e,pois,t,te,rd,fi1,ra,fpo,hc,ra1,fso,fs1,rd1,
     1                  td1,fto,fto2,wd,wa,wc,wa1,wd1,ft,vdi)
      implicit real*8(a-h,o-z)
      dimension vdi(6)
      f1=dcos(fto)
      f2=dsin(fto)
      f3=dcos(ft)
      f4=dsin(ft)
      f5=dcos(fs1)
      f6=dsin(fs1)
      f7=dcos(fi1)
      f8=dsin(fpo)
      f9=1./e/td1
      q1=dsin(fso)
      cfd1=e*td1**3/(12.*(1.-pois**2))
      ud1=(3.*(1.-pois**2)/(f2**4*(rd1*td1)**3))**.25
      ad=-ud1*rd1*(f1-f3)
      ca1=q1**2*(wc*hc+wa*ra+f8**2*rd*wd/(1.+f7))
      a=-rd1*wd1/(1.+f3)-(f2/f4)**2*(ra1*wa1/(1.+f5)+ca1/f6**2)
      da1=f2**2*(ra1*wa1/(1.+f5)+ca1/f6**2)
      da2=-f4*rd1*wd1/(1.+f3)**2+2.*f3*da1/f4**3
      da4=-wd1*rd1*f4-(pois+1./f4**2)*da2+2*f3*a
      b=wd1*rd1*f3-a/f4**2
      d=-rd1*f4*(f9*(wd1*rd1*f3-(pois+1./f4**2)*a)+t*te)
      f=f9*(da4+f3/f4*(1.+pois)*(wd1*rd1*f3-(1.+1./f4**2)*a))
      te8=dexp(ad)*dcos(ad)
      cf8=dexp(ad)*dsin(ad)
      g1=e*td1/(2.*cfd1*ud1**3*f2**2)
      g2=dcos(fto2)
      vdi(1)=a*(1.-f1**2/g2*(te8+cf8))
      vdi(2)=b-g1/rd1*a*f1*te8/g2
      vdi(3)=a*f1*cf8/ud1/g2
      vdi(4)=a*f1*f2*(te8+cf8)/g2
      vdi(5)=d+g1*f2*a*f1*te8/g2
      vdi(6)=f-g1*ud1*f2*a*f1*(te8-cf8)/g2
      return
      end
```

```
c
      subroutine bac(cm,cs,amr)
      implicit real*8(a-h,o-z)
      dimension amr(4,4),cm(6,4),cs(4,4)
      amr(1,1)=cs(1,1)-cm(5,3)
      amr(1,2)=cs(1,2)-cm(5,4)
      amr(1,3)=cs(1,3)
      amr(1,4)=cs(1,4)
      amr(2,1)=cs(2,1)-cm(6,3)
      amr(2,2)=cs(2,2)-cm(6,4)
      amr(2,3)=cs(2,3)
      amr(2,4)=cs(2,4)
      do 10 i=3,4
      do 10 j=1,4
 10   amr(i,j)=cs(i,j)
      return
      end
c
      subroutine cro (vc,sa,ro)
      implicit real*8(a-h,o-z)
      dimension ro(4),vc(6).sa(4)
      ro(1)=vc(5)-sa(1)
      ro(2)=vc(6)-sa(2)
      ro(3)=-sa(3)
      ro(4)=-sa(4)
      return
      end
```

102


```
c
      subroutine mata(e,pois,ra,ta,fpo,fp1,fpo2,fp,am)
      implicit real*8(a-h,o-z)
      dimension am(6,4)
      a1=dcos(fp)
      a2=dsin(fp)
      a3=dsin(fpo)
      a4=dsin(fp1)
      a5=a1*a2**2
      a6=dcos(fpo)
      a7=dcos(fp1)
      a8=dcos(fpo2)
      cfa=e*ta**3/(12.d0*(1.d0-pois**2))
      ua=(3.d0*(1.d0-pois**2)/((a4**4)*(ra*ta)**3))**.25
      az0=ra*(a6-a1)
      az1=-ra*(a1-a7)
      te2=dexp(-ua*az0)*dcos(ua*az0)
      cf2=dexp(-ua*az0)*dsin(ua*az0)
      te3=dexp(ua*az1)*dcos(ua*az1)
      cf3=dexp(ua*az1)*dsin(ua*az1)
      am(1,1)=-a5*(te2-cf2)/(a3**2*a8)
      am(1,2)=-2.d0*a5*ua*cf2/a3**2
      am(1,3)=-a5*(te3+cf3)/a4**2
      am(1,4)=2.d0*a5*ua*cf3/a4**2
      am(2,1)=-e*ta*te2/(2.d0*cfa*ra*ua**3*a3**2*a8)
      am(2,2)=e*ta*(te2-cf2)/(2.d0*cfa*ra*(ua*a3)**2)
      am(2,3)=-e*ta*te3/(2.d0*cfa*ra*ua**3*a4**2)
      am(2,4)=e*ta*(te3+cf3)/(2.d0*cfa*ra*(ua*a4)**2)
      am(3,1)=-a2**2*cf2/(ua*a3**2*a8)
      am(3,2)=a2**2*(te2+cf2)/a3**2
      am(3,3)=a2**2*cf3/(ua*a4**2)
      am(3,4)=(a2/a4)**2*(te3-cf3)
      am(4,1)=a2**3*(cf2-te2)/(a8*a3**2)
      am(4,2)=-2.d0*a2**3*ua*cf2/a3**2
      am(4,3)=a2**3*(te3+cf3)/a4**2
      am(4,4)=-2.d0*a2**3*ua*cf3/a4**2
      am(5,1)=a2*te2/(2.d0*cfa*ua**3*a3**2*a8)
      am(5,2)=-a2*(te2-cf2)/(2.d0*cfa*(ua*a3)**2)
      am(5,3)=a2*te3/(2.d0*cfa*ua**3*a4**2)
      am(5,4)=-a2*(te3+cf3)/(2.d0*cfa*(ua*a4)**2)
      am(6,1)=a2*(te2+cf2)/(2.d0*cfa*(ua*a3)**2*a8)
      am(6,2)=-a2*te2/(cfa*ua*a3**2)
      am(6,3)=-a2*(te3-cf3)/(2.d0*cfa*(ua*a4)**2)
      am(6,4)=a2*te3/(cfa*ua*a4**2)
      return
      end
```

```
c
      subroutine matc(e,pois,rc,tc,hc,z,cm)
      implicit real*8(a-h,o-z)
      dimension cm(6,4)
      cfc=e*tc**3/(12.d0*(1.d0-pois**2))
      uc=(3.d0*(1.d0-pois**2)/(rc*tc)**3)**.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))
      c1=uc*rc
      c2=2.d0/e/tc
      do 10 i=1
      do 10 j=1,4
10    cm(i,j)=0.d0
      cm(2,1)=2.d0*c1*te4
      cm(2,2)=2.d0*uc*c1*(te4-cf4)
      cm(2,3)=-2.d0*c1*te5
      cm(2,4)=2.d0*uc*c1*(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)=-c1*rc*c2*te4
      cm(5,2)=-c1**2*c2*(te4-cf4)
      cm(5,3)=c1*rc*c2*te5
      cm(5,4)=-c1**2*c2*(te5+cf5)
      cm(6,1)=-c1**2*c2*(te4+cf4)
      cm(6,2)=-2.d0*uc*c1**2*c2*te4
      cm(6,3)=-c1**2*c2*(te5-cf5)
      cm(6,4)=2.d0*uc*c1**2*c2*te5
      return
      end
```

```
c
      subroutine matd(e,pois,rd,td,fi1,fi,dm)
      implicit real*8(a-h,o-z)
      dimension dm(6,2)
      d1=dcos(fi)
      d2=dcos(fi1)
      d3=dsin(fi1)
      dz=-rd*(d1-d2)
      ud=(3.d0*(1.d0-pois**2)/(d3**4*(rd*td)**3))**0.25
      te1=dexp(ud*dz)*dcos(ud*dz)
      cf1=dexp(ud*dz)*dsin(ud*dz)
      dm(1,1)=-d2*(te1+cf1)
      dm(1,2)=2.d0*ud*d2*cf1
      dm(2,1)=-2.d0*ud*rd*d3**2*te1
      dm(2,2)=2.d0*((ud**2)*rd*d3**2)*(te1+cf1)
      dm(3,1)=cf1/ud
      dm(3,2)=te1-cf1
      dm(4,1)=d3*(te1+cf1)
      dm(4,2)=-2.d0*ud*d3*cf1
      dm(5,1)=(2.d0*ud*rd**2*d3**3*te1)/(e*td)
      dm(5,2)=(-2.d0*(ud*rd)**2*d3**3/(e*td))*(te1+cf1)
      dm(6,1)=(-2.d0*(ud*rd)**2*d3**3/(e*td))*(te1-cf1)
      dm(6,2)=(4.d0*(ud*d3)**3*rd**2/(e*td))*te1
      return
      end
```

30 Mai 10:31 1985 resultats Page 1

```
module d'elasticite---------------=20000000.000
coefficient de poisson------------=       .150
poids specifique du mortier-------=     24.000
poids specifique de l'eau--------=    10.000
variation de la temperature-------=     20.000
coefficient de dilation thermique-= 0.120d-04
nombre de cas de chargement-------=     3
```

valeurs retenues pour le dome superieur

```
rayon--------------------------=              7.738
epaisseur----------------------=               .010
angle d'inclinaison maximal---=               30.00
```

valeurs retenues pour l'anneau

```
rayon------------------------------           4.005
epaisseur--------------------------            .315
angle d'inclinaison minimal--------            1.31
angle d'inclinaicon maximal--------            1.57
```

valeurs retenues pour le cylindre

```
rayon------------------------------           4.000
epaisseur--------------------------            .025
hauteur----------------------------           4.000
```

valeurs retenues pour la calotte sph. inf.

```
rayon------------------------------           4.005
epaisseur--------------------------            .030
angle d'inclinaison minimal--------            1.57
angle d'inclinaicon maximal--------            1.83
```

106

30 Mai 10:31 1985 resultats Page 2

valeurs retenues pour le dome inferieur

rayon------------------------------	7.738
epaisseur--------------------------	.040
angle d'inclinaison minimal--------	2.62

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

efforts exteriorises

H1=	0.4956d+01	H2=	-0.2291d+01	H3=	0.8049d+01	H4=	0.2057d+02
M1=	0.8662d-02	M2=	0.9756d-01	M3=	0.5779d+00	M4=	0.3197d+01

contraintes dans le dome superieur

FI	NZ	NT	MZ	QZ	DR	WZ
.0	0.1285d-01	0.1285d-01	0.9501d-09	0.2920d-07	0.5534d-10	-0.5835d-09
3.0	0.1286d-01	0.1281d-01	0.1655d-08	0.3743d-07	-0.9722d-04	-0.1484d-07
6.0	0.1289d-01	0.1268d-01	0.4868d-08	0.6315d-07	-0.1942d-03	-0.2776d-07
9.0	0.1293d-01	0.1247d-01	0.1194d-07	0.4597d-07	-0.2906d-03	-0.3528d-07
12.0	0.1300d-01	0.1221d-01	-0.1333d-07	-0.5603d-06	-0.3862d-03	-0.4210d-07
15.0	0.1308d-01	0.1163d-01	-0.2573d-06	-0.1380d-05	-0.4808d-03	-0.2244d-06
18.0	0.1313d-01	0.9543d-02	0.1636d-05	0.2713d-04	-0.5740d-03	0.1248d-07
21.0	0.1371d-01	0.4008d-01	-0.3162d-05	-0.2410d-03	-0.6662d-03	0.8696d-05
24.0	0.9132d-02	-0.4468d+00	-0.9249d-04	0.2485d-02	-0.7466d-03	-0.1971d-03
27.0	0.1053d+00	0.1018d+02	0.2328d-02	-0.5294d-01	-0.1040d-02	0.4500d-02
30.0	-0.4289d+01	-0.3322d+03	0.8662d-02	0.2484d+01	0.5498d-02	-0.1110d+00

contraintes dans l'anneau

FP	NZ	NT	MZ	QZ	DR	wz
75.0	0.1463d+01	0.3232d+02	0.8658d-02	0.5522d+01	0.5117d-03	-0.4565d-02
76.7	-0.2598d+00	0.3191d+01	0.1528d+00	-0.1039d+01	0.8939d-03	-0.1711d-02
78.4	-0.1616d+00	-0.2168d+01	0.3050d-01	-0.7158d+00	0.9697d-03	0.5637d-04
80.0	-0.2276d-01	-0.6861d+00	-0.7229d-02	-0.4853d-01	0.9556d-03	0.1614d-03
81.7	-0.5089d-02	0.9820d-01	-0.3899d-02	0.4830d-01	0.9498d-03	0.3203d-04
83.3	-0.7995d-02	0.1502d+00	-0.1907d-02	-0.1764d-01	0.9527d-03	-0.1320d-04
85.0	-0.1213d-01	-0.2346d+00	-0.5675d-02	-0.1737d-01	0.9606d-03	-0.8894d-04
86.7	-0.3434d-01	-0.1393d+01	0.8598d-02	0.3591d+00	0.9781d-03	-0.1326d-03
88.3	-0.4193d-01	0.7202d-01	0.9261d-01	0.9867d+00	0.9598d-03	0.7555d-03
90.0	-0.1327d-01	0.1736d+02	0.9755d-01	-0.2291d+01	0.7294d-03	0.3283d-02

contraintes dans le cylindre

Z	NZ	NT	MZ	QZ	DR	WZ
.0	0.1246d-01	-0.9259d+02	0.9756d-01	-0.2291d+01	-0.2193d-03	-0.4609d-02
.4	0.2631d+04	0.2034d+02	-0.7254d-02	0.1272d+00	0.2034d-02	-0.7642d-02
.8	0.5261d+04	0.3181d+02	0.4786d-03	-0.6780d-02	0.5099d-02	-0.7573d-02
1.2	0.7892d+04	0.4801d+02	-0.2931d-04	0.3474d-03	0.8126d-02	-0.7571d-02
1.6	0.1052d+05	0.6400d+02	0.1714d-05	-0.1702d-04	0.1115d-01	-0.7572d-02
2.0	0.1315d+05	0.8000d+02	-0.3978d-06	-0.8365d-06	0.1418d-01	-0.7572d-02
2.4	0.1578d+05	0.9600d+02	0.5959d-05	0.4100d-04	0.1721d-01	-0.7572d-02
2.8	0.1841d+05	0.1120d+03	-0.1122d-03	-0.9377d-03	0.2024d-01	-0.7574d-02

3.2	0.2104d+05	0.1277d+03	0.2032d-02	0.2012d-01	0.2327d-01	-0.7538d-02
3.6	0.2368d+05	0.1529d+03	-0.3520d-01	-0.4110d+00	0.2623d-01	-0.7943d-02
4.0	0.2631d+05	-0.6350d+02	0.5779d+00	0.8049d+01	0.3112d-01	-0.5991d-02

contraintes dans la calotte sph.inf.

FS	NZ	NT	MZ	QZ	DR	WZ
90.0	0.1812d-08	-0.1048d-07	-0.4321d-09	-0.3487d-08	0.4074d-13	-0.1906d-11
91.7	0.2318d-10	-0.1304d-07	-0.9301d-10	0.2194d-09	0.4370d-13	-0.5141d-12
93.3	0.9876d+11	-0.1243d+14	0.4498d+10	-0.6325d+11	-0.1474d+08	0.1647d+10
95.0	-0.4490d-04	-0.1723d-02	-0.2233d-04	-0.4937d-03	-0.1047d-07	0.5653d-07
96.7	0.9746d+11	-0.1270d+14	0.4242d+10	-0.6209d+11	-0.1494d+08	0.1639d+10
98.3	0.3935d+07	-0.2833d+08	0.5995d+06	0.2249d+08	0.1630d+03	-0.2730d+03
100.0	0.2003d+11	-0.2894d+14	-0.1675d+10	0.6677d+10	0.1496d+08	0.5872d+09
101.6	0.5894d-10	-0.1416d-07	-0.1090d-09	0.1884d-09	0.4795d-13	-0.5986d-12
103.3	0.1786d+01	-0.2264d+03	-0.2565d-01	0.1540d+03	0.1509d-02	-0.7897d-02
105.0	-0.1428d-10	0.8776d-09	0.4657d-11	0.9616d-11	-0.1857d-14	0.9341d-13

30 Mai 10:31 1985 resultats Page 5

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

efforts exteriorises

H1=	0.1886d+01	H2=	-0.2269d+01	H3=	0.8015d+01	H4=	0.2049d+02
M1=	0.2619d-01	M2=	0.9667d-01	M3=	0.5754d+00	M4=	0.3184d+01

contraintes dans le dome superieur

FI	NZ	NT	MZ	QZ	DR	WZ
.0	0.3763d-02	0.3762d-02	0.4866d-09	0.9780d-08	0.1452d-10	-0.5234d-10
3.0	0.3765d-02	0.3749d-02	0.7160d-09	0.1185d-07	-0.9720d-04	-0.4190d-08
6.0	0.3773d-02	0.3711d-02	0.1645d-08	0.1676d-07	-0.1941d-03	-0.7856d-08
9.0	0.3786d-02	0.3650d-02	0.2967d-08	-0.9041d-09	-0.2905d-03	-0.1009d-07
12.0	0.3805d-02	0.3573d-02	-0.8304d-08	-0.1953d-06	-0.3861d-03	-0.1457d-07
15.0	0.3828d-02	0.3376d-02	-0.6776d-07	-0.1308d-06	-0.4807d-03	-0.7228d-07
18.0	0.3843d-02	0.2960d-02	0.6109d-06	0.7911d-05	-0.5739d-03	0.1173d-06
21.0	0.4044d-02	0.1155d-01	-0.3031d-05	-0.8804d-04	-0.6657d-03	0.1589d-05
24.0	0.2022d-02	-0.1433d+00	0.4883d-05	0.1103d-02	-0.7526d-03	-0.4842d-04
27.0	0.4564d-01	0.3288d+01	-0.2859d-04	-0.2405d-01	-0.9067d-03	0.1121d-02
30.0	-0.1632d+01	-0.9815d+02	0.2619d-01	0.9446d+00	0.9701d-03	-0.2274d-01

contraintes dans l'anneau

FP	NZ	NT	MZ	QZ	DR	wz
75.0	0.5581d+00	0.1367d+02	0.2619d-01	0.2101d+01	0.7522d-03	-0.2119d-02
76.7	-0.1297d+00	0.9725d+00	0.6699d-01	-0.5311d+00	0.9227d-03	-0.6906d-03
78.4	-0.6609d-01	-0.9965d+00	0.1137d-01	-0.2999d+00	0.9544d-03	0.4709d-04
80.0	-0.6465d-02	-0.2743d+00	-0.3471d-02	-0.1089d-01	0.9502d-03	0.7089d-04
81.7	0.2413d-03	0.6867d-01	-0.1521d-02	0.1930d-01	0.9502d-03	0.1537d-04
83.3	0.4722d-03	0.1011d+00	-0.1762d-02	-0.2606d-01	0.9534d-03	-0.8630d-05
85.0	-0.2591d-02	-0.2472d+00	-0.5795d-02	-0.1639d-01	0.9608d-03	-0.8593d-04
86.7	-0.2465d-01	-0.1387d+01	0.8473d-02	0.3566d+00	0.9781d-03	-0.1314d-03
88.3	-0.3223d-01	0.6239d-01	0.9174d-01	0.9776d+00	0.9600d-03	0.7482d-03
90.0	-0.3836d-02	0.1719d+02	0.9666d-01	-0.2269d+01	0.7317d-03	0.3253d-02

contraintes dans le cylindre

Z	NZ	NT	MZ	QZ	DR	WZ
.0	0.3699d-02	-0.9168d+02	0.9667d-01	-0.2269d+01	-0.2265d-03	-0.5727d-02
.4	0.2993d+04	0.2030d+02	-0.7186d-02	0.1259d+00	0.2469d-02	-0.8728d-02
.8	0.5986d+04	0.3181d+02	0.4741d-03	-0.6714d-02	0.5968d-02	-0.8659d-02
1.2	0.8978d+04	0.4801d+02	-0.2903d-04	0.3440d-03	0.9430d-02	-0.8658d-02
1.6	0.1197d+05	0.6400d+02	0.1698d-05	-0.1685d-04	0.1289d-01	-0.8659d-02
2.0	0.1496d+05	0.8000d+02	-0.3956d-06	-0.8377d-06	0.1636d-01	-0.8658d-02
2.4	0.1796d+05	0.9600d+02	0.5934d-05	0.4082d-04	0.1982d-01	-0.8658d-02
2.8	0.2095d+05	0.1120d+03	-0.1117d-03	-0.9338d-03	0.2328d-01	-0.8661d-02

3.2	0.2394d+05	0.1277d+03	0.2023d-02	0.2003d-01	0.2675d-01	-0.8625d-02
3.6	0.2694d+05	0.1529d+03	-0.3505d-01	-0.4093d+00	0.3014d-01	-0.9028d-02
4.0	0.2993d+05	-0.6257d+02	0.5754d+00	0.8015d+01	0.3545d-01	-0.7086d-02

contraintes dans la calotte sph.inf.

FS	NZ	NT	MZ	QZ	DR	WZ
90.0	0.8653d+03	0.3840d+05	0.1570d+04	-0.5482d+04	0.2498d+00	0.6881d+01
91.7	0.5822d+09	0.1119d+11	0.2780d+09	-0.1097d+10	0.5311d+05	0.2240d+07
93.3	0.5699d-13	0.5051d-09	0.3496d-12	-0.3637d-12	-0.5457d-15	0.1968d-13
95.0	0.2705d-08	0.1400d-07	-0.3730d-09	-0.6472d-08	-0.5629d-13	-0.1557d-11
96.7	-0.3738d-10	0.3772d-09	0.7451d-11	-0.4060d-10	0.9293d-15	0.2570d-12
98.3	-0.1017d+06	0.9270d+07	0.1698d+06	0.1720d+07	0.5605d+02	0.1646d+03
100.0	0.1807d+03	0.2927d+05	0.8917d+03	0.1782d+04	0.1912d+00	0.2677d+01
101.6	-0.9805d-01	0.6791d+02	0.2642d+01	-0.5000d+01	0.4532d-03	0.1008d-01
103.3	-0.1155d+03	0.1503d+04	-0.7704d+02	-0.2479d+04	-0.9921d-02	0.5821d-01
105.0	0.1510d-12	0.4349d-09	0.1749d-12	0.2066d-12	0.3763d-15	0.1333d-13

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

efforts exteriorises

H1=	0.4956d+01	H2=	-0.2261d+01	H3=	0.3513d+01	H4=	0.9027d+01
M1=	0.8662d-02	M2=	0.9157d-01	M3=	0.2551d+00	M4=	0.1404d+01

contraintes dans le dome superieur

FI	NZ	NT	MZ	QZ	DR	WZ
.0	0.5314d-05	0.2511d-05	0.9479d-09	0.2913d-07	0.5520d-10	-0.5820d-09
3.0	0.5303d-05	0.2225d-05	0.1651d-08	0.3734d-07	-0.9719d-04	-0.3814d-09
6.0	0.5270d-05	0.2575d-05	0.4856d-08	0.6299d-07	-0.1941d-03	0.1114d-08
9.0	0.5318d-05	0.1353d-04	0.1191d-07	0.4584d-07	-0.2905d-03	0.7919d-08
12.0	0.6391d-05	0.6585d-04	-0.1330d-07	-0.5589d-06	-0.3861d-03	0.1530d-07
15.0	0.7841d-05	-0.1211d-03	-0.2566d-06	-0.1376d-05	-0.4807d-03	-0.1525d-06
18.0	-0.4137d-04	-0.1721d-02	0.1632d-05	0.2706d-04	-0.5738d-03	0.9771d-07
21.0	0.4220d-03	0.2931d-01	-0.3156d-05	-0.2405d-03	-0.6661d-03	0.8772d-05
24.0	-0.4288d-02	-0.4557d+00	-0.9223d-04	0.2479d-02	-0.7465d-03	-0.1965d-03
27.0	0.9148d-01	0.1015d+02	0.2322d-02	-0.5281d-01	-0.1039d-02	0.4489d-02
30.0	-0.4292d+01	-0.3314d+03	0.8662d-02	0.2478d+01	0.5482d-02	-0.1107d+00

contraintes dans l'anneau

FP	NZ	NT	MZ	QZ	DR	wz
75.0	0.1478d+01	0.3233d+02	0.8658d-02	0.5526d+01	0.5116d-03	-0.4568d-02
76.7	-0.2461d+00	0.3179d+01	0.1529d+00	-0.1040d+01	0.8941d-03	-0.1712d-02
78.4	-0.1480d+00	-0.2184d+01	0.3052d-01	-0.7163d+00	0.9700d-03	0.5639d-04
80.0	-0.9158d-02	-0.7002d+00	-0.7240d-02	-0.4864d-01	0.9558d-03	0.1615d-03
81.7	0.8388d-02	0.8370d-01	-0.3913d-02	0.4841d-01	0.9500d-03	0.3180d-04
83.3	0.5273d-02	0.1337d+00	-0.1863d-02	-0.1657d-01	0.9529d-03	-0.1330d-04
85.0	0.1060d-02	-0.2431d+00	-0.5444d-02	-0.1582d-01	0.9608d-03	-0.8640d-04
86.7	-0.2050d-01	-0.1358d+01	0.8567d-02	0.3495d+00	0.9777d-03	-0.1259d-03
88.3	-0.2750d-01	0.1060d+00	0.8970d-01	0.9462d+00	0.9594d-03	0.7389d-03
90.0	-0.1059d-04	0.1686d+02	0.9156d-01	-0.2260d+01	0.7362d-03	0.3164d-02

contraintes dans le cylindre

Z	NZ	NT	MZ	QZ	DR	WZ
.0	0.8442d-05	-0.9341d+02	0.9157d-01	-0.2261d+01	-0.2127d-03	0.3165d-02
.4	-0.3119d+00	0.4413d+01	-0.6964d-02	0.1262d+00	-0.9957d-03	-0.8126d-04
.8	-0.6239d+00	-0.1967d+00	0.4653d-03	-0.6765d-02	-0.9592d-03	0.6471d-06
1.2	-0.9358d+00	0.8069d-02	-0.2874d-04	0.3485d-03	-0.9612d-03	0.1194d-05
1.6	-0.1248d+01	-0.2863d-03	0.1684d-05	-0.1721d-04	-0.9615d-03	0.9102d-06
2.0	-0.1560d+01	-0.8733d-05	-0.2257d-06	0.1130d-06	-0.9619d-03	0.9335d-06
2.4	-0.1872d+01	0.8511d-04	0.2603d-05	0.1764d-04	-0.9622d-03	0.1007d-05
2.8	-0.2184d+01	0.2621d-02	-0.4909d-04	-0.4057d-03	-0.9626d-03	-0.1618d-06

3.2	-0.2496d+01	-0.1282d+00	0.8910d-03	0.8734d-02	-0.9620d-03	0.1611d-04
3.6	-0.2807d+01	0.3828d+01	-0.1548d-01	-0.1789d+00	-0.9940d-03	-0.1685d-03
4.0	-0.3119d+01	-0.9629d+02	0.2551d+00	0.3513d+01	-0.1934d-03	0.8375d-03

contraintes dans la calotte sph.inf.

FS	NZ	NT	MZ	QZ	DR	WZ
90.0	-0.2116d-10	-0.1178d-10	0.3407d-11	-0.2592d-10	-0.3027d-16	0.1259d-12
91.7	-0.2955d-10	-0.4831d-09	0.2681d-11	-0.4412d-10	-0.1323d-14	0.1373d-12
93.3	-0.2527d-10	-0.2139d-09	0.3233d-11	-0.3414d-10	-0.5676d-15	0.1336d-12
95.0	-0.2739d-10	-0.3382d-09	0.3017d-11	-0.3886d-10	-0.9117d-15	0.1360d-12
96.7	-0.2633d-10	-0.2741d-09	0.3138d-11	-0.3645d-10	-0.7331d-15	0.1349d-12
98.3	-0.2686d-10	-0.3055d-09	0.3081d-11	-0.3764d-10	-0.8201d-15	0.1355d-12
100.0	-0.2659d-10	-0.2897d-09	0.3110d-11	-0.3704d-10	-0.7764d-15	0.1352d-12
101.6	-0.2672d-10	-0.2975d-09	0.3096d-11	-0.3734d-10	-0.7980d-15	0.1354d-12
103.3	-0.2666d-10	-0.2936d-09	0.3103d-11	-0.3719d-10	-0.7872d-15	0.1353d-12
105.0	-0.2669d-10	-0.2956d-09	0.3099d-11	-0.3727d-10	-0.7926d-15	0.1354d-12

BIBLIOGRAPHIE

1. Moment Capacity and Cracking Behavior of Ferro-cement in Flexure, D. LOGAN et P. SHAH, ACI Journal n°: 70-73, Dec. 1973

2. State - of - the Art Report, on Ferrocement, ACI Committee 549, CONCRETE International N°: ACI 549 R - 82, Aout 1982

3. New Reinforcing Materials in Concrete, P. SHAH, ACI Journal, Mai 1974, p.257 à 262

4. M. MOUSTAPHA NDIAYE, _Etude de toiture en Ferrociment_, Notes E.P.M, Dec. 1982

5. EMMANUEL GHARGHOURY, _Analyse des Coques Elastiques_, Notes de Cours de L'E.P.M, Mai 1978

6. ANTOINE E. NAAMAN, _Reinforcing Mechanisms in Ferrociment_, Notes M.I.T, Sept. 1970

7. Calcul, Propriétés et utilisation du Ferrociment, L. LACHANCE - A. PICARD, Revue de L'Ingénieur, Nov - Dec. 1978

8. Ferrocement - Applications in Developing countries, AD HOC PANEL, Panel Report PN-AAA-575, Fev. 1973.

9. A. PADUART, *Les Voiles Minces en Béton Armé*, Ed. Eyrolles, Eyrolles Editeur, 1969.