



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
Ecole Nationale Polytechnique

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE & POPULAIRE

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR  
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Ecole Nationale Polytechnique

Département : Génie Civil

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

**PROJET DE FIN D'ETUDE**

*Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie Civil*

**Thème**

**ETUDE D'UN REFRIGERANT ATMOSPHERIQUE  
EN BETON ARME  
A TIRAGE MECANIQUE  
DE TYPE : A COURANTS CROISES**

*Proposé par :*  
COSIDER

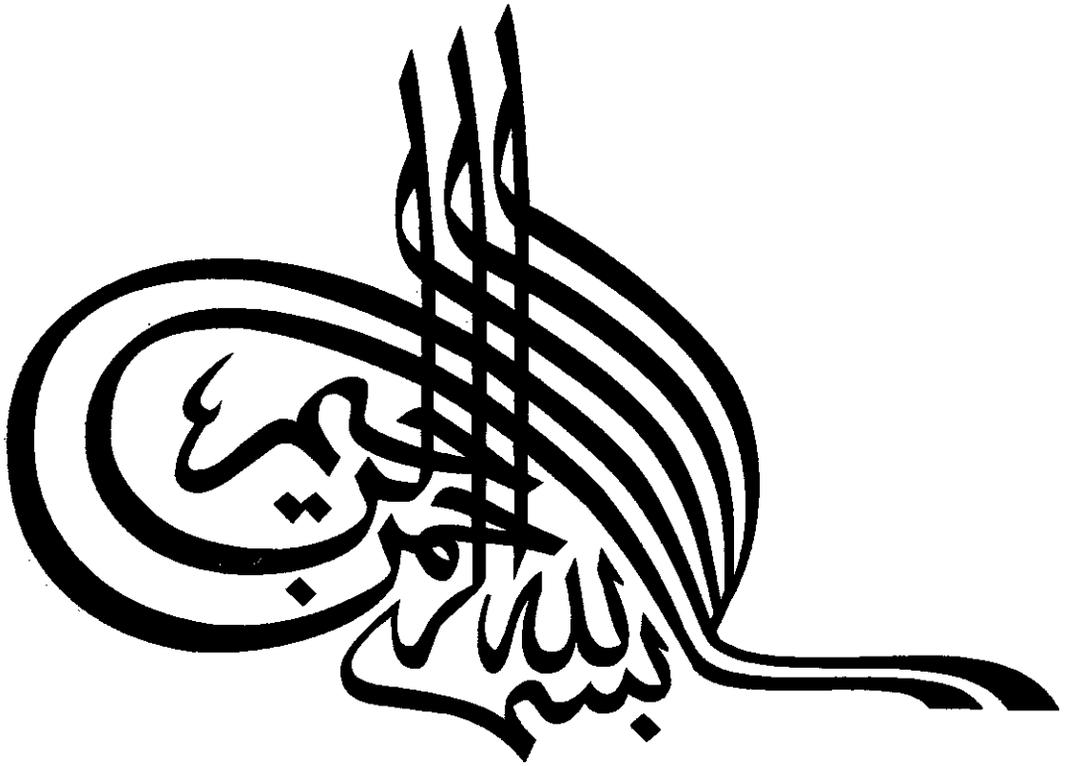
*Dirigé par :*  
Mme : A. CHIKH  
Mr : R. BOUTEMEUR

*Etudié par :*  
Mr : GHARIB Mohamed

**Promotion : 1999**

E.N.P 10, Avenue Hassan Badi, EL HARRACH, ALGER  
Tél. (02) 52.53.01/03 Fax : (02) 52.29.73 Télex : 64147 ENP E-mail : ENP@IST.CERIST.DZ

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique





## DEDICACE

*Je dédie ce modeste travail :*

- *A mes très chers parents*
- *A mes frères*
- *A mes sœurs*
- *A Mohamed MEGREZ*
- *A tous mes amis ....*

MOHAMED



## REMERCEMENTS

*Je remercie Dieu qui m'a donné la volonté et le courage afin d'arriver à la finalité de ce travail.*

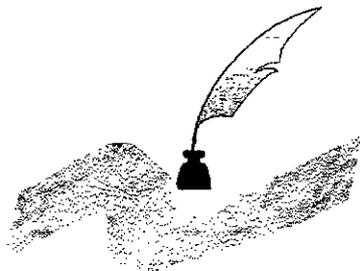
*Ma sincère gratitude et ma profonde reconnaissance à mes deux promoteurs, Mme CHIKH et Mr BOUTEMEUR, pour m'avoir estimé capable de traiter ce sujet et pour toute l'aide et le soutien dont ils ont fait preuve durant ces longs mois de travail.*

*Je remercie en particulier Mr DEMIDEM, pour l'aide qui m'a apporté et à sa disponibilité, et Mr BLOUD pour ces précieux conseils.*

*Je tiens à adresser mes chaleureux remerciements à tous les gens de COSIDER, en particulier Mr G.NADJIB pour sa collaboration.*

*Ainsi je tiens à remercier les membres de jury d'avoir accepté à examiner et évaluer mon travail.*

*Mes remerciements vont aussi aux enseignants qui ont participé à ma formation, à toute la promotion 1999, sans oublier les gens du centre de calcul, la bibliothèque, et tous ce qui m'ont aidé de près ou de loin.*



## ملخص:

يهدف هذا العمل إلى دراسة سكونية وشاملة لبرج تبريد هوائي بالخرسانة المسلحة، ذوا نظام سحب ميكانيكي، وهذا لتبريد المياه الجوفية عن عمق يزيد على 2500 متر، ذات درجة حرارة مئوية 55° في منطقة جامعة بولاية الوادي (الجنوب الشرقي)، وحفظها إلى ما يقارب 20° لاستعمالها في مجال الري. لقد أجزت دراسة هذا المشروع وفقا لقانون الخرسانة المسلحة في الحالات الخدية "BAEL83" كما تمت حساب القوى الداخلية في مختلف عناصر الهيكل باستعمال برنامج SAP90، المبني على طريقة العناصر المنتهية وهذا لمعرفة صمودها تحت مختلف الحمولات الخارجية. القارئ الكريم، عبر هذا العمل، يمكنه أن يرمق دراسة تحليلية مفصلة حول صمود كل أجزاء المنشأ وكيفية تسليحها.

---

## RESUME :

Ce travail consiste en l'étude d'un réfrigérant atmosphérique en béton armé, à ventilateur aspirant de forme prismatique régulière. Le calcul des efforts internes dans les différents éléments de la construction est effectué en utilisant le logiciel de calcul des structures SAP90 basé sur la méthode des éléments finis.

Cette étude est réalisée conformément aux règlements en vigueur donnés par les BAEL83.

---

## ABSTRACT:

**This work consists in the survey of an atmospheric refrigerator to suction fan of oblong geometric shape. The count of efforts on the different parts of the construction is done while using the software of structure SAP90 count based on the method of elements finished.**

**This survey is achieved consistently to regulations in force given by the BAEL83.**

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

---

## TABLIÉ DES MATIÈRES

---

# TABLE DES MATIERES

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
المكتبة — BIBLIOTHEQUE  
Ecole Nationale Polytechnique

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

NOTATIONS

INTRODUCTION GENERALE ..... 1

## CHAPITRE I

### GENERALITES SUR LES REFRIGERANTS

1.1 DEFINITION .....	3
1.2 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT .....	3
1.3 DIFFERENTS TYPES DE REFRIGERANTS .....	4
1.3.1 Réfrigérants à ventilateurs soufflants .....	4
1.3.2 Réfrigérants à tirage naturel .....	4
1.3.3 Réfrigérants à ventilateurs aspirants .....	5
1.3.4 Réfrigérants monoblocs à enveloppe plastique .....	6
1.3.5 Réfrigérants monoblocs à enveloppe métallique .....	6

## CHAPITRE II

### PRESENTATION DU PROJET

2.1 DESCRIPTION DE L'OUVRAGE .....	7
2.1.1 Radier .....	7
2.1.2 Parois verticales .....	7
2.1.3 Couverture .....	8
2.1.4 Poteaux .....	8
2.1.5 Poutres .....	8
2.1.6 Poutrelles .....	8
2.1.7 Escaliers .....	8
2.1.8 Equipements mécaniques et hydrodynamiques .....	8

## CHAPITRE III

### CARACTERISTIQUES MECANIQUES DES MATERIAUX

3.1 BETON .....	16
3.1.1 Résistance mécanique du béton .....	16
3.1.2 Contraintes limites .....	17
3.1.3 Diagramme contraintes-déformations .....	18
3.1.4 Module de déformation longitudinale .....	19
3.1.5 Coefficient de poisson « $\nu$ » .....	19
3.2 LES ACIERS .....	19
3.2.1 Types d'aciers utilisés .....	19
3.2.2 Contraintes limites .....	20
3.3 HYPOTHESES DE CALCUL .....	21
3.3.1 A l'Etat Limite Ultime .....	21
3.3.2 A l'Etat Limite de service .....	22

## CHAPITRE IV

### PRESENTATION DU LOGICIEL SAP90

4.1 INTRODUCTION .....	24
4.2 MODELISATION .....	24
4.3 PREPARATION .....	25
4.4 FONCTIONNEMENT .....	25
4.5 ANALYSE .....	26
4.5.1 Analyse statique .....	26
4.5.2 Analyse dynamique .....	27

## CHAPITRE V

### CALCUL DES DALLES

5.1 METHODES DE CALCUL .....	29
5.1.1 Méthode de R.BARES .....	29
5.1.2 Méthode de Pigeaud .....	29
5.1.3 Calcul d'après les règlements BAEL .....	30
5.1.4 Calcul automatique .....	30
5.2 DALLE I .....	31
5.2.1 Calcul à l'ELU .....	32
5.2.2 Calcul à l'ELS .....	33
5.2.3 Vérification du ferrailage minimum .....	34
5.2.4 Vérification de la flèche .....	35
5.2.5 Vérification au cisaillement .....	35
5.2.6 Schéma de ferrailage .....	36
5.3 DALLE II .....	36
5.3.1 Calcul à l'ELU .....	37
5.3.2 Calcul à l'ELS .....	38
5.3.3 Vérification du ferrailage minimum .....	39
5.3.4 Vérification de la flèche .....	39
5.3.5 Vérification au cisaillement .....	39
5.3.6 Schéma de ferrailage .....	40

## CHAPITRE VI

### ETUDE AU VENT

6.1 INTRODUCTION .....	44
6.2 FORCE DE TRAINEE .....	44
6.2.1 Vent normal à la face $S_a$ (grande surface) .....	45
6.2.2 Vent normal à la face $S_b$ (petite surface) .....	47
6.3 FORCE DE DERIVE .....	49
6.4 FORCE DE PORTANCE .....	50
6.5 SOLLICITATION D'ENSEMBLE .....	52

## CHAPITRE VII

### ETUDE DES VOILES

7.1 SOUS CHARGES HORIZONTALES .....	53
7.1.1 Caractéristiques des voiles .....	53
7.1.2 Distribution des efforts horizontaux .....	55
7.2 SOUS CHARGES VERTICALES .....	56
7.2.1 Revenant au voile 1 .....	56
7.2.2 Revenant au voile 2 et 3 .....	57
7.3 EFFET DE LA TEMPERATURE .....	58
7.3.1 Evaluation du gradient thermique .....	58
7.3.2 Moment d'origine thermique .....	60
7.3.3 Pente du diagramme des contraintes .....	60
7.4 CALCUL DES EFFORTS PAR LE SAP90 .....	62
7.4.1 Interprétation .....	63
7.5 CALCUL DES ARMATURES .....	63
7.5.1 Armatures verticales .....	63
7.5.2 Armatures horizontales .....	64
7.6 SCHEMA DE FERRAILLAGE .....	66

## CHAPITRE VIII

### CALCUL DU BASSIN

8.1 INTRODUCTION .....	69
8.2 CALCUL DES PAROIS .....	69
8.2.1 Action de l'eau .....	69
8.2.3 Calcul de la paroi .....	70
8.2.3 Vérification au cisaillement .....	71
8.2.4 Schéma de ferrailage .....	71
8.3 CALCUL DU RADIER .....	72
8.3.1 Contraintes du radier sur le sol fondation .....	72
8.3.2 Dimensionnement du radier .....	73
8.3.3 Calcul des armatures .....	73
8.3.4 Vérification au poinçonnement .....	74
8.3.5 Schéma de ferrailage .....	75

## CHAPITRE IX

### CALCUL DES PORTIQUES

9.1 MODELISATION .....	78
9.2 CALCUL DES POUTRES .....	82
9.2.1 Calcul à l'ELU .....	82
9.2.2 Calcul à l'ELS .....	82
9.2.3 Vérification du ferrailage minimal .....	82
9.2.4 Vérification à l'effort tranchant .....	82
9.3 CALCUL DES POTEAUX .....	83
9.3.1 Etude de la compression simple à l'ELU .....	83
9.3.2 Vérification des contraintes à l'ELS .....	84
9.4 SCHEMAS DE FERRAILLAGES .....	85

---

## CHAPITRE X

### CALCUL DES POUTRES

---

10.1 FERRAILLAGES DES POUTRES .....	86
10.2 ETUDE DES POUTRES CROISEES .....	88
10.2.1 Analyse modale .....	88
10.2.2 Vérification des modes de vibrations .....	88
10.2.3 Comparaison des résultats .....	90
10.2.4 Calcul des poutres $Q_6$ et $Q_7$ .....	90
10.2.5 Calcul de la poutre $Q_8$ .....	91
10.3 SCHEMAS DE FERRAILLAGES .....	92

---

## CHAPITRE XI

### CALCUL DES ELEMENTS

---

11.1 ESCALIERS .....	94
11.1.1 Calcul de la volée .....	94
11.1.2 Calcul de la poutre palière .....	95
11.1.3 Schémas de ferrailrages .....	98
11.2 CALCUL DES DALLETTES .....	99
11.3 CALCUL DES PERSIENNES .....	99

CONCLUSION GENERALE .....	100
---------------------------	-----

## BIBLIOGRAPHIE

## ANNEXES

- ANNEXES I Modules de SAP90
  - ANNEXES II Fichiers de données
  - ANNEXES III Fichiers résultats
  - ANNEXES IV Vues de la structure
- 
-

## LISTE DES FIGURES

N°	Titre	Page	N°	Titre	Page
1.1	Schéma d'une circulation d'eau industrielle	3	8.1	Action de l'eau	69
1.2	Réfrigérant à ventilateur soufflant	4	8.2	Sollicitations d'ensemble	70
1.3	Réfrigérant à tirage naturel	4	8.3	Ferraillage des parois	71
1.4	Réfrigérant à courants croisés	5	8.4	Ferraillage du radier	75
1.5	Réfrigérant à contre-courant	5	8.5	Les nœuds	76
1.6	Réfrigérant monoblocs à enveloppe plastique	6	8.6	Les éléments	76
1.7	Réfrigérant monoblocs à enveloppe métallique	6	8.7	Diagramme des moments	77
2.1	Vue en perspective	10	8.8	Déformée du radier	77
2.2	Vue en plan	11	9.1	Portique extérieur	80
2.3	Elévation coupe A-A	12	9.2	Chargement extérieur	80
2.4	Coupe B-B	13	9.3	Portique intérieur	81
2.5	Vue F-F	14	9.4	Chargement extérieur	81
3.1	Diagramme contraintes-déformations du béton	18	9.5	Poutre Q <sub>1</sub>	82
3.2	Diagramme contraintes-déformations des aciers	20	9.6	Poteau P <sub>1</sub>	83
5.1	Dalle I	31	9.7	Ferraillage des poteaux	85
5.2	Ferraillage de la dalle I	36	9.8	Ferraillage des poutres (Q <sub>1</sub> )	85
5.3	Dalle II	37	10.1	Section des poutres croisées	88
5.4	Ferraillage de la dalle II	40	10.2	Poutres croisées Q <sub>6</sub> , Q <sub>7</sub> , Q <sub>8</sub>	89
5.5	Les nœuds	41	10.3	1 <sup>er</sup> mode de vibration	89
5.6	Les éléments	41	10.4	2 <sup>ème</sup> mode de vibration	89
5.7	Déformée de la dalle I	42	10.5	3 <sup>ème</sup> mode de vibration	89
5.8	Les nœuds	42	10.6	Vue en plan des poutres croisées	90
5.9	Les éléments	43	10.7	Poutre Q <sub>2</sub>	92
5.10	Déformée de la dalle II	43	10.8	Poutre Q <sub>3</sub>	92
6.1	Face S <sub>a</sub> et S <sub>b</sub>	45	10.9	Poutre Q <sub>4</sub>	92
6.2	Ouverture transversale	51	10.10	Poutrelles Q <sub>9,10,11</sub>	92
7.1	Centre de masse	53	10.11	Poutre Q <sub>5</sub>	93
7.2	Distribution des efforts horizontaux	55	10.12	Poutres Q <sub>6</sub> , Q <sub>7</sub>	93
7.3	Dalle reposant sur 4 appuis	56	10.13	Poutre Q <sub>8</sub>	93
7.4	Calcul du gradient thermique	59	11.1	Schéma statique d'une volée	94
7.5	Gradient thermique	60	11.2	Poutre palière	96
7.6	Variation de la température dans la section	61	11.3	Section fictive de la poutre palière	97
7.7	Diagramme des contraintes	62	11.4	Ferraillage de la poutre palière	98
7.8	Ferraillage des voiles	66	11.5	Ferraillage d'une volée	98
7.9	Les éléments	67	11.6	Détail d'une marche	98
7.10	Forme indéformée des voiles	67	11.7	Ferraillage des dallettes	99
7.11	Diagramme des moments	68	11.8	Ferraillage des persiennes	99
7.12	Déformée des voiles	68			

## LISTE DES TABLEAUX

N°	Titre	Page
5.1	Moments max. en travées et appuis (Dalle I)	32
5.2	Moments max. en travées et appuis (Dalle II)	37
6.1	Forces de traînées pour les différents niveaux	49
6.2	Sollicitations d'ensemble	52
8.1	Moments max. en travées et appuis du radier	73
8.2	Sections d'armatures du radier	73
10.1	Ferraillages des poutres	87
10.2	Analyse modale	88

**Mots-clés :** air - albien - bassin - convection - échangeur - lattes -  
modélisation - nœuds - pression - radier - réfrigérant -  
évaporation - flux - hydraulique - SAP90 - séparateur -  
température - tirage - vapeur - ventilateur - vibration.

## NOTATIONS



- $f_{c28}$  : résistance à la compression à 28 jours,  
 $f_{t28}$  : résistance à la traction à 28 jours,  
 $f_{bu}$  : contrainte du béton à l'ELU,  
 $\gamma_b$  : coefficient de sécurité,  
 $\sigma_b$  : contrainte du béton à l'ELS,  
 $\bar{\sigma}_b$  : contrainte admissible du béton à l'ELS,  
 $\tau_u$  : contrainte de cisaillement à l'ELU,  
 $\bar{\tau}_u$  : contrainte admissible de cisaillement à l'ELU,  
 $E_{ij}$  : module de déformation instantanée du béton,  
 $E_{vj}$  : module de déformation différée du béton,  
 $\nu$  : coefficient de Poisson,  
 $f_e$  : limite élastique de l'acier,  
 $\varepsilon$  : déformation,  
 $E_s$  : module d'élasticité de l'acier,  
 $f_{su}$  : contrainte de l'acier à l'ELU,  
 $\gamma_s$  : coefficient de sécurité,  
 $\sigma_s$  : contrainte de l'acier à l'ELS,  
 $\bar{\sigma}_s$  : contrainte admissible de l'acier à l'ELS,  
 $\eta$  : coefficient de fissuration,  
 $n$  : coefficient d'équivalence,  
 $z$  : bras de levier,  
 $y$  : position de l'axe neutre,  
 $d$  : hauteur utile,  
 $d'$  : enrobage,  
 $l$  : longueur,  
 $b$  : largeur,  
 $h$  : hauteur totale,  
 $A_s$  : section d'armature tendue,  
 $A_{sc}$  : section d'armature comprimée,  
 $A_{smin}$  : section d'armature minimale,  
 $I$  : inertie,  
 $\mu_{bu}$  : moment réduit à l'ELU,  
 $\mu_{lu}$  : moment limite réduit à l'ELU,  
 $\mu_{ser}$  : moment réduit à l'ELS,  
 $\mu_{ab}$  : moment limite réduit à l'ELS,
- $P$  : poids,  
 $Q_u$  : charge de calcul à l'ELU,  
 $Q_{ser}$  : charge de calcul à l'ELS,  
 $\lambda$  : l'éclatement,  
 $l_f$  : longueur de flambement,  
 $i$  : rayon de giration,  
 $B$  : aire de la section du béton,  
 $A_{br}$  : section de béton réduite,  
 $s$  : espacement,  
 $s_t$  : espacement transversal,  
 $M_{tu}$  : moment de torsion à l'ELU,  
 $\tau_{ut}$  : contrainte tangentielle de torsion,  
 $u$  : périmètre,  
 $\mu$  : coefficient de dilatation thermique,  
 $HA$  : haute adhérence,  
 $RL$  : rond lisse,  
 $TS$  : treillis soudé,  
 $M_u$  : moment fléchissant à l'ELU,  
 $M_{ser}$  : moment fléchissant à l'ELS,  
 $N_u$  : effort normal à l'ELU,  
 $N_{ser}$  : effort normal à l'ELS,  
 $V_u$  : effort tranchant à l'ELU,  
 $G$  : centre de masse,  
 $C$  : centre de torsion,  
 $R$  : réaction,  
 $H$  : effort horizontal,  
 $K$  : conductivité thermique,  
 $t$  : gradient thermique,  
 $f$  : flèche,  
 $f_{adm}$  : flèche admissible,  
 $\phi_l$  : diamètre des armatures longitudinales,  
 $\phi_t$  : diamètre des armatures transversales,  
 $A.N$  : application numérique,  
 $CCL$  : conclusion.

---

---

# INTRODUCTION GENERALE

---

---

*« Construire, c'est collaborer avec la terre ; c'est mettre une marque  
humaine sur un paysage qui sera modifié à jamais... »*

**Marguerite YOURCENAR**

## INTRODUCTION GENERALE

De nombreux procédés industriels et agricoles nécessitent l'utilisation d'un moyen de refroidissement.

Les centrales électriques et nucléaires constituent un cas exemplaire compte tenu des échanges thermiques mis en jeu. Ainsi les grandes industries se trouvent dans l'obligation d'ériger de coûteux ouvrages pour récupérer et refroidir une eau qui devient de plus en plus rare. Il était commode d'obtenir ce refroidissement en cycle ouvert, toutefois le choix de ce principe est devenu soit très onéreux soit même impossible compte tenu des ressources disponibles ou des conditions réglementaires de protection de l'environnement concernant la limite de pollution thermique des fleuves ou rivières.

Dans le domaine agricole et surtout dans les zones sahariennes, le refroidissement des eaux joue un rôle très important afin d'exploiter et utiliser les eaux albiennes qui se trouvent dans plusieurs parties du grand sud algérien à des profondeurs assez importantes et à des températures élevées.

- Ce travail a été abordé par une synthèse des différents types de réfrigérants, résumée dans le chapitre I.
- Le chapitre II présente l'ouvrage, ses dimensions, son implantation, les différents éléments constituant le réfrigérant ainsi que les équipements nécessaires à son fonctionnement.

- Le chapitre III précise les caractéristiques des matériaux utilisés et les hypothèses de calcul.
- Les efforts internes ont été déterminés à l'aide du logiciel de calcul des structures SAP90, qui est présenté dans le chapitre IV.
- L'étude au vent est présentée dans le chapitre VI.
- Le calcul et le ferrailage des éléments résistants de l'ouvrage sont dans les chapitres V , VII, VIII, IX et X.
- Le chapitre XI traite les éléments secondaires.
- La conclusion générale met l'accent sur les difficultés rencontrées, notamment la non-disponibilité de la bibliographie spécialisée pour ces types de structures.

# CHAPITRE I

---

---

## **GENERALITES SUR LES REFRIGERANTS**

---

---

*« On fait de la science avec des faits, comme on fait une maison avec des pierres ; mais une accumulation de faits n'est pas plus une science qu'un tas de pierres n'est une maison. »*

**POINCARÉ**

## CHAPITRE I GENERALITES SUR LES REFRIGERANTS

### 1.1 DEFINITION

Un réfrigérant atmosphérique est un échangeur thermique qui enlève à un circuit d'eau une certaine quantité de chaleur. Celle-ci est transmise à l'atmosphère, l'eau étant restituée à une température plus basse.

### 1.2 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

L'air sert de fluide refroidissant en utilisant le phénomène physique de l'évaporation. Le transfert de chaleur de l'eau à l'air s'effectue par convection et par évaporation. En moyenne, et selon l'état de l'air à l'entrée du réfrigérant, 10 à 15% des calories seulement sont enlevées par convection. [10]

Le phénomène d'évaporation est donc le plus important et son efficacité est directement liée à la conception des surfaces d'échange.

La limite théorique de réfrigération reste la température humide de l'air ambiant (température à laquelle l'eau pure est évaporée dans l'air humide jusqu'à saturation à la température considérée).

Deux facteurs déterminent un réfrigérant : [14]

- La quantité d'air véhiculé
- La surface d'échange.

L'air est mis en mouvement par :

- Tirage naturel
- Ventilation artificielle.

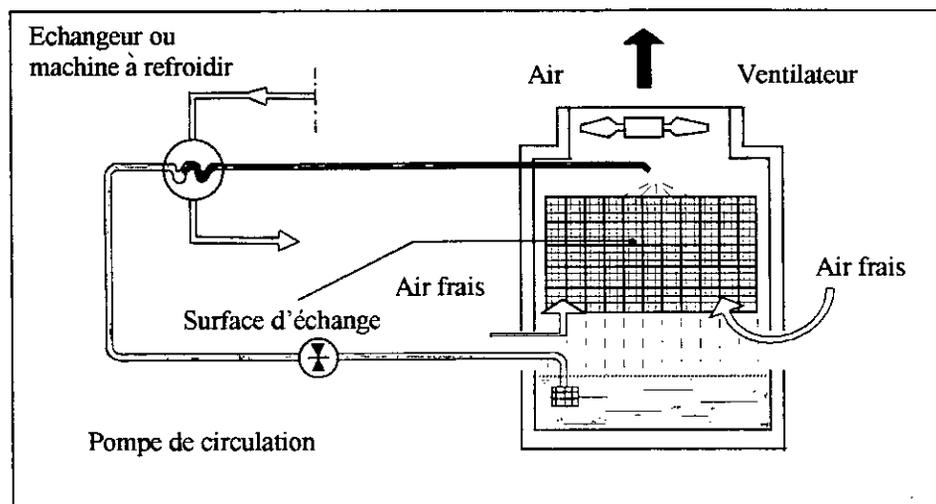


Figure 1.1 : Schéma d'une circulation d'eau industrielle en circuit fermé avec un réfrigérant atmosphérique.

## 1.3 DIFFERENTS TYPES DE REFRIGERANTS

### 1.3.1 Réfrigérants à ventilateurs soufflants : (fig.1.2)

Dans ces réfrigérants l'air est soufflé par un ou plusieurs ventilateurs placés à la base. Cette disposition facilite l'entretien des parties mécaniques.

Les ventilateurs peuvent être entraînés par calage direct sur le bout d'arbre d'un moteur électrique, par l'intermédiaire d'un système de poulies et courroies ou d'un moto-réducteur.

Les réfrigérants à ventilateurs soufflants sont généralement utilisés pour les petits ou moyens débit.

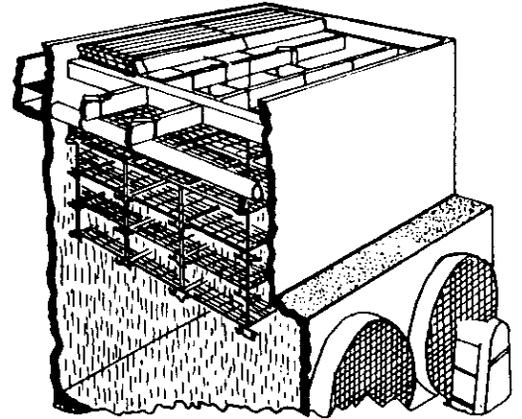


Figure 1.2 : Réfrigérateur à ventilateur soufflant.

### 1.3.2 Réfrigérants à tirage naturel : (fig.1.3)

Dans ces réfrigérants, l'air est mis en mouvement par le seul effet de cheminée. Il n'y a pas d'énergie consommée.

Ils sont particulièrement fiables et en général utilisés pour le refroidissement de très grandes quantités d'eau (actuellement plus de 150 000 m<sup>3</sup>/h sur certains appareils).

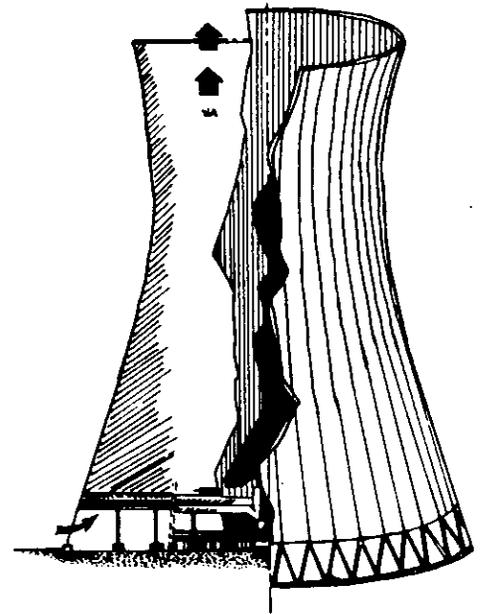


Figure 1.3 : Réfrigérateur à tirage naturel.

### 1.3.3 Réfrigérants à ventilateurs aspirants :

#### a- Type à courants croisés : (fig.1.4)

L'eau est distribuée à partir de plates-formes extérieures.

L'air aspiré par le ventilateur circule horizontalement.

Les entrées d'air sont situées sur toute la surface des façades.

L'eau est mise en contact avec l'air selon deux flux qui se croisent.

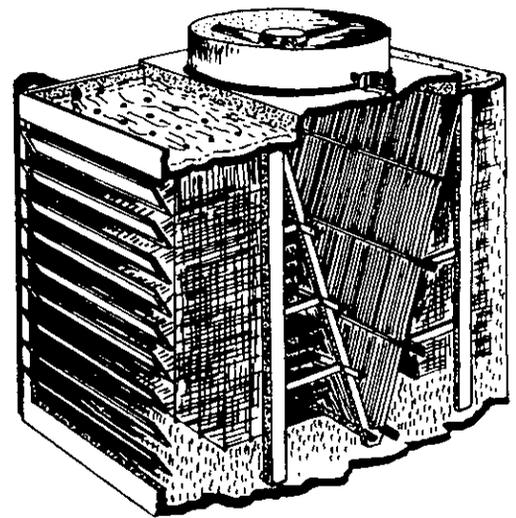


Figure 1.4 : Réfrigérant à courants croisés.

#### b- Type à contre-courant : (fig.1.5)

Dans ces réfrigérants, l'air est aspiré par un ou plusieurs ventilateurs. Les flux d'air et d'eau sont parallèles mais de sens contraires.

Les ventilateurs dont les diamètres peuvent dépasser 20m, sont entraînés par des systèmes mécaniques comprenant en général des réducteurs à renvoi d'angle, arbres de transmission et moteurs électriques.

Pour les plus petits diamètres, l'entraînement peut être réalisé par des moto-réducteurs.

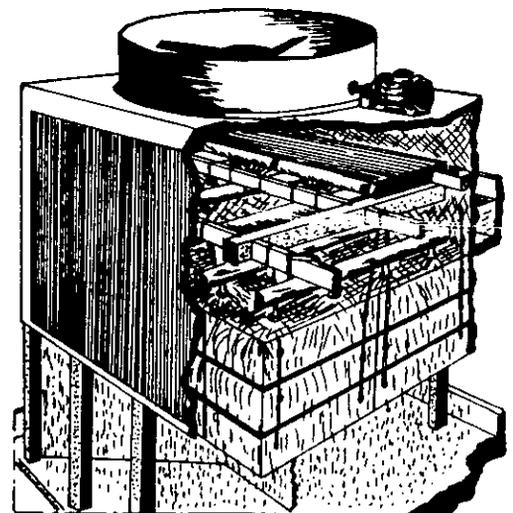


Figure 1.5 : Réfrigérant à contre-courant.

### 1.3.4 Réfrigérateurs monoblocs à enveloppe plastique : (fig.1.6)

Réfrigérateurs en matières plastique dont aucune pièce oxydable ne se trouve en contact direct avec l'eau.

Appareils légers pouvant être livrés démontés afin d'en faciliter l'installation sur terrasse par exemple.

On remarquera l'esthétique particulièrement soignée de ces appareils.

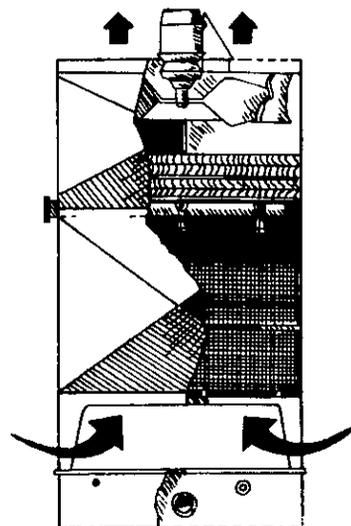


Figure 1.6 : Réfrigérateur monobloc à enveloppe plastique.

### 1.3.5 Réfrigérateurs monoblocs à enveloppe métallique : (fig.1.7)

Réfrigérateurs dont l'enveloppe est en tôle d'acier.

Ils peuvent être du type à contre-courant ou à courants croisés.

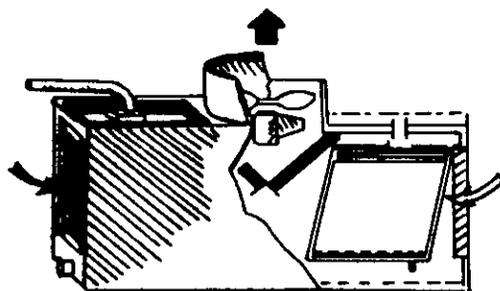


Figure 1.7 : Réfrigérateur monobloc à enveloppe métallique.

# CHAPITRE II

---

---

## **PRESENTATION DU PROJET**

---

---

*« Le commencement de toutes les sciences, c'est l'étonnement de ce que  
les choses sont ce qu'elles sont. »*

**ARISTOTE**

**CHAPITRE II**  
**PRESENTATION DU PROJET**

L'entreprise (COSIDER) m'a confié ce travail qui a pour but l'étude d'un réfrigérant à ventilation forcée ; le réfrigérant, ce grand ouvrage sera réalisé dans la tranche 1, zone DJAMAA et fait partie d'une dizaine de réfrigérants localisés dans les Dairates d'EL-MGHAIER et DJAMMAA, situées respectivement à 120 et 170 km de BISKRA-TOUGGOURT.

Ces ouvrages sont destinés au refroidissement d'eau prélevée à partir des forages Albiens et serviront pour l'irrigation des palmeraies, ceci dans le cadre du réaménagement et de l'extension de la vallée de OUED RIGH afin d'utiliser les eaux de forages implantés dont la température à la sortie est d'environ 50°C qui sera réduite grâce à ce système à 30°C de moins soit 20°C.

La région est classée suivant les RPA<sup>1</sup> comme zone de sismicité négligeable (Zone 0).

## **2.1 DESCRIPTION DE L'OUVRAGE**

Le réfrigérant d'eau est composé dans sa partie inférieure d'un bassin de récupération d'eau avec une conduite permettant la sortie d'eau vers les réseaux d'irrigation avec un débit de 120 L/s et dans sa partie supérieure d'une tour rectangulaire permettant la pulvérisation de l'eau lors de sa chute.

Le réfrigérant présente une forme géométrique prismatique régulière. Il est constitué de plusieurs éléments :

### **2.1.1 Radier :**

Dont le niveau est au bon sol au-dessous du terrain naturel.

- longueur : 15.55 m
- largeur : 9.70 m
- épaisseur : 0.60 m

### **2.1.2 Parois verticales :**

De hauteur 14.40 m et d'épaisseurs variables de 25 à 30 cm.

- Bassin :
  - longueur : 14.35 m
  - largeur : 8.50 m
  - hauteur : 4.80 m
  - épaisseur : 0.30 m

<sup>1</sup> Règles Parasismiques Algériennes

- Tour en élévation :

- longueur :	14.35 m
- largeur :	8.50 m
- hauteur :	9.60 m
- épaisseur :	0.25 m

### 2.1.3 Couverture :

Composée de deux dalles :

- avec ouverture de dimension 8×8 m logeant l'hélice, d'épaisseur 20 cm,
- sans ouverture de même épaisseur et de dimension 8×6 m servant à collecter l'eau provenant du forage et à la distribuer à travers de petits orifices.

### 2.1.4 Poteaux :

De section 53×30 cm.

### 2.1.5 Poutres :

De sections différentes et de portées 8.25 m.

### 2.1.6 Poutrelles :

Préfabriquées de même section 10×20 cm et de différentes portées sur lesquelles reposent des lattes en bois.

### 2.1.7 Escaliers :

Ils sont de deux types :

- escalier extérieur à 5 volées droites (non toutes identiques) permettant l'accès à la terrasse.
- escalier extérieur à 2 volées droites (identiques) permettant l'accès à l'intérieur du réfrigérant.

### 2.1.8 Equipements mécaniques et hydrodynamiques :

Nécessaire au bon fonctionnement du réfrigérant.

- L'hélice ; aspire l'air chaud contenu à l'intérieur du réfrigérant en le dégageant vers l'extérieur.
- La virole ; protège l'hélice et évite d'aspirer l'air suivant les autres directions.

- Un moteur ; dont la capacité est de 30 kW.
- Un réducteur ; sur lequel repose l'hélice.
- Panneaux séparateurs de gouttelettes, leur surface striée adaptée évite les pertes d'eaux évaporées qui sont récupérées après condensation et ruissellement.
- Lattes en bois ; traitées contre le gonflement, placées sur les poutrelles pour ralentir la chute d'eau.

Tous ces éléments sont nécessaires au bon fonctionnement hydraulique.

Le système de coffrage utilisé est un coffrage par éléments modulaires (combinaison de panneaux entres-eux, ...)

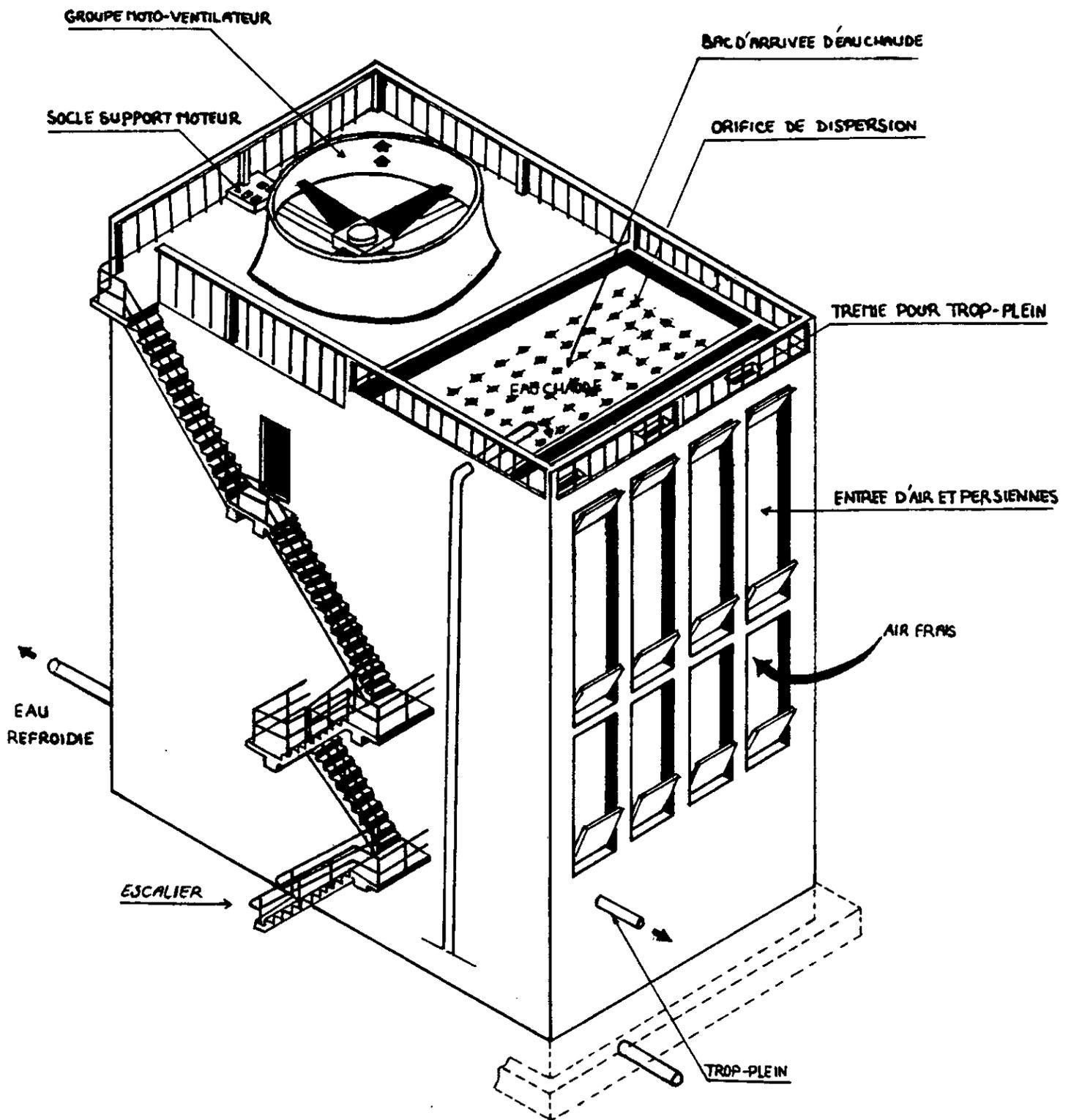


Figure 2.1 : Vue en perspective.

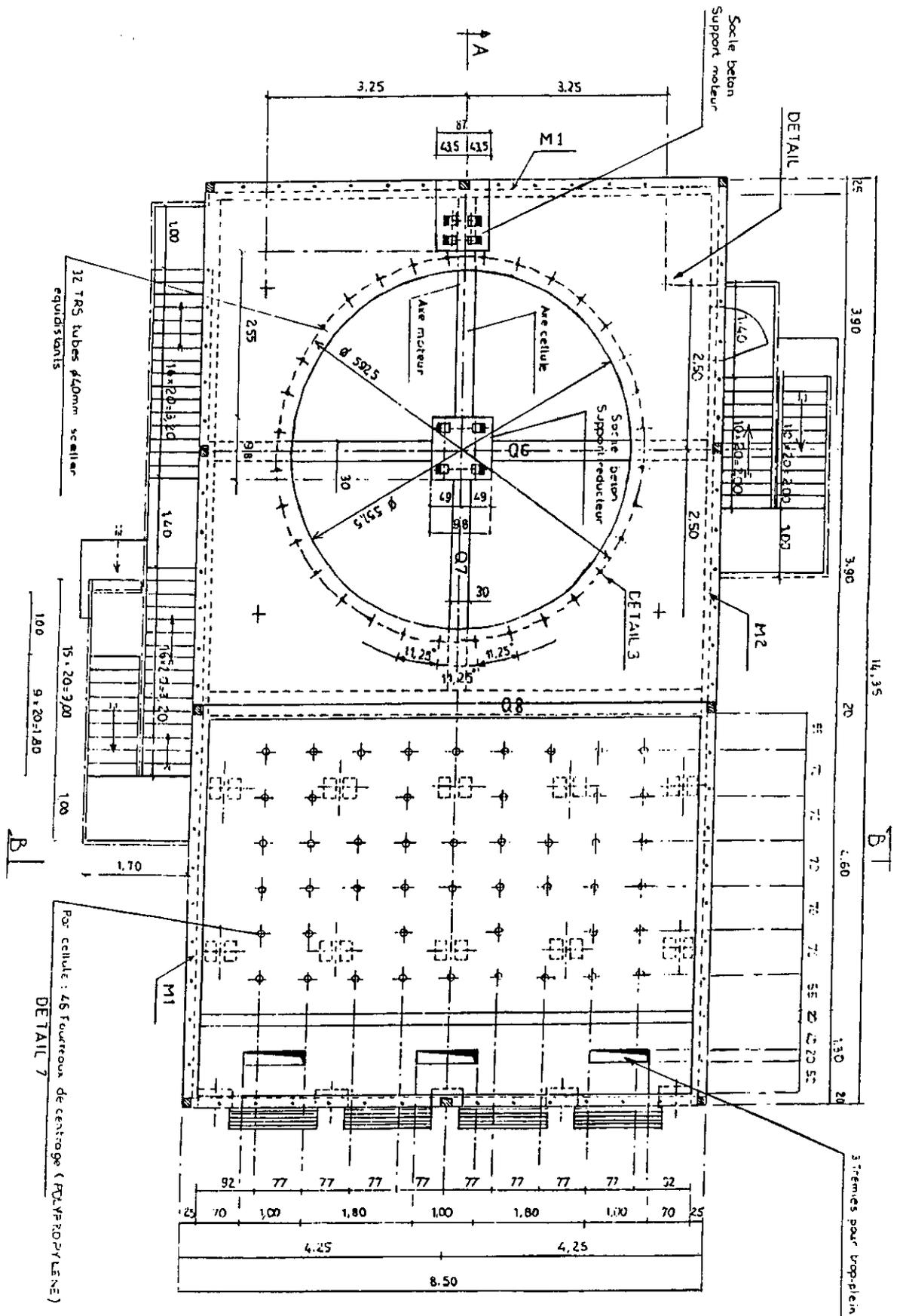


Figure 2.2 : Vue en plan.



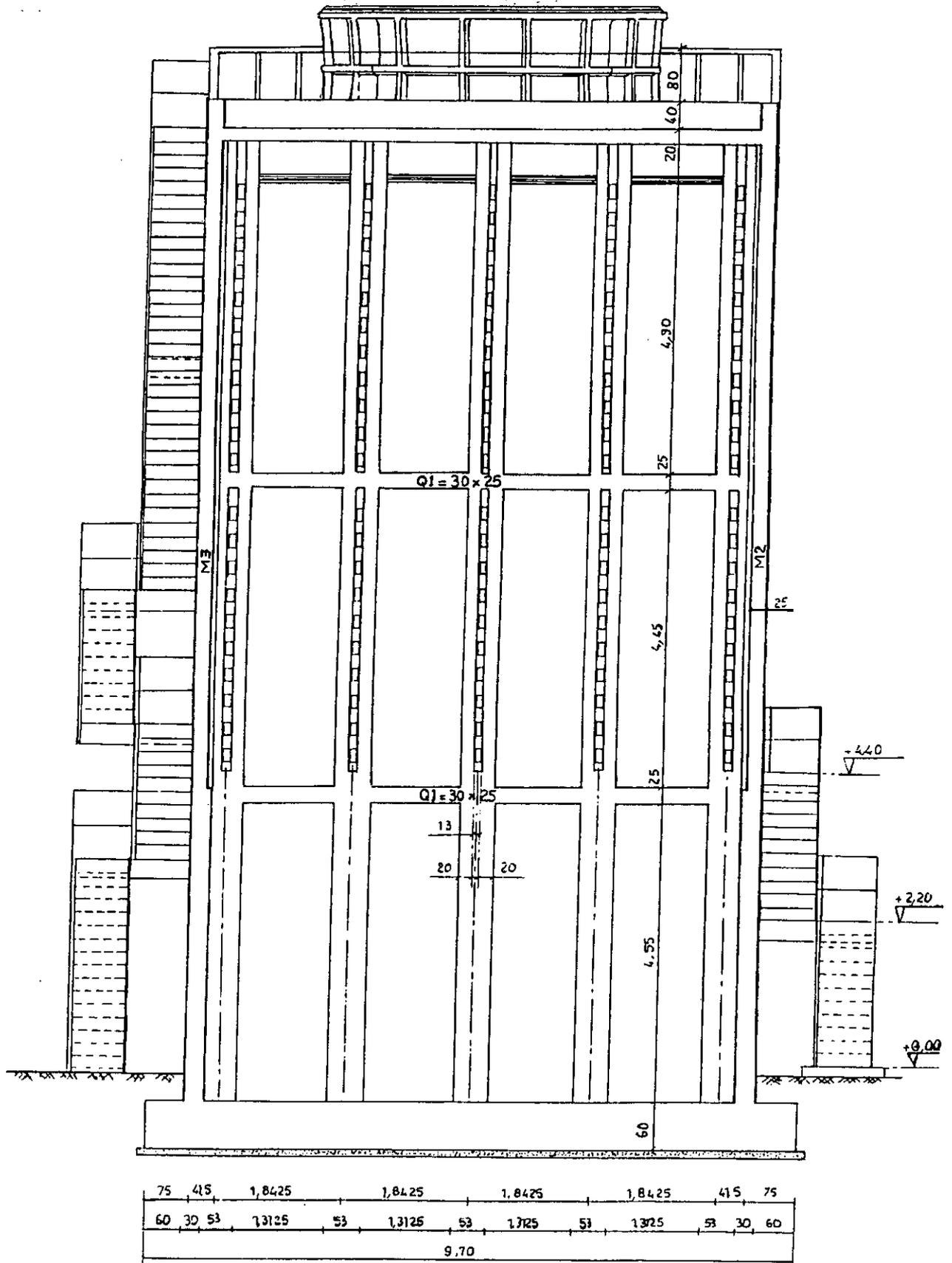


Figure 2.4 : Coupe B-B.

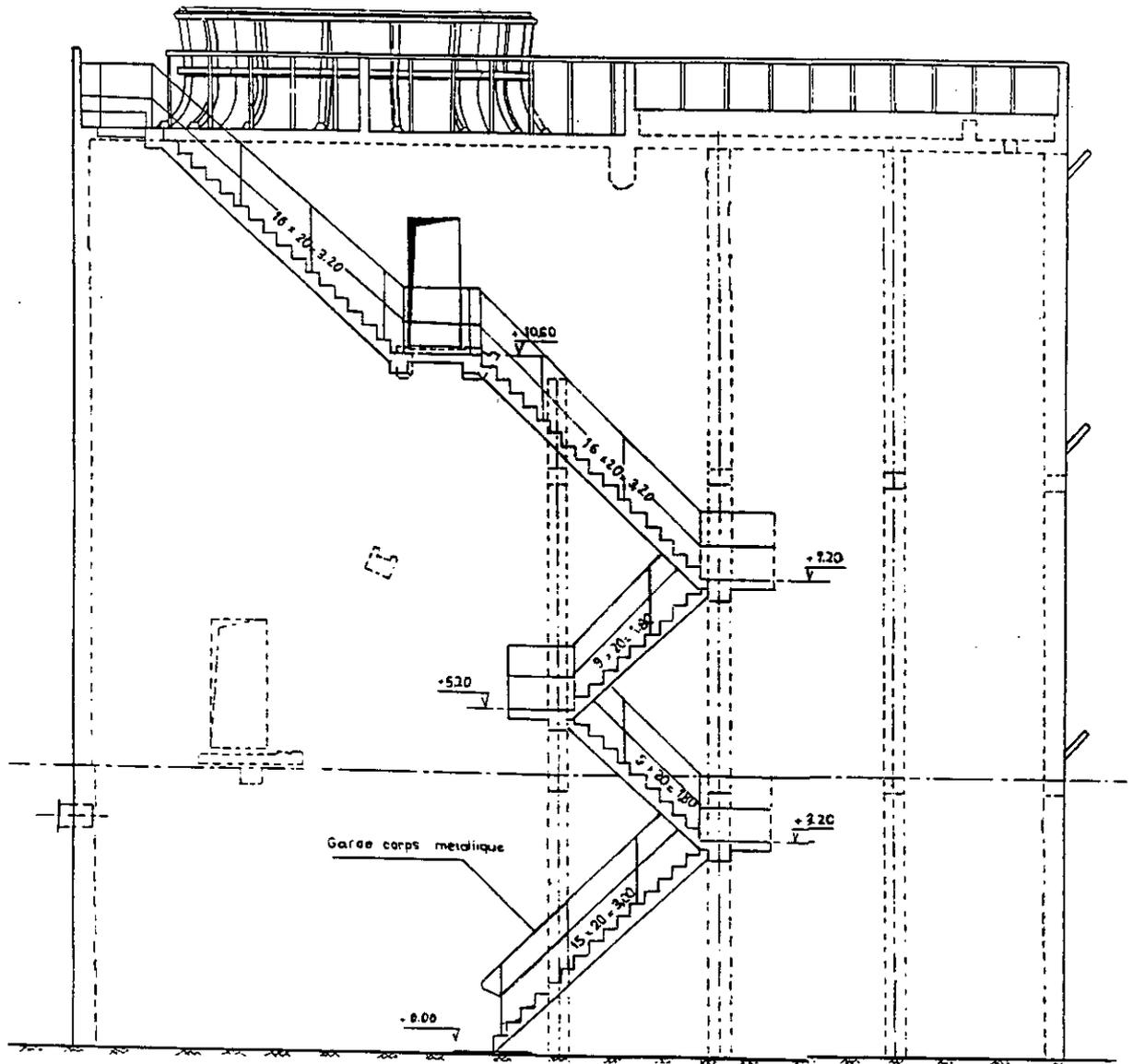


Figure 2.5 : Vue F-F.

# CHAPITRE III

---

---

## CARACTERISTIQUES MECANIQUES DES MATERIAUX

---

---

*« Le plus simple écoliers sait maintenant des vérités pour lesquelles  
Archimède eût sacrifié sa vie. »*

**EUGENE MANUEL**

## CHAPITRE III CARACTERISTIQUES MECANQUES DES MATERIAUX

### 3.1 BETON

Le béton armé utilisé sera calculé conformément aux règlements en vigueur applicables en Algérie RPA88 et BAEL83.

La composition du béton à employer est la suivante :

- 350 kg de ciment CRS<sup>1</sup>
- 420 litres de sable propre ( $d < 5\text{mm}$ )
- 400 litres de gravier 7/15
- 400 litres de gravier 15/25
- 200 litres d'eau de gâchage.

Cette composition a été obtenue après une étude granulométrie effectuée par les soins de l'entreprise.

#### 3.1.1 Résistance mécanique du béton : [8]

##### *a- Résistance à la compression*

Le béton est défini du point de vue mécanique par sa résistance à la compression à 28 jours d'âge, noté par «  $f_{c28}$  ».

Cette caractéristique est déterminée par essais sur éprouvettes cylindriques normalisées (16 cm de diamètre, 32 cm de hauteur).

Pour déterminer la résistance à la compression à un âge  $j < 28$  jours, on utilise la formule suivante :

$$f_{cj} = 0.685 \times f_{c28} \times \log(j+1)$$

si  $j \geq 28$  on admet ;

$$f_{cj} = 1.1 \times f_{c28}$$

Le béton utilisé présente une résistance moyenne de compression voisine de 20 Mpa ( $f_{c28} = 20 \text{ Mpa}$ ).

##### *b- Résistance à la traction*

La résistance caractéristique à la traction du béton à « j » jours désignée par «  $f_{tj}$  » est déterminée à partir de la relation suivante :

$$f_{tj} = 0.6 + 0.06 \times f_{cj} \quad , \quad f_{cj} \text{ et } f_{tj} \text{ exprimées en Mpa}$$

<sup>1</sup> ciment résistant aux sulfates

En particulier pour ( $j=28$  jours )

$$f_{ij} = 1.8 \text{ Mpa}$$

### 3.1.2 Contraintes limites :[1]

Une contrainte limite est une contrainte au-delà de laquelle une structure ou bien un de ses éléments cesse de remplir les fonctions pour lesquelles il était conçu.

Les règles BAEL donnent les contraintes suivant les états limites comme suit :

#### a- Contraintes à l'Etat Limite Ultime « ELU » :

L'Etat Limite Ultime correspond à l'équilibre entre les sollicitations d'actions majorées et les sollicitations résistantes calculées.

La contrainte du béton en compression est :

$$f_{bu} = 0.85 f_{c28} / \gamma_b$$

Le coefficient 0.85 est un coefficient réducteur défini pour les sections régulières et tient compte de la durée d'application du chargement sur la résistance à la compression. Il est valable si cette durée est inférieure à 24h.

Pour une durée de chargement supérieur à 24h,

$$f_{bu} = f_{c28} / \gamma_b$$

Avec  $\gamma_b$  : coefficient de sécurité donné par ;

$$\gamma_b = 1.15 \longrightarrow \text{action accidentelle,}$$

$$\gamma_b = 1.5 \longrightarrow \text{action courante.}$$

#### b- Contraintes à l'Etat Limite de Service « ELS » :

L'Etat Limite de Service correspond à l'équilibre entre les sollicitations d'actions réelles et les sollicitations résistantes calculées sans dépasser les contraintes limites.

En supposant que le matériau se déforme dans le domaine élastique, les vérifications porteront sur :

##### - L'état limite de compression du béton :

La contrainte de compression du béton à l'ELS ne doit pas dépasser la valeur limite fixée par :

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}_{bc} &= 0.6 f_{c28} \\ &= 12 \text{ Mpa} \quad \text{pour } j = 28 \text{ jours.} \end{aligned}$$

- *L'état limite d'ouverture des fissures :*

Lorsque le béton tendu se fissure, sa déformation étant la même que celle de l'acier pour un point donné ; les vérifications se font sur les contraintes dans l'acier, selon le degré de fissuration jugé acceptable. Les différents cas sont donnés dans le paragraphe 3.2.2.b.

**c- Contrainte Ultime de Cisaillement :**

La contrainte de cisaillement à l'ELU est définie par :

$$\tau_u = V_u / (b_0 \cdot d)$$

$V_u$  : valeur de l'effort tranchant.

La contrainte admissible de cisaillement est déduite par :

- $\bar{\tau}_u = \min \{ 0.13 f_{c28}; 4 \text{ Mpa} \} = 2.6 \text{ Mpa}$  pour une fissuration peu nuisible,
- $\bar{\tau}_u = \min \{ 0.10 f_{c28}; 3 \text{ Mpa} \} = 2 \text{ Mpa}$  pour une fissuration préjudiciable ou très préjudiciable.

**3.1.3 Diagramme contraintes-déformations :**

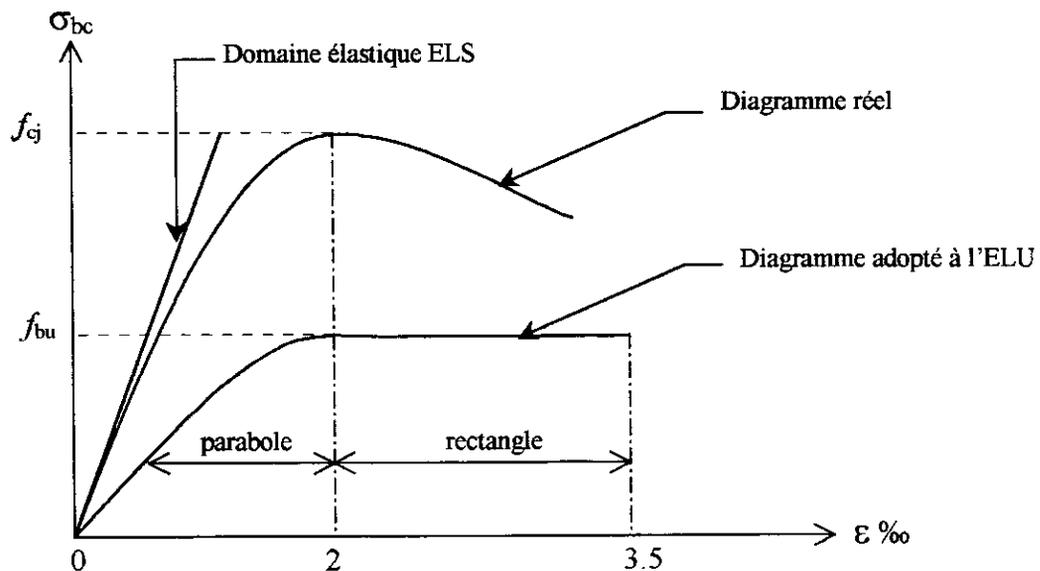


Figure 3.1 : Diagramme contraintes-déformations du béton.

Le diagramme en parabole-rectangle est utilisé pour le calcul à l'ELU tandis qu'à l'ELS, on suppose que l'on reste dans le domaine élastique.

### 3.1.4 Module de déformation longitudinale :

Pour un chargement d'une durée d'application inférieure à 24 heures, le module de déformation instantané  $E_{ij}$  du béton âgé de « j » jours est déterminé à partir de la formule suivante:

$$E_{ij} = 11000 [ f_{cj} ]^{1/3} \quad E_{ij} \text{ exprimé en Mpa.}$$

Pour des charges de longue durée d'application, le module de déformation différée du béton à « j » jours  $E_{vj}$  est pris égal à :

$$E_{vj} = 3700 [ f_{cj} ]^{1/3} \quad E_{vj} \text{ exprimé en Mpa.}$$

Pour une valeur de  $f_{c28} = 20$  Mpa

$$E_{ij} = 29858.594 \text{ Mpa}$$

$$E_{vj} = 10043.345 \text{ Mpa.}$$

### 3.1.5 Coefficient de Poisson « v » :

$$v = (\Delta a / a) / (\Delta l / l)$$

Avec :

$\Delta a / a$  : augmentation relative de la dimension transversale

$\Delta l / l$  : raccourcissement relatif longitudinal.

Les règles BAEL préconisent, pour le coefficient de Poisson, les valeurs suivantes :

$$v = 0 \quad \text{à} \quad \text{l'ELU}$$

$$v = 0.2 \quad \text{à} \quad \text{l'ELS}$$

## 3.2 LES ACIERS

Les aciers de construction en béton armé se différencient les uns des autres suivant leurs nuances, leurs états de surface ... ( Rond Lisse, Haute Adhérence,...) .

### 3.2.1 Types d'aciers utilisés :

#### *a- Acier Rond Lisse :*

- Acier naturel brut de laminage feE24 caractérisé par :
  - la limite élastique = 235 Mpa
  - la contrainte de rupture = 410 à 490 Mpa
  - allongement élastique  $\epsilon = 1.175 \text{ ‰}$

**b- Acier à Haute Adhérence « HA » :**

Ce sont des aciers de type 1 de nuance feE40 caractérisés par :

- la limite élastique  $f_e = 400$  Mpa
- la contrainte de rupture = 480 Mpa
- allongement élastique  $\epsilon = 2$  ‰

L'état de surface de ces aciers comporte des aspérités qui favorisent et augmentent l'adhérence.

**c- Module d'élasticité de l'acier « Es » :**

Le module d'élasticité longitudinal Es est pris égal à  $2 \times 10^5$  Mpa.

**3.2.2 Contraintes limites :**

**a- Contrainte à l'Etat Limite Ultime :**

On adopte un diagramme contraintes-déformations de calcul déduit du diagramme représenté ci-dessous par une affinité parallèle à la tangente à l'origine dans le rapport  $(1/\gamma_s)$ .

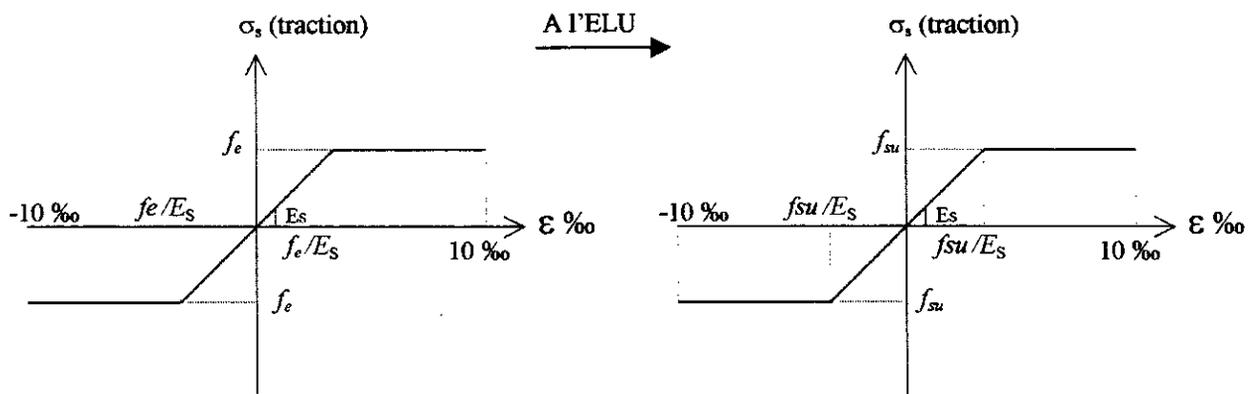


Figure 3.2 : Diagramme contraintes-déformations des Aciers à l'ELU.

$$f_{sw} = f_e / \gamma_s$$

Avec :

$$\gamma_s : \text{coefficient de sécurité} \begin{cases} = 1 & \text{situation accidentelle} \\ = 1.15 & \text{situation normale} \end{cases}$$

$$E_s = 2.10^5 \text{ Mpa}$$

**b- Contrainte à l'Etat Limite de Service :**

- Fissuration préjudiciable :

$$\bar{\sigma}_s = \min \{ (2/3) f_e ; 150 \eta \}$$

- Fissuration très préjudiciable :

$$\bar{\sigma}_s = \min \{ 0.5 f_e ; 110 \eta \}$$

avec :

$$\eta = \begin{cases} 1 & \text{Ronds Lisses et Treillis Soudés} \\ 1.6 & \text{acier Haute Adhérences} \end{cases}$$

$\eta$  : coefficient de fissuration.

La fissuration des différents éléments du réfrigérant étant très préjudiciable ; pour cela les contraintes admissibles seront :

$$\bar{\sigma}_s = 110 \text{ Mpa} \quad \text{pour } \eta = 1 \quad f_e = 240 \text{ Mpa}$$

$$\bar{\sigma}_s = 176 \text{ Mpa} \quad \text{pour } \eta = 1.6 \quad f_e = 400 \text{ Mpa}$$

**3.3 HYPOTHESES DE CALCUL [1]**

**3.3.1 A l'Etat Limite Ultime :**

- Hypothèse de Bernoulli ; conservation des sections planes (diagramme de déformations linéaire ),
- Béton tendu négligé,
- Pas de glissement relatif entre le béton et l'acier,
- Limitations des déformations relatives :

- Raccourcissement ultime du béton

$$\epsilon_{bu} = 3.5 \times 10^{-3} \text{ en flexion}$$

$$\epsilon_{bu} = 2 \times 10^{-3} \text{ en compression simple.}$$

- Allongement ultime des armatures

$$\epsilon_s = 10 \times 10^{-3}$$

- Les diagrammes linéaires de déformations passent obligatoirement par l'un des 3 pivots A,B ou C.

Règle des 3 pivots

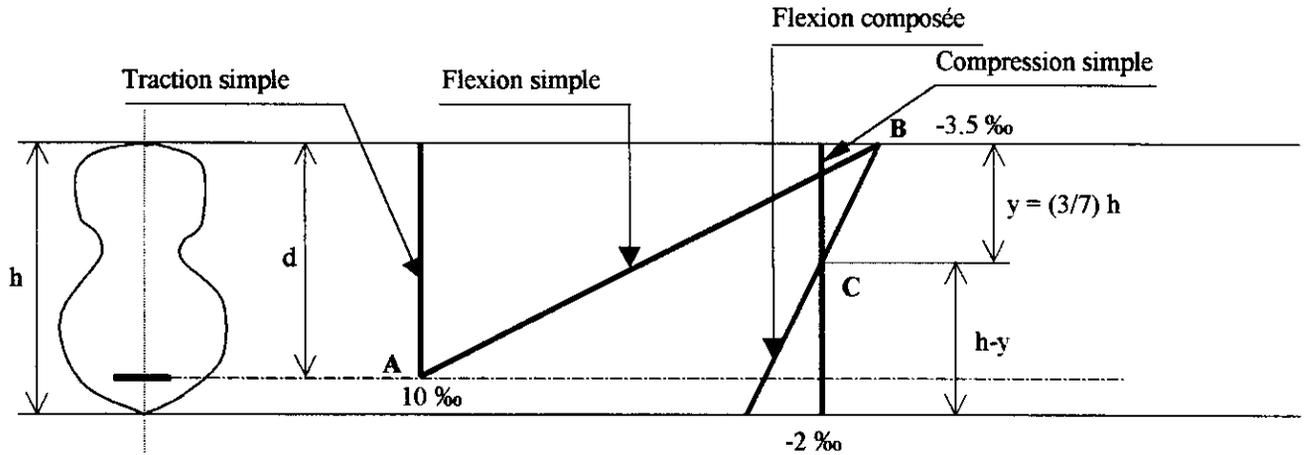
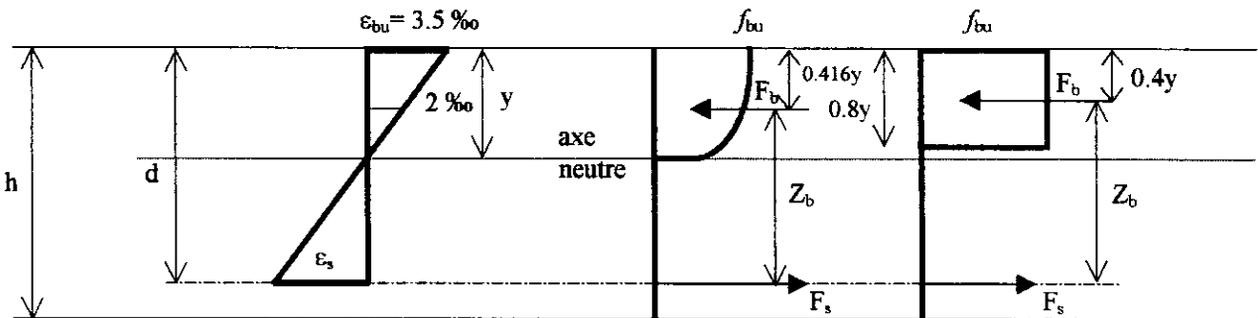


Diagramme contraintes-déformations



diag. parabole rectangle      diag. rectangulaire simplifié

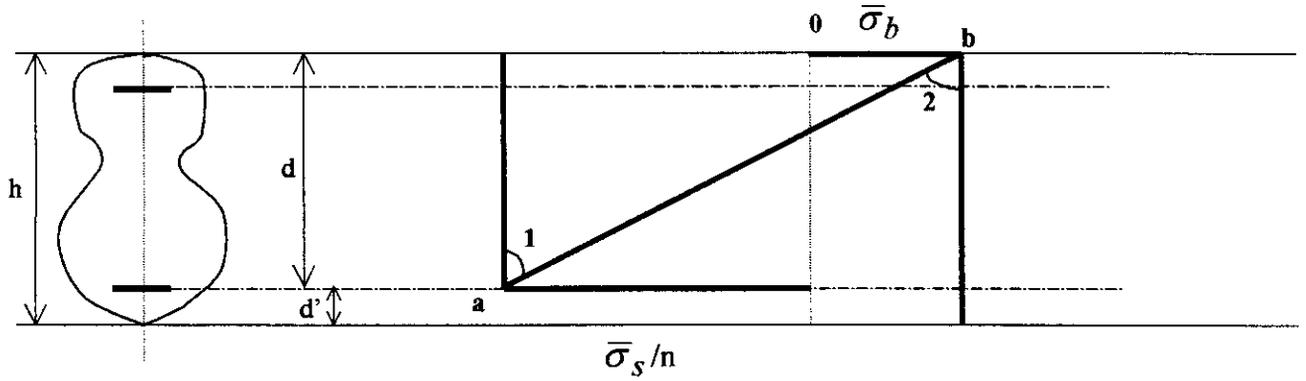
Déformations

Contraintes

3.3.2 A l'Etat Limite de Service :

- Conservation des sections planes,
- Validité de la loi de Hooke ; proportionnalité des contraintes (de compression du béton et de traction de l'acier) à leurs déformations,
- Béton tendu négligé,
- Pas de glissement relatif entre l'acier et le béton,
- $n = E_s / E_b =$  coefficient d'équivalence acier-béton = 15,
- Non prise en compte du retrait et du fluage.

Règle des deux pivots



- pivot a (région 1)

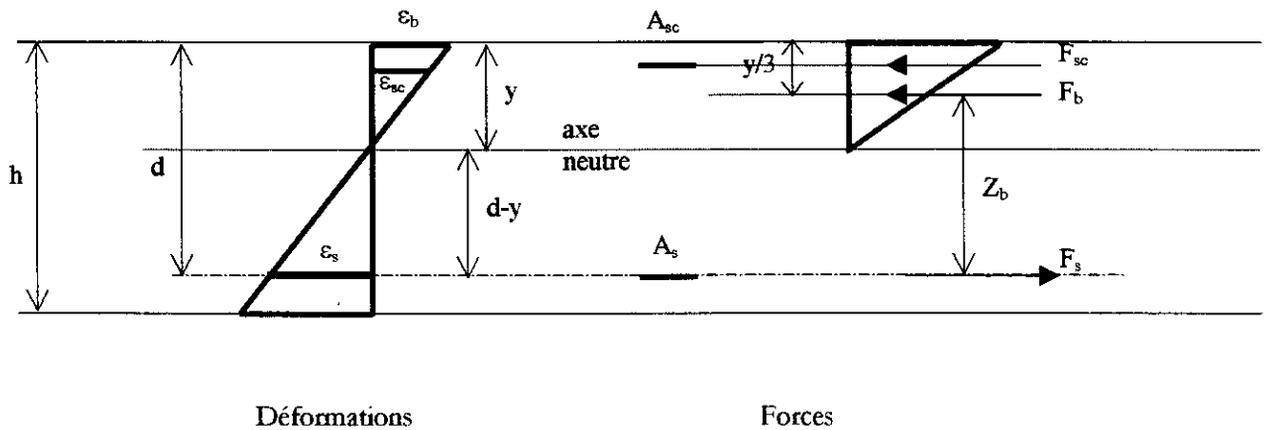
$\sigma_s = \bar{\sigma}_s$

flexion simple  
ou  
flexion composée
- pivot b (région 2)

$\sigma_b = \bar{\sigma}_b$

flexion simple  
ou  
flexion composée

Diagramme contraintes-déformations



Déformations

Forces

# CHAPITRE IV

---

---

## ***PRESENTATION DU LOGICIEL SAP90***

---

---

*«Est précise la mesure approchée qui diffère peu de la mesure exacte.»*

**LALANDE**

---

**CHAPITRE IV**  
**PRESENTATION DU LOGICIEL SAP90**

---

**4.1 INTRODUCTION**

Le programme SAP (Structurale Analysis Program), lancé, il y a plus de 27 ans, a acquis la réputation du logiciel le plus utilisé dans le domaine de l'analyse des structures par éléments finis.

Opérationnel sur un ordinateur personnel, le SAP90 offre les performances de la technologie d'aujourd'hui ; capacité de calcul, vitesse d'exécution, précision, analyses statique et dynamique. Le SAP90 est une formule complète, il permet, outre la préparation et l'exécution, l'interprétation graphique des résultats de l'analyse.

Plus récemment la famille SAP a mis à jour d'autres versions, citons : le Super SAP et le SAP2000.[6]

**4.2 MODELISATION [5]**

La modélisation géométrique et mécanique d'une structure est basée sur deux pièces maîtresses, à savoir : les nœuds et les éléments. La dimension géométrique d'une structure est établie en plaçant des points (nœuds), identifiés par leurs numéros, dans un repère spatial à l'aide de coordonnées tridimensionnelles. La géométrie de la structure sera complétée en connectant ces nœuds entre eux par des éléments spécifiques tels que : poutres, plaques et coques etc. Chaque élément à un seul numéro d'identification.

Le repère global ayant un système de coordonnées cartésien (X,Y,Z) est utilisé pour spécifier la position des nœuds, leurs conditions aux appuis, au chargement et au déplacement. Un repère local cartésien (1,2,3) au sein de l'élément type peut être utilisé.

Généralement, les nœuds d'une structure spatiale possèdent six degrés de liberté : trois en translation (DX,DY,DZ) et trois en rotation (RX,RY,RZ), ils peuvent être libres ou rigidifiés (bloqués) selon les conditions aux limites.

L'utilisateur du SAP90 n'est pas conditionné à introduire ses données en unités spécifiques, mais il peut choisir des unités cohérentes, les résultats seront obtenus dans les unités choisies.

L'aspect modélisation comporte deux volets : l'emplacement des nœuds avec leurs conditions de fixation et l'implantation des éléments entre ces nœuds.

Six options de générations peuvent être utilisées pour positionner les nœuds, qui sont de type LINEAR (linéaire), QUADRILATERAL (quadrilatérale), FRONTAL (frontale), LAGRANGIAN (Lagrangienne), et CYLINDRICAL (cylindrique).

Les nœuds peuvent être chargés, libres, appuyés sur des supports rigides ou flexibles et ils peuvent être conditionnés entre eux par une liaison rigide selon une direction donnée.

Le SAP90 utilise une librairie de quatre types d'éléments finis de base, à savoir ;

- *Élément de poutre (FRAME)* : Cet élément est destiné à la modélisation des structures en portiques ou en treillis, planes ou spatiales. En plus de son poids propre, il peut être aussi sollicité par des charges concentrées, uniformément réparties ou trapézoïdales.
- *Élément de coque (SHELL)* : Destiné à la modélisation des structures spatiales en plaques et coques, il peut être pris aussi comme modèle pour les systèmes d'éléments de plaques fléchies et de membranes. Il peut être sollicité par un chargement de pression normale à son plan en plus de son poids.
- *Élément de solide axisymétrique (ASOLID)* : Cet élément sert à la modélisation des structures spatiales travaillant soit en contraintes planes soit en déformations planes en plus des structures axisymétriques. Le chargement sous forme gravitationnelle de pression ou de température peut être appliqué ainsi que le chargement radial.
- *Élément de solide (SOLID)* : Cet élément de brique à huit nœuds peut être pris comme modèle de calcul pour les structures spatiales en volume sous chargement de pression ou de température.

Il est à noter que pour chaque type d'élément à utiliser, il y a une option de génération spécifique à leur implantation.

#### **4.3 PREPARATION** [6]

Il est nécessaire de préparer les données spécifiques de la structure à analyser. Ces données doivent se conformer aux spécifications du programme. Elles sont stockées dans un fichier qui doit porter un nom sans extension.

Le fichier de données peut être préparé par un éditeur de texte ou par l'interface graphique SAPIN.

#### **4.4 FONCTIONNEMENT** [5]

Le programme SAP90 est un ensemble de programmes (modules) qui sont exécutés dans un ordre déterminé.

Le module SAP90 est toujours exécuté le premier, à sa requête, on doit lui spécifier le nom du fichier de données de la structure à traiter. Une exécution sans erreurs de ce module, va créer le fichier GO.bat, ce dernier comporte une série de

modules qui sont activés pour le traitement de la structure particulière et suivant les types d'analyse désirés.

L'étape suivante est de lancer GO pour exécuter cette série de commandes, après nous obtenons les fichiers résultats suivants :

- .SAP** : image ordonnée du fichier de données
- .EIG** : fréquences et paramètres modaux (vecteurs propres)
- .RIT** : fréquences et paramètres modaux (vecteurs de Ritz)
- .SPC** : facteurs modaux d'analyse spectrale
- .SOL** : déplacements et réactions aux nœuds (statique et dynamique)
- .F3F** : forces sur un élément FRAME (statique et dynamique)
- .F4F** : forces sur un élément SHELL (statique et dynamique)
- .F5F** : forces sur un élément ASOLID (statique et dynamique)
- .F8F** : forces sur un élément SOLID (statique et dynamique)
- .FEF** : forces sur les nœuds d'un élément (statique et dynamique)
- .ERR** : erreurs et avertissements.

Le programme SAP90 comporte deux interfaces graphiques qui peuvent être utilisés pour la représentation et l'interprétation des résultats de l'analyse. Ces représentations graphiques peuvent être imprimées.

SAPLOT : dessine les formes indéformées et déformées de la structure ainsi que les diagrammes des forces et des contraintes.

SAPTIME : représente les fonctions de temps des variables d'entrées et des réponses de la structure.

## **4.5 ANALYSE** [6]

### **4.5.1 Analyse statique :**

L'analyse statique implique la résolution d'un système d'équations linéaires de types :

$$[K].[U] = \{R\}$$

où :

- [K] : représente la matrice de rigidité,
- [U] : vecteur de déplacement,
- {R} : vecteur de chargement.

La structure peut être analysée pour plusieurs cas de charges au cours d'un seul passage.

### 4.5.2 Analyse Dynamique :

L'analyse dynamique peut être effectuée en même temps que l'analyse statique.

Une étude dynamique peut être menée selon les méthodes suivantes :

#### a- Analyse dynamique directe :

Un type classique est le chargement de la structure par des forces harmoniques sous la forme :

$$\{R\} = \{F\} \cdot \sin(\omega t)$$

où :

$\omega$  est la pulsation de l'excitation.

L'équation d'équilibre pour ce type de structure a la forme suivante :

$$[K] \cdot \{u\} + [M] \cdot \{\ddot{u}\} = \{R\}$$

où :

$[M]$  : matrice des masses,

$\{\ddot{u}\}$  : accélération de la structure.

#### b- Analyse d'un problème aux valeurs propres :

La résolution d'un système libre non amorti revient à déterminer les valeurs et les formes propres de l'équation :

$$[K] \cdot \{\phi\} = [M] \cdot \{\phi\} \cdot [\Omega^2]$$

où :

$[\Omega^2]$  : matrice diagonale formée de valeurs propres,

$\{\phi\}$  : matrice dont les colonnes représentent des vecteurs propres.

#### c- Analyse avec les vecteurs de Ritz :

Une récente recherche a démontré que les modes propres de vibration ne donnent pas une meilleure base pour l'analyse dynamique des structures soumises à un chargement dynamique. La raison pour laquelle les vecteurs de Ritz produisent d'excellents résultats est qu'ils sont générés en prenant en considération la distribution spatiale du chargement dynamique.

**c- Analyse spectrale :**

L'équation d'équilibre dynamique d'une structure soumise à une excitation sismique est la suivante :

$$[K] \cdot \{u\} + [C] \cdot \{\dot{u}\} + [M] \cdot \{\ddot{u}\} = [M] \cdot \{\ddot{u}_s\}$$

avec :

[C] : matrice d'amortissement,

$\{\ddot{u}_s\}$  : accélération du sol,

$\{u\}, \{\dot{u}\}, \{\ddot{u}\}$  : déplacement, vitesse et accélération de la structure.

**d- Analyse dynamique dans le domaine temporel :**

Dans le cas général, le chargement appliqué sur une structure donnée est une fonction arbitraire de l'espace et du temps F(s,t).

$$F(s,t) = \sum G(s)_i \times f(t)_i$$

Pour le SAP90, le vecteur spatial peut être défini comme le vecteur de chargement G(s) et la fonction f(t) peut être définie comme une fonction du temps arbitraire ou périodique.

# CHAPITRE V

---

---

## ***CALCUL DES DALLES***

---

---

*« Rien n'est bon ni mauvais en soi, tout dépend de ce que l'on en pense. »*  
**SHAKESPEARE**

## CHAPITRE V CALCUL DES DALLES

### 5.1 METHODES DE CALCUL [1]

Plusieurs méthodes sont proposées pour le calcul des dalles, parmi lesquelles on cite :

#### 5.1.1 Méthode de R.BARES :

Basée sur la résolution de l'équation du 4<sup>ème</sup> degré dite de « Lagrange » qui elle-même est déduite de la méthode des bandes élastiques des éléments finis.

Les dalles sont supposées simplement appuyées sur leurs cotés tout en tenant compte de l'effet de continuité.

En fonction du rapport des dimensions en plan ( $\gamma$ ) et du coefficient de Poisson ( $\nu$ ) du matériau, les tables de « BARES » nous permettent de déterminer les coefficients  $\mu_{xs}$ ,  $\mu_{ys}$ ,  $\mu_{sa}$ . Le calcul se fait en fissuration peu nuisible à l'Etat Limite Ultime.

#### 5.1.2 Méthode de Pigeaud (abaques de Pigeaud) :

Des abaques traitent la résolution des plaques rectangulaires simplement appuyées sur quatre cotés.

$$\rho = l_x / l_y \qquad \rho' = 1/\rho$$

tel que :  $l_x$  : petite portée  
 $l_y$  : grande portée

- **Cas des plaques chargées uniformément :**

Les moments pour une largeur de 1m au centre de la plaque sont donnés par :

- suivant la petite portée :  $M_x = (M_1 + \nu M_2) q l_x l_y$
- suivant la grande portée :  $M_y = (M_2 + \nu M_1) q l_x l_y$

$M_1$  : donnée par l'abaque en fonction de  $\rho$

$M_2$  : donnée par l'abaque en fonction de  $\rho'$

$\nu$  : coefficient de Poisson.

### 5.1.3 Calcul d'après les règlements BAEL (annexe F3) :

- *cas des panneaux rectangulaires avec  $\rho = l_x / l_y \leq 0.4$  :*

Dans ce cas on ne tient compte que de la flexion selon la petite portée, on calcule ainsi la dalle comme reposant sur deux appuis (les grands cotés  $l_y$ ).

- *cas des panneaux rectangulaires avec  $\rho > 0.4$  :*

Proposée par l'annexe 3 des BAEL déduite de la méthodes de Pigeaud. Elle traite uniquement les panneaux rectangulaires uniformément chargés et simplement articulés sur leur pourtour.

Les moments au centre de la plaque selon l'annexe « F3 » sont :

$$\begin{aligned} M_x &= \mu_x q l_x^2 \longrightarrow \text{dans le sens de la petite portée } l_x \\ M_y &= \mu_y q l_y^2 \longrightarrow \text{dans le sens de la grande portée } l_y \end{aligned}$$

$\mu_x$  et  $\mu_y$  sont donnés dans un tableau en fonction de  $\rho$ .

### 5.1.4 Calcul automatique : [6]

Basé sur la méthode des éléments finis en utilisant le Logiciel SAP90, la modélisation de la dalle s'effectue à l'aide de l'élément fini de base « SHELL » défini dans le chapitre précédent.

Les données nécessaires à cet élément doivent suivre la syntaxe suivante afin d'établir un fichier de données exact :

$$NM = \langle nmat \rangle \quad X = \langle x_1, \dots, x_{nl} \rangle \quad Y = \langle y_1, \dots, y_{nl} \rangle \quad Z = \langle z_1, \dots, z_{nl} \rangle$$

$$\langle nm \rangle \quad E = \langle e \rangle \quad U = \langle u \rangle \quad W = \langle w \rangle \quad M = \langle m \rangle$$

$$\langle nel \rangle \quad JQ = \langle n_i, n_j, n_k, n_l \rangle \quad M = \langle mat \rangle \quad TH = \langle th \rangle \quad Lp = \langle g_1, g_2 \rangle$$

avec :

Informations de contrôle ;

$nmat$  : nombre de types de matériaux

$x_1, \dots$  : coefficient multiplicateur gravitationnel selon X

$y_1, \dots$  : coefficient multiplicateur gravitationnel selon Y

$z_1, \dots$  : coefficient multiplicateur gravitationnel selon Z

Définitions des propriétés des matériaux ;

- nm : numéro d'identification du matériau
- e : module d'élasticité longitudinale
- u : coefficient de Poisson
- w : poids par unité de volume
- m : masse par unité de volume

Emplacement des éléments ;

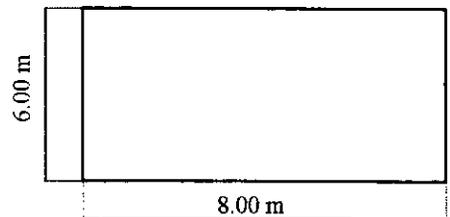
- nel : numéro identifiant l'élément
- $n_i, n_j, n_k, n_l$  : numéro des nœuds de l'élément spécifié  
si  $n_l$  est omis, on obtient un élément triangulaire
- mat : numéro du type du matériau
- th : épaisseur de l'élément
- n : chiffre indiquant la direction des axes locaux
- $g_1, g_2$  : paramètres de génération.  $g_1$  est le nombre d'élément à générer suivant i-j et  $g_2$  le nombre d'éléments à générer suivant i-k (y compris l'élément actuel).

**5.2 DALLE (I)**

Cette dalle sert à collecter l'eau provenant du forage et à la distribuer à travers de petits orifices.

$l_x = 6 \text{ m}$        $l_y = 8 \text{ m}$

- masse volumique du béton :  $w = 25 \text{ kN/m}^3$
- masse volumique de l'eau :  $w = 10 \text{ kN/m}^3$
- épaisseur de la dalle :  $e = 20 \text{ cm}$
- hauteur maximale atteinte par l'eau :  $h = 40 \text{ cm}$



Le chargement sera donc :

Figure 5.1 : Dalle I.

Charge permanente ;

Poids propre du béton       $G_1 = 25 \times 0.2 = 5 \text{ kN/m}^2$

Poids de l'eau       $G_2 = 10 \times 0.4 = 4 \text{ kN/m}^2$

Combinaison à l'ELU :

$1.35 (G_1 + G_2) = 12.15 \text{ kN/m}^2$

Combinaison à l'ELS :

$(G_1 + G_2) = 9 \text{ kN/m}^2$

Les moments max donnés par le SAP90 au niveau des travées et des appuis sont résumés dans le tableau ci-dessous.

	Elément	Nœud	Etat Limite Ultime (ELU)		Etat Limite de Service (ELS)	
			$M_x$ [kN.m]	$M_y$ [kN.m]	$M_x$ [kN.m]	$M_y$ [kN.m]
<b>Travée</b>	28-29-36-37	41	22.805	17.450	32.307	24.65
<b>Appui</b>	4 - 5	5	-10.904	-5.895	-15.447	-8.351

**Tableau 5.1 :** Moments max. en travées et appuis (Dalle I).

On étudie une bande de largeur 1m située au milieu de la plaque, dans les deux directions x et y.

**5.2.1 Calcul à l'ELU :**

$b = 1\text{ m}$        $h = 20\text{ cm}$        $d = 17\text{ cm}$        $d' = 3\text{ cm}$

\* En travée :

- *suivant x*

$M_u = 32.307\text{ kN.m}$

$f_{bu} = 11.33\text{ Mpa}$                        $f_{su} = 348\text{ Mpa}$

$$\mu_{bu} = \frac{M_u}{b \cdot d^2 \cdot f_{bu}} = 0.099 < \mu_{lu} = 0.3$$

$\alpha = 0.13 < \alpha_{AB} = 0.259 \Rightarrow$  pivot A

$Z_b = 16.12\text{ cm}$

$$A_{su} = \frac{M_u}{Z_b \cdot f_{su}} = 5.76\text{ cm}^2/\text{ml}$$

- *suivant y*

$M_u = 24.65\text{ kN.m}$

$$\mu_{bu} = 0.075 < \mu_{lu}$$

$$\alpha = 0.13 < \alpha_{AB} \Rightarrow \text{pivot A}$$

$$Z_b = 16.33 \text{ cm}$$

$$A_{su} = 4.34 \text{ cm}^2/\text{ml}$$

\* En appui : on prend  $M_{xu} = M_{yu} = 15.45 \text{ kN.m}$

$$\mu_{bu} = 0.047 < \mu_{lu}$$

$$\alpha = 0.060 < \alpha_{AB} \Rightarrow \text{pivot A}$$

$$Z_b = 16.59 \text{ cm}$$

$$A_{su} = 2.68 \text{ cm}^2/\text{ml}$$

### 5.2.2 Calcul à PELS :

$$b = 1\text{m} \quad d = 17 \text{ cm} \quad d' = 3 \text{ cm} \quad \bar{\sigma}_s = 176 \text{ Mpa} \quad \bar{\sigma}_b = 12 \text{ Mpa}$$

$n = 15$  (coefficient d'équivalence).

\* En travée :

- *suivant x*

$$M_{ser} = 22.805 \text{ kN.m}$$

$$M_{lser} = M_{lu} / \gamma = 70.165 \text{ kN.m} \quad \text{tq : } \gamma = M_u / M_{ser} = 1.4$$

$$\mu_{ser} = 0.066 < \mu_{ab} = 0.203 \Rightarrow \text{pivot a}$$

$$\alpha = 0.3199 \Rightarrow Z_b = 15.19 \text{ cm}$$

$$A_{ser} = \frac{M_{ser}}{Z_b \cdot \sigma_s} = 8.53 \text{ cm}^2/\text{ml}$$

- *suivant y*

$$M_{ser} = 17.45 \text{ kN.m}$$

$$M_{lser} = 70.165 \text{ kN.m}$$

$$\mu_{ser} = 0.05 < \mu_{ab} \Rightarrow \text{pivot a}$$

$$\alpha = 0.285 \Rightarrow Z_b = 15.38 \text{ cm}$$

$$A_{ser} = 6.44 \text{ cm}^2/\text{ml}$$

\* En appui :

$$M_{ser} = 10.904 \text{ kN.m}$$

$$\mu_{ser} = 0.03 < \mu_{ab} \Rightarrow \text{pivot a}$$

$$\alpha = 0.231 \Rightarrow Z_b = 15.38 \text{ cm}$$

$$A_{ser} = 3.95 \text{ cm}^2/\text{ml}$$

- **Choix du ferrailage**

$$A_s = \max(A_{ser}, A_u) = A_{ser} \quad (\text{ce qui était attendu})$$

$$A_x = 8.53 \text{ cm}^2/\text{ml} \longrightarrow 6\text{HA}14 / \text{ml} \quad \text{st} = 16 \text{ cm}$$

$$A_y = 6.44 \text{ cm}^2/\text{ml} \longrightarrow 5\text{HA}14 / \text{ml} \quad \text{st} = 20 \text{ cm}$$

$$A_{appui} = 3.95 \text{ cm}^2/\text{ml} \longrightarrow 4\text{HA}12 / \text{ml} \quad \text{st} = 25 \text{ cm}$$

### 5.2.3 Vérification du ferrailage minimum :

Vérifions la condition de non-fragilité [ BAEL.art A.8.2.4 ]

- *suivant x*

On doit avoir :

$$\frac{A_x}{b \times h} \geq \left( \frac{3 - \rho}{2} \right) \rho_0$$

Sachant que dans notre cas ;

$$\rho = l_x / l_y = 0.75 \quad b = 1\text{ m} \quad h = 20\text{ cm} \quad \rho_0 = 0.0008 \quad (\rho_{0\min} = 0.23 f_{tj} / f_c)$$

$$\text{A.N : } A_x \geq A_{\min} = 100 \times 20 \times (3 - 0.75) / 2 \times 0.0008 = 1.8\text{ cm}^2 \longrightarrow \text{vérifiée}$$

- **suivant y**

On doit avoir :

$$\frac{A_y}{b \times h} \geq \rho_0$$

$$\text{A.N : } A_y \geq A_{\min} = 100 \times 20 \times 0.0008 = 1.6\text{ cm}^2 \longrightarrow \text{vérifiée.}$$

### 5.2.4 Vérification de la flèche :

D'après l'expression de la flèche max donnée par les BAEL.83 :

$$f_{\max} = \frac{5ql_x^4}{384EI} \leq f_{adm} = \frac{l_x}{500}$$

$$q = G_1 + G_2 = 9.10^{-4}\text{ kN/cm}^2 \quad l_x = 600\text{ cm} \quad E = 1004.33\text{ kN/cm}^2$$

$$I = b \cdot e^3 / 12 = 100 \times 20^3 / 12 = 66666.67\text{ cm}^4$$

$$\text{A.N : } f_{\max} = 0.1176\text{ cm} < l_x / 500 = 1.13\text{ cm.}$$

### 5.2.5 Vérification au cisaillement :

Aucune armature d'effort tranchant n'est requise car les conditions données par les BAEL.83 sont vérifiées :

- si  $b \geq 3h \Rightarrow 100\text{ cm} > 3 \times 20 = 60\text{ cm}$
- la dalle est bétonnée sans reprise dans toute son épaisseur
- l'effort tranchant par mètre de la dalle vérifie la condition suivante :

$$V_u \leq 0.05 f_{c28} d$$

$$V_u / d = 38.25 / (0.9 \times 0.2) = 0.212\text{ Mpa} < 0.05 f_{c28} = 1\text{ Mpa}$$

### 5.2.6 Schéma de ferrailage :

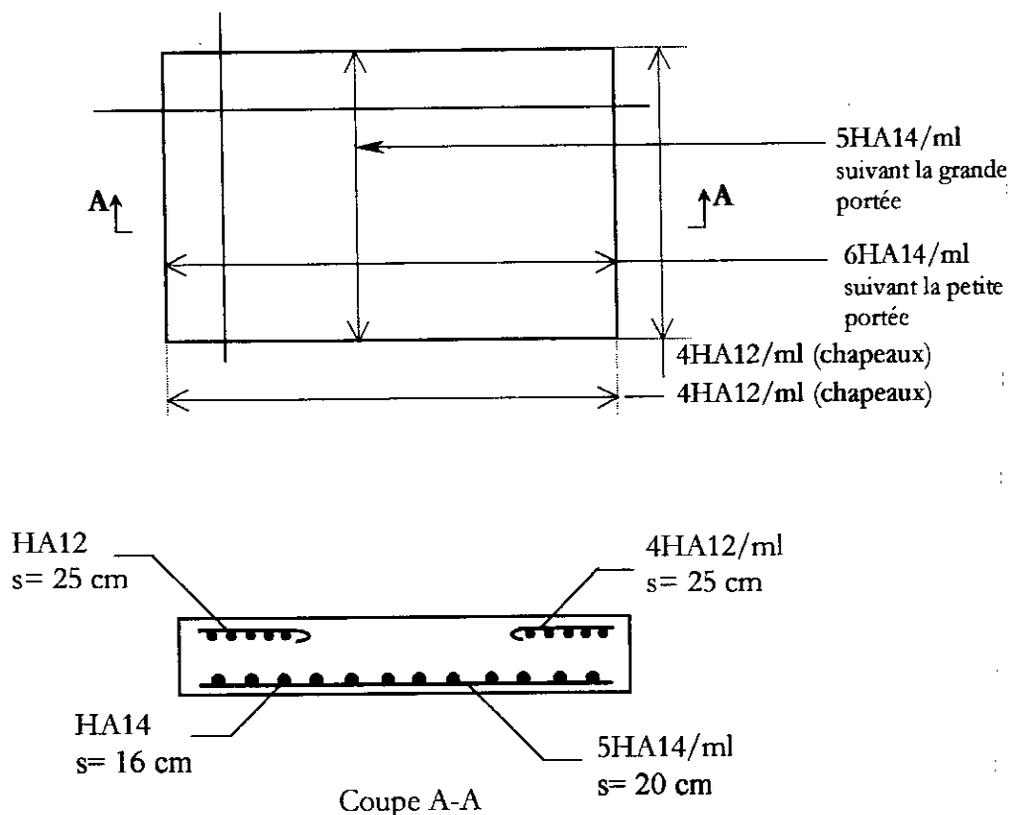


Figure 5.2 : Ferrailage de la dalle(I).

### 5.3 DALLE (II)

Cette dalle carrée ( $8 \times 8$  m), sert à loger l'hélice. Elle possède la même épaisseur que la dalle précédente ( $e=20$  cm) [ Elle comporte une ouverture circulaire de diamètre  $\phi = 5.6$  m ].

Le chargement est :

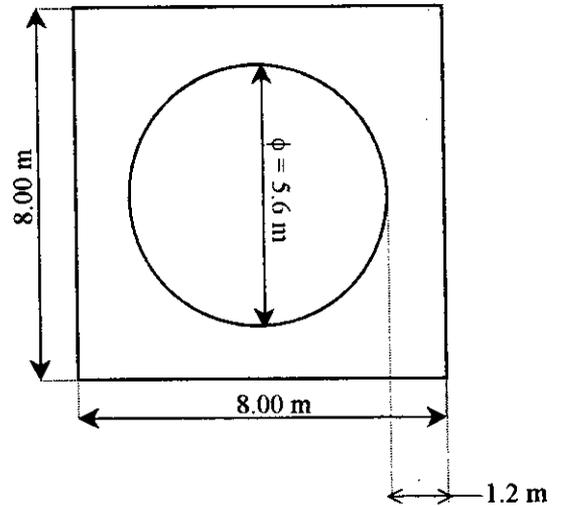
- la charge  $G$  :  $G = 5 \text{ kN/m}^2$
- la surcharge  $Q$  :  $Q = 1.5 \text{ kN/m}^2$  ([ 4 ], parag.7.4)

Combinaison à l'ELU :  $1.35G + 1.5Q = 9 \text{ kN/m}^2$

Combinaison à l'ELS :  $G + Q = 6.5 \text{ kN/m}^2$

La dalle présente une parfaite symétrie ;

$$I_x = I_y \Rightarrow \rho = 1$$



Les moments max en travées et en appuis sont :

Figure 5.3 : Dalle II.

	Eléments	Nœuds	Etat Limite de Service [ kN.m ]	Etat Limite Ultime [ kN.m ]
<b>Travée</b>	18-32-47-66	33-60-61-88	4.0919	5.6042
<b>Appui</b>	13-24-74-83	27-39-110-118	-15.012	-21.043

Tableau 5.2 : Moments max. en travées et en appuis (Dalle II).

### 5.3.1 Calcul à l'ELU :

$$b = 1\text{ m} \quad h = 20\text{ cm} \quad d = 17\text{ cm} \quad d' = 3\text{ cm}$$

\* En travée :

$$M_u = 5.0642\text{ kN.m}$$

$$f_{bu} = 11.33\text{ Mpa} \quad f_{su} = 348\text{ Mpa}$$

$$\mu_{bu} = \frac{M_u}{b \cdot d^2 \cdot f_{bu}} = 0.017 < \mu_{lu} = 0.3$$

$$\alpha = 0.022 < \alpha_{AB} = 0.259 \Rightarrow \text{pivot A}$$

$$Z_b = 16.85\text{ cm}$$

$$A_{su} = \frac{M_u}{Z_b \cdot f_{su}} = 0.95\text{ cm}^2/\text{ml}$$

\* En appui :

$$M_u = 21.043 \text{ kN.m}$$

$$\mu_{bu} = 0.064 < \mu_{lu}$$

$$\alpha = 0.083 < \alpha_{AB} \Rightarrow \text{pivot A}$$

$$Z_b = 16.44 \text{ cm}$$

$$A_{su} = 3.68 \text{ cm}^2/\text{ml}$$

### 5.3.2 Calcul à l'ELS :

$$b = 1 \text{ m} \quad d = 17 \text{ cm} \quad d' = 3 \text{ cm} \quad \bar{\sigma}_s = 176 \text{ Mpa} \quad \bar{\sigma}_b = 12 \text{ Mpa}$$

$$n = 15 \text{ (coefficient d'équivalence).}$$

\* En travée :

$$M_{ser} = 4.0919 \text{ kN.m}$$

$$M_{lser} = M_u / \gamma = 70.165 \text{ kN.m} \quad \text{tq: } \gamma = M_u / M_{ser} = 1.4$$

$$\mu_{ser} = 0.012 < \mu_{ab} = 0.203 \Rightarrow \text{pivot a}$$

$$Z_b = 15.17 \text{ cm} \quad \Rightarrow \quad A_{ser} = \frac{M_{ser}}{Z_b \cdot \sigma_s} = 1.44 \text{ cm}^2/\text{ml}$$

\* En appui :

$$M_{ser} = 15.012 \text{ kN.m}$$

$$\mu_{ser} = 0.043 < \mu_{ab} \Rightarrow \text{pivot a}$$

$$Z_b = 15.48 \text{ cm} \quad \Rightarrow \quad A_{ser} = 5.51 \text{ cm}^2/\text{ml}$$

• **Choix du ferrailage**

- En appuis :  $A_a = 5.51 \text{ cm}^2/\text{ml}$   $\longrightarrow$  5HA12 /ml  $\quad$  st = 20 cm

- En travées :  $A_t = 1.44 \text{ cm}^2/\text{ml}$   $\longrightarrow$  on adopte un treillis soudé :  $\phi 5 : 15/15$

- Autour de l'ouverture, on utilise des barres de longueur 5m et de diamètre  $\phi 12$  (fig.5.4).

**5.3.3 Vérification du ferrailage minimum :**

Vérifions la condition de non-fragilité [ BAEL.art A.8.2.4 ]

$$\frac{A}{b \times h} \geq \left( \frac{3 - \rho}{2} \right) \rho_0$$

Dans notre cas ;

$$\rho = l_x / l_y = 1 \quad b = 1\text{m} \quad h = 20 \text{ cm} \quad \rho_0 = 0.0008$$

On doit avoir :  $A / bh \geq \rho_0$

A.N :  $A \geq A_{\min} = 0.0008 \times 1 \times 0.2 = 1.6 \text{ cm}^2 \longrightarrow$  vérifiée.

**5.3.4 Vérification de la flèche :**

D'après la formule de la flèche max donnée par les BAEL.83 :

$$f_{\max} = \frac{5ql_x^4}{384EI} \leq f_{adm} = \frac{l_x}{500}$$

$$q = 6.5 \text{ kN/cm}^2 \quad l_x = 800 \text{ cm} \quad E = 1004.33 \text{ kN/cm}^2 \quad I = 66666.67 \text{ cm}^4$$

A.N :  $f_{\max} = 0.052 \text{ cm} < l_x/500 = 1.6 \text{ cm}$ .

**5.3.5 Vérification au cisaillement :**

Les conditions citées dans le paragraphe 5.2.5 sont toutes vérifiées :

$$V_u \leq 0.05 f_{c28} d$$

$$V_u / d = 36 / (0.9 \times 0.2) = 0.2 \text{ Mpa} < 0.05 f_{c28} = 1 \text{ Mpa}$$

5.3.6 Schéma de ferrailage :

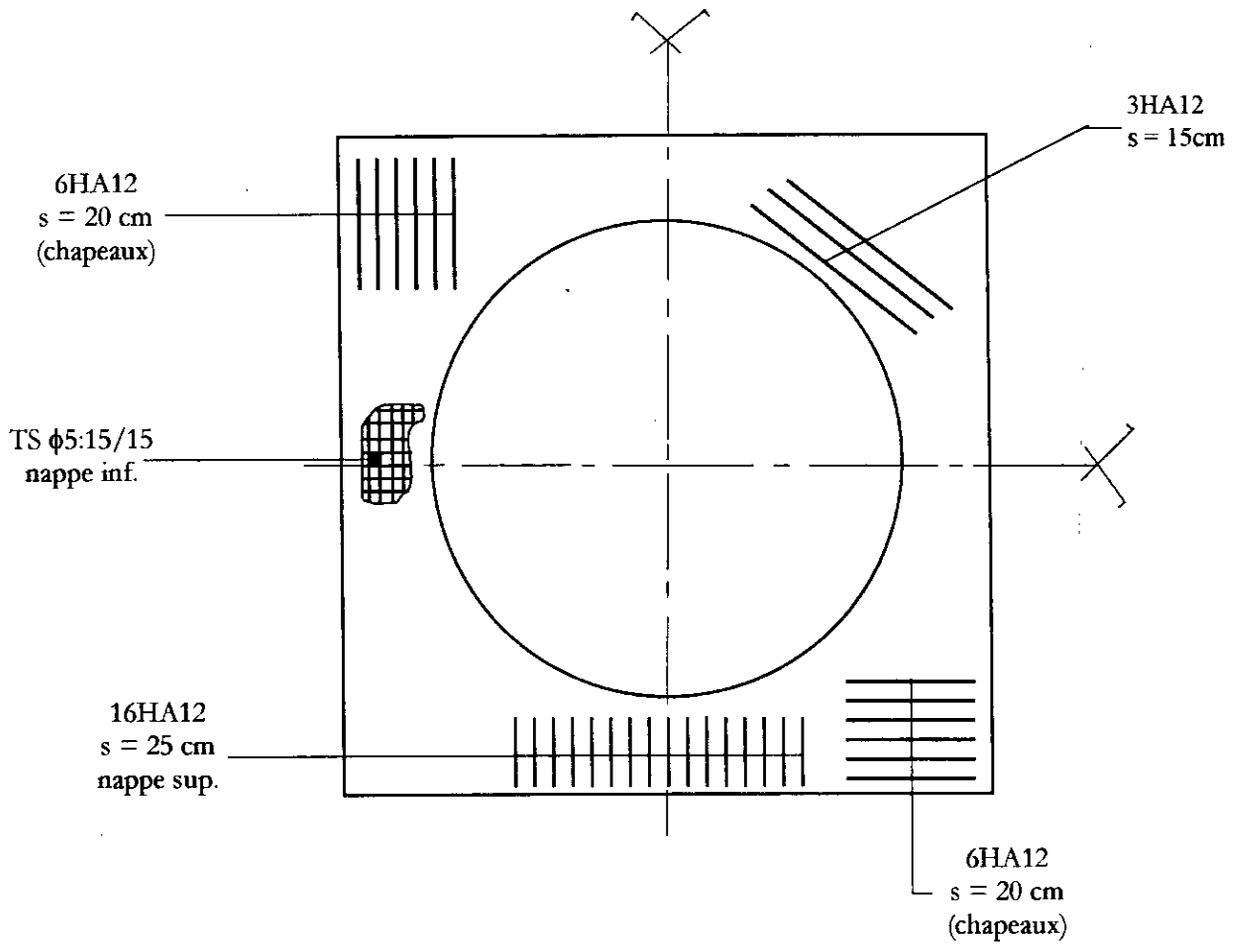


Figure 5.4 : Ferrailage de la dalle(II).

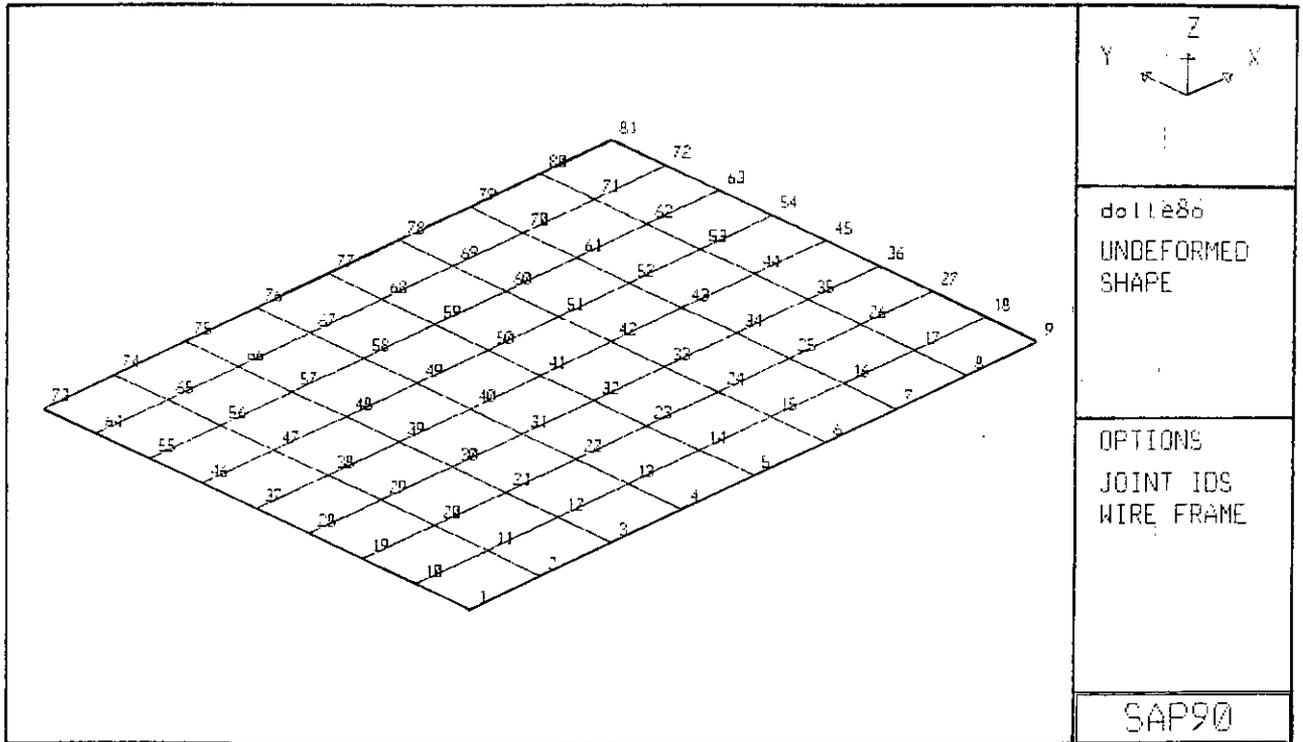


Figure 5.5 : Les nœuds.

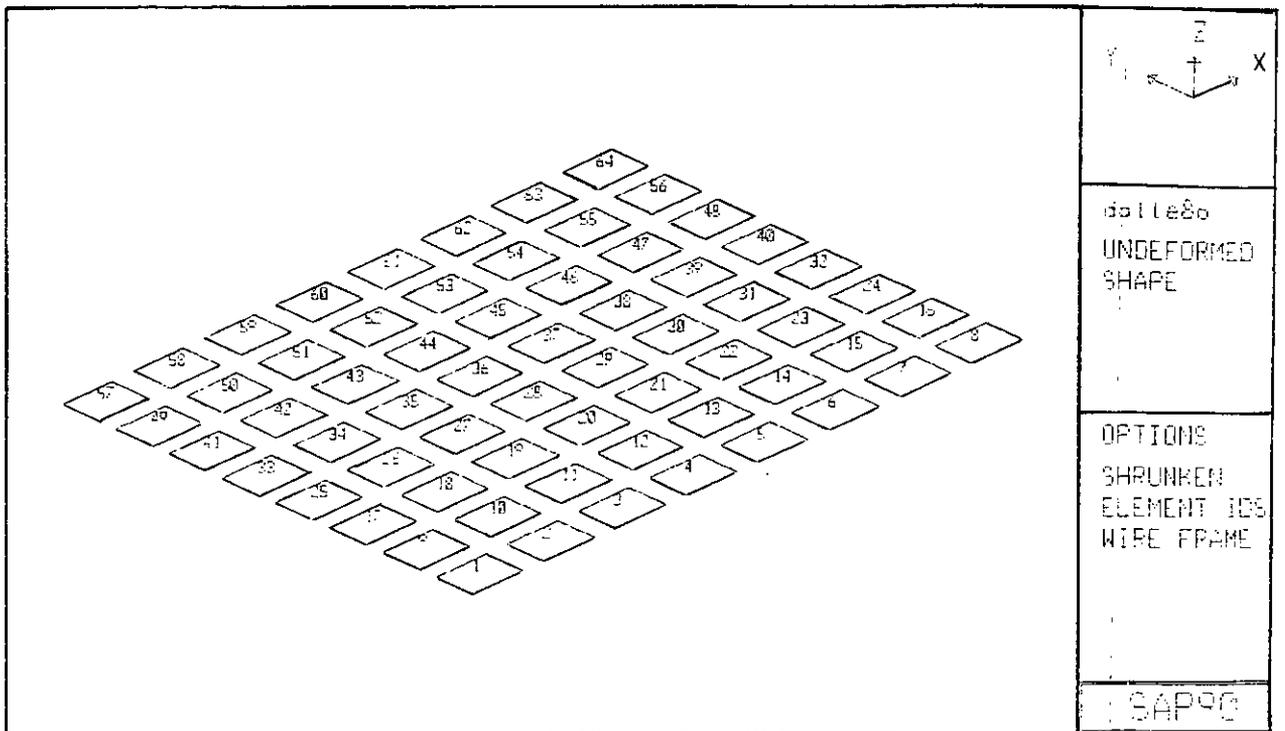


Figure 5.6 : Les éléments.

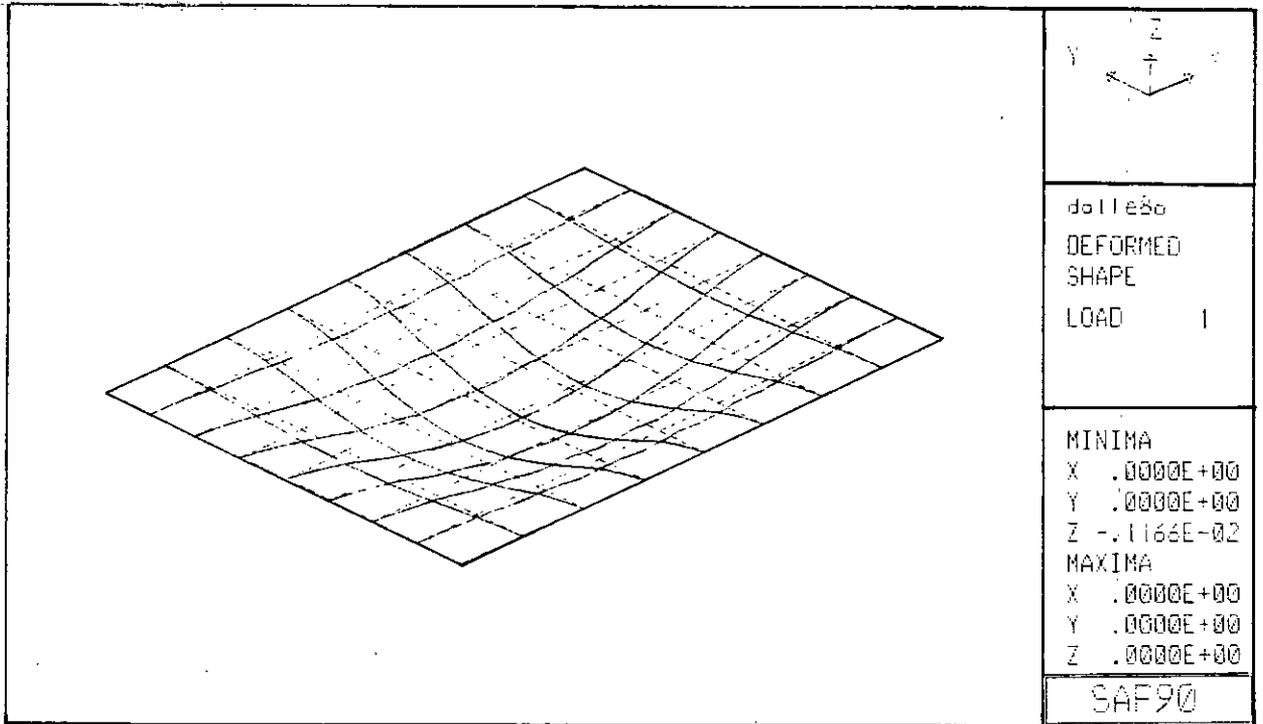


Figure 5.7 : Déformée de la dalle I.

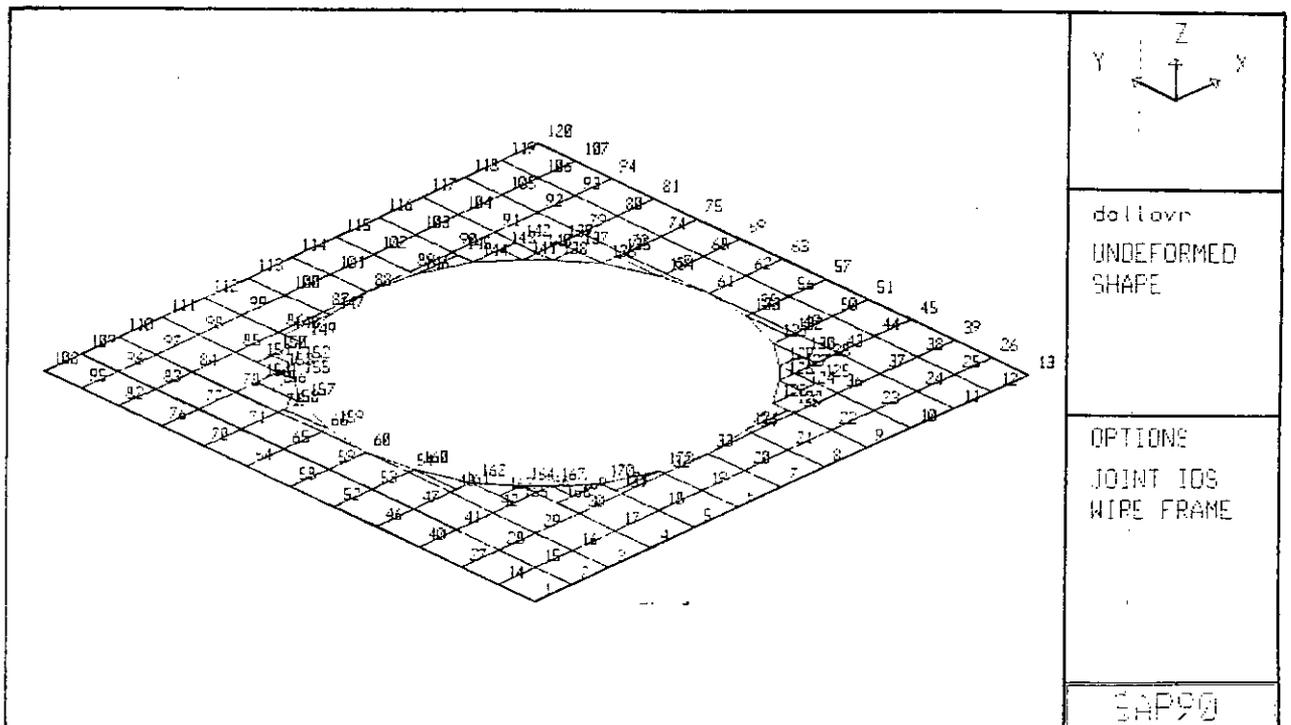


Figure 5.8 : Les nœuds.

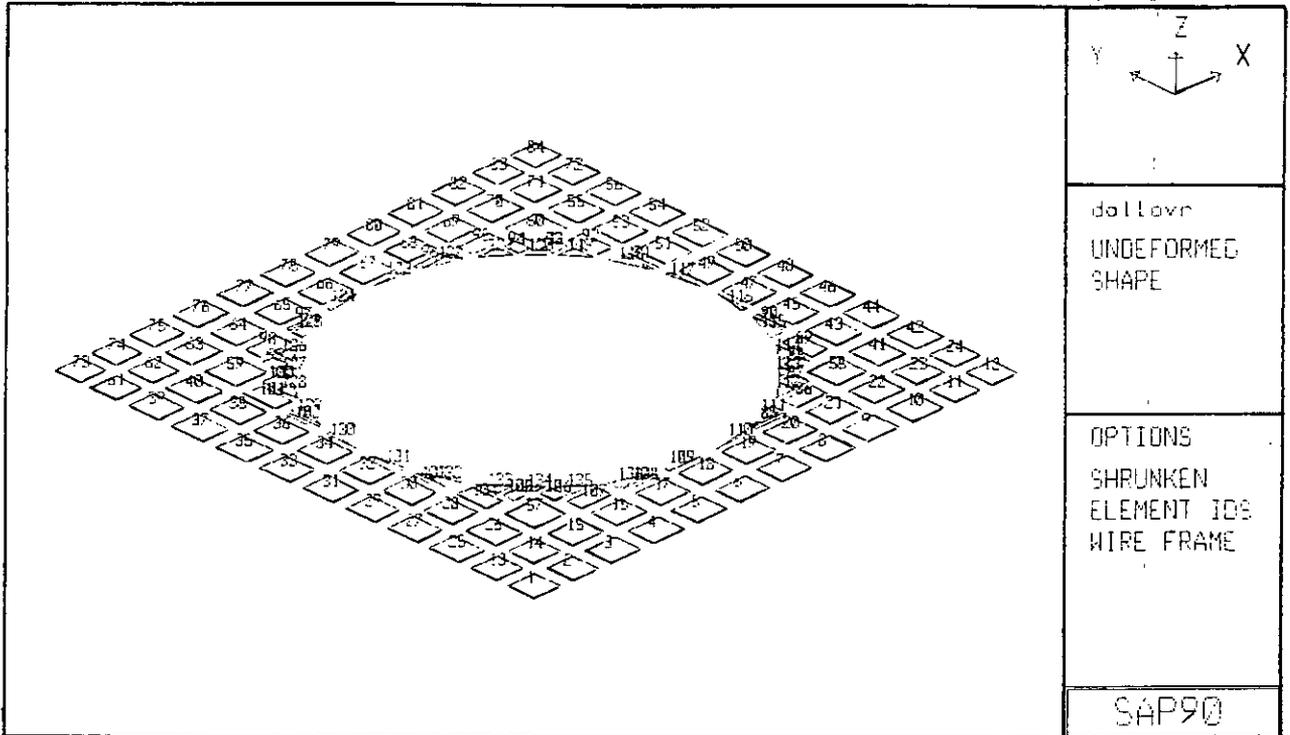


Figure 5.9 : Les éléments.

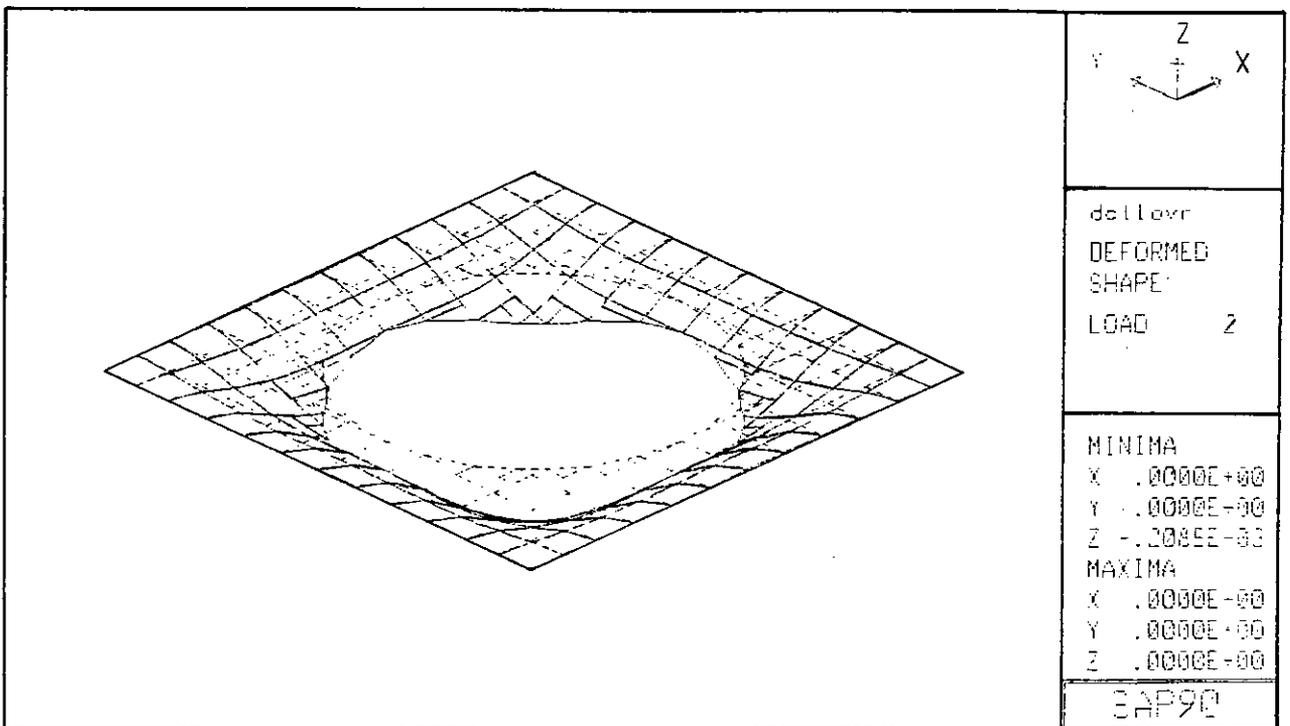


Figure 5.10 : Déformée de la dalle II.

# CHAPITRE VI

---

---

## ETUDE AU VENT

---

---

*« L'homme qui ne sait rien et qui s'en rend compte c'est l'ignorant. Celui qui ne s'en rend pas compte c'est le sot. »*

**IBN AHMED**

## CHAPITRE VI ETUDE AU VENT

### 6.1 INTRODUCTION

Le vent est assimilé à des forces statiques appliquées à la construction. Ces forces, qui peuvent engendrer des effets dynamiques qui dépendent des caractéristiques aérodynamiques de la structure, sont fonctions aussi de plusieurs paramètres ; la région, le site, l'altitude, les dimensions de l'ouvrage, la majoration dynamique, le coefficient de traînée et de l'effet de masque. L'étude est faite selon le règlement français (*NEIGE ET VENT* 65)[12].

Les dimensions de la structure sont :

- Hauteur	$H = 14.40 \text{ m}$
- Longueur	$a = 14.35 \text{ m}$
- Largeur	$b = 8.50 \text{ m}$

L'action du vent sur une construction dans une direction donnée est la résultante  $F$  de toutes les actions sur les différentes parois de la construction conformément aux règles III-1,5[12].

$$\vec{F} = \vec{T} + \vec{L} + \vec{U}$$

avec :

- T : force de traînée dans la direction horizontale et parallèle à celle du vent (elle produit un effet d'entraînement et de renversement),
- L : force de dérive dans la direction horizontale et perpendiculaire au vent,
- U : force de portance de direction verticale ascendante qui produit un soulèvement et un renversement.

### 6.2 FORCE DE TRAINEE

La force de traînée  $T$  par unité de longueur est la composante de la force du vent dans la direction parallèle à ce dernier.

$$T = C_t \cdot \beta \cdot \delta \cdot q \cdot d$$

Tel que :

$C_t$  : coefficient de traînée (de forme) dépendant de l'élancement de l'ouvrage et de la rugosité de la surface,

$$C_t = C_{t0} \cdot \delta_0$$

$C_{t0}$  : coefficient tenant compte de la "rugosité" (pour les constructions prismatiques,  $C_{t0}$  est fonction du nombre de cotés) (p.136 C.3.2),

$\delta_0$  : coefficient dépendant du rapport de dimension (p.88-112 CIII.20),

$\beta$  : coefficient de majoration dynamique tenant compte de la période d'oscillation de la structure ;

$$\beta = \theta (1 + \xi \cdot \tau)$$

$\theta$  : coefficient dépendant de la hauteur de la construction,

$\xi$  : coefficient de réponse donnée en fonction de la période,

$\tau$  : coefficient de pulsation déterminé à chaque niveau considéré en fonction de la période.

$\delta$  : coefficient de réduction, il est déterminé en fonction de la plus grande dimension de la construction (horizontale ou verticale au vent et de la coté H du point le plus haut de cette surface),

d : largeur du maître couple (c'est la projection orthogonale de la surface considérée ou de l'ensemble de la construction sur un plan normal à la direction du vent),

q : pression du vent ;

$$q = q_H \cdot K_s \cdot K_m$$

$K_s$  : coefficient de site,

$K_m$  : coefficient de masque,

$q_H$  : pression dynamique à la hauteur H ;

$$q_H = q_{10} \cdot 2,5 \cdot (H+18) / (H+60)$$

$q_{10}$  : pression dynamique de base (H=10.0 m).

### 6.2.1 Vent normal à la face $S_a$ (grande surface) :

$$a = 14.35 \text{ m}$$

$$b = 8.50 \text{ m}$$

$$H = 14.4 \text{ m}$$

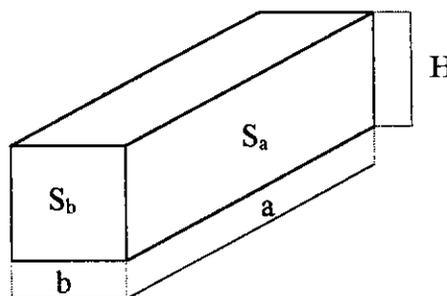


Figure 6.1 : Faces  $S_a$  et  $S_b$ .

La valeur de  $\delta_0$  est donnée par le diagramme de la figure (RIII10 [12] p.141).

$$\lambda_a = H/a = 1.0035 \quad \Rightarrow \quad \delta_0 = 0.90$$

On est dans le cas d'une construction de catégorie I (construction prismatique à base rectangulaire) :  $C_{t0} = 1.30$

d'où :  $C_t = 0.9 \times 1.3 = 1.17$

$$C_t = 1.17$$

$\theta$  : est donnée en fonction de la coté du sommet  $H_s$  ;

$$H_s < 30 \quad \Rightarrow \quad \theta = 0.7$$

$\xi$  : en fonction de la période  $T$  ;

Structure contreventée par voile en béton armé (p.233 [12] art.4,532)

$$T_x = 0.08 \frac{H}{L_x} \sqrt{\frac{H}{L_x + H}}$$

$$L_x = a = 14.35 \text{ m}$$

$$T_x = 0.215 \text{ s}$$

Fig R.III.3 [12]  $\longrightarrow \xi_x = 0.1$

$$\beta_x = 0.7 (1 + 0.1\tau)$$

Fig R.III.4 [12] nous donne  $\tau (H)$  ;

$$H = 14.4 \text{ m} \longrightarrow \tau = 0.355$$

$$H \leq 10 \text{ m} \longrightarrow \tau = 0.36$$

On détermine  $\beta_x$  pour de points particuliers :

- point haut  $H = 14.4 \text{ m}$
- point bas  $H = 10.0 \text{ m}$

Pour  $H = 14.4 \text{ m}$

$$\beta_x = 0.7 (1 + 0.1 \times 0.355) = 0.725 < 1$$

Pour  $H = 10.0 \text{ m}$

$$\beta_x = 0.7 (1 + 0.1 \times 0.360) = 0.725 < 1$$

On prend  $\beta = 1$ .

**6.2.2 Vent normal à la face  $S_b$  (petite surface) :**

$$\lambda_b = H/b = 1.694 \quad \Rightarrow \quad \delta_0 = 0.972$$

$$C_{t0} = 1.30$$

d'où :  $C_r = 1.26$

$$\theta = 0.7$$

$$T_y = 0.08 \frac{H}{L_y} \sqrt{\frac{H}{L_y + H}}$$

$$L_y = 8.5 \text{ m}$$

$$T_y = 0.313 \text{ s} \quad \longrightarrow \quad \xi_y = 0.2$$

$$\beta_y = 0.7 (1 + 0.2\tau)$$

$$H = 14.4 \text{ m} \quad \longrightarrow \quad \tau = 0.355$$

$$H \leq 10 \text{ m} \quad \longrightarrow \quad \tau = 0.36$$

Pour  $H = 14.4 \text{ m}$

$$\beta_y = 0.749 < 1$$

Pour  $H = 10.0 \text{ m}$

$$\beta_y = 0.75 < 1$$

On prend  $\beta = 1$

***Dans le cas extrême :***

Les pressions dynamiques extrêmes servant au calcul de l'action d'ensemble sont multipliées par l'expression :

$$\beta_{ext} = [0.5 + \theta/2] \times \beta \quad ([12], 1.512)$$

Pour  $H = 14.4 \text{ m}$

- *sens longitudinal :*

$$\beta_{ext} = [0.5 + 0.7/2] \cdot 0.725 = 0.616 < 1$$

- sens transversal :

$$\beta_{\text{ext}} = [0.5 + 0.7/2] \cdot 0.749 = 0.637 < 1$$

Pour  $H = 10.0$  m

- sens longitudinal :

$$\beta_{\text{ext}} = [0.5 + 0.7/2] \cdot 0.725 = 0.616 < 1$$

- sens transversal :

$$\beta_{\text{ext}} = [0.5 + 0.7/2] \cdot 0.75 = 0.638 < 1$$

On prend  $\beta = 1$ .

- Le coefficient  $\delta$  :

La grande dimension de la surface offerte au vent (mâitre-couple) est :

$$H=14.4 \text{ m} \longrightarrow \delta = 0.7 \quad \text{fig.RIII,[12] p.63}$$

- Pression du vent  $q$  :

$$q = q_H \cdot K_s \cdot K_m$$

$$q_H = q_{10} \cdot K_H$$

$q_{10}$  : pression dynamique de base à 10 m de hauteur  
au dessus du sol ( sa valeur varie suivant la région).

$$\text{région II} \longrightarrow q_{10} = 70 \text{ daN/m}^2 = 0.7 \text{ kN/m}^2 \text{ (tableau IV [12] )}$$

$K_H$  : coefficient de hauteur ;

$$K_H = 2.5 (H+18) / (H+60)$$

$K_m$  : coefficient de masque = 1 (pas d'effet de masque),

$K_s$  : coefficient de site ;

$$\text{Site exposé, région II} \longrightarrow K_s = 1.3$$

La pression normale sera donc :

$$q_n = 2.275 (H+18) / (H+60)$$

La pression extrême du vent est :  $q_e = 1.75 q_n$  ([12] 1,22)

$$\text{d'où :} \quad q_e = 3.98 (H+18) / (H+60)$$

- Largeur du maître couple « d » :

- Sens longitudinal  $d = a = 14.35 \text{ m}$
- Sens transversal  $d = b = 8.5 \text{ m}$

Finalement la force de traînée est fonction de :

- 1- la direction du vent,
- 2- la hauteur considérée.

Force de traînée	$C_t$	$\beta$	$\delta$	$q_n$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$q_e$ [kN/m <sup>2</sup> ]	d [m]
Sens longitudinal	1.17	1	0.7	$2.275(H+18)/(H+60)$	$3.98(H+18)/(H+60)$	14.35
Sens transversal	1.26	1	0.7	$2.275(H+18)/(H+60)$	$3.98(H+18)/(H+60)$	8.5

N(m)	$q_n$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$q_e$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$T_n$ .long [kN/ml]	$T_n$ .trans [kN/ml]	$T_e$ .long [kN/ml]	$T_e$ .trans [kN/ml]
14.4	0.991	1.733	11.647	7.43	20.367	12.992
10.0	0.910	1.592	10.965	6.822	18.710	11.935
5	0.805	1.408	9.461	6.035	16.548	10.556
0	0.683	1.194	8.027	5.12	14.033	8.951

**Tableau 6.1 :** Forces de traînées pour les différents niveaux.

### 6.3 FORCE DE DERIVE

Action perpendiculaire à celle du vent, elle correspond à une force qui s'exprime par :

$$L = C_L \cdot \delta^2 \cdot \beta' \cdot q_{cr} \cdot d \cdot (h/H)$$

tel que :

$C_L$  : coefficient de dérive,

$\delta^2$  : coefficient de réduction tenant compte de l'effet des dimensions,

$\beta'$  : coefficient de majoration dynamique,

$q_{cr}$  : pression dynamique critique tenant compte de l'amortissement,

d : largeur du maître-couple,

h : la coté du niveau considéré compté à partir du sol.

D'après NV65, si la vitesse du vent est supérieur à 25 m/s, il serait inutile de faire un calcul à la résonance. Si  $T=TK$ , on a dans ce cas le phénomène de résonance.

c.à.d : 
$$V = V_{cr} = d / (S.T)$$

Tel que :

S : nombre de STROUHAL, fonction de la rugosité des surfaces, de la forme de la construction et de la rugosité du fluide.

On prend  $s = 0.25$  ([12]annexe.8.3.11)

V : vitesse du fluide,

T : période de la structure.

$$dx = 14.35 \text{ m} \longrightarrow T_x = 0.215 \text{ s}$$

$$dy = 8.50 \text{ m} \longrightarrow T_y = 0.313 \text{ s}$$

Donc la vitesse sera égale à :

- *sens longitudinal*

$$V_{cr} = 14.35 / (0.25 \times 0.215) = 266.977 \text{ m/s} > 25 \text{ m/s}$$

- *sens transversal*

$$V_{cr} = 8.50 / (0.25 \times 0.313) = 108.626 \text{ m/s} > 25 \text{ m/s}$$

Les vitesses critiques dans les deux sens sont supérieures à 25 m/s. on peut conclure qu'il est inutile de faire le calcul à la résonance.

## 6.4 FORCE DE PORTANCE

C'est une action de soulèvement de la structure, mais généralement elle est négligeable devant le poids mort de l'ouvrage, elle s'exprime par :

$$U = C_u \cdot \delta \cdot q \cdot S_u$$

tel que : 
$$C_u = C_e - C_i$$

$C_u$  : coefficient de portance,

$C_i$  : coefficient de surpression intérieure sur la terrasse,

$C_e$  : coefficient de surpression extérieure sur la terrasse, fonction de l'angle  $\alpha$  (en degrés) du versant considéré à la direction du vent et du coefficient  $\delta_0$  dépendant du rapport de dimension.

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha = 0^\circ \\ \delta_0 = 0.972 \end{array} \right. \Rightarrow C_e = -0.5 \quad ([12] \text{fig. RIII.6 p.93})$$

La structure présente une ouverture dans le sens transversal (fig.6.1).

La paroi ouverte possède une perméabilité  $\mu = 54.4 \% > 35 \% \Rightarrow$  construction ouverte.

D'après l'annexe 5 [12] ;

$$C_i = -0.6 (1.3 \delta_0 - 0.8) = -0.278$$

Les parois fermées possèdent une perméabilité  $\mu \leq 5 \%$

$$C_i = +0.8$$

Donc ;

$$C_u = C_e - C_i = |0.5 + 0.8| = 1.3$$

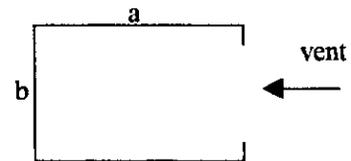


Figure 6.2 : Ouverture transversale.

- Le coefficient de dimension  $\delta = 0.7$  (déjà calculé)
- $q$  : pression dynamique ;

$$H=14.4 \text{ m} \longrightarrow q = 2.275 (H+18) / (H+60) = 0.991 \text{ kN/m}^2$$

- $S_u$  : surface de la toiture-terrasse ;

$$S_u = 121.975 \text{ m}^2$$

D'où :

$$U = 1.3 \times 0.7 \times 0.991 \times 121.975 = 109.998 \text{ kN}$$

$$U \approx 11 \text{ t}$$

Cette valeur est négligeable devant le poids de la structure, donc il n'y a pas risque de soulèvement ou de renversement.

6.5 SOLLICITATIONS D'ENSEMBLE (tableau ci-dessous)

Tableau 6.2 : Sollicitations d'ensemble.

Niveau	Sollicitations d'ensemble											
	Forces de calcul [kN/ml]				Efforts tranchants [kN]		Moments fléchissants [kN.m]		Efforts tranchants [kN]		Moments fléchissants [kN.m]	
	Face S <sub>a</sub>		Face S <sub>b</sub>		Face S <sub>a</sub>				Face S <sub>b</sub>			
	F <sub>n</sub> = T <sub>n</sub>	F <sub>e</sub> = T <sub>e</sub>	F <sub>n</sub> = T <sub>n</sub>	F <sub>e</sub> = T <sub>e</sub>	H <sub>n</sub>	H <sub>e</sub>	M <sub>n</sub>	M <sub>e</sub>	H <sub>n</sub>	H <sub>e</sub>	M <sub>n</sub>	M <sub>e</sub>
14.4	11.64	20.37	7.43	12.99	-	-	-	-	-	-	-	-
10.0	10.70	18.71	6.82	11.94	51.247	89.615	112.743	197.153	32.692	57.105	71.922	125.763
5.0	9.46	16.55	6.04	10.56	104.722	183.165	502.666	879.103	66.802	116.840	320.657	560.776
0.0	8.03	14.03	5.12	8.95	152.027	265.905	1144.538	2001.778	96.977	169.620	730.105	1276.926

n : normal,  
e : extrême.

# CHAPITRE VII

---

---

## *ETUDE DES VOILES*

---

---

*« Parmi les paroles sont les nombres, qui sont les paroles les plus simples. »*  
*PAUL Valéry*

**CHAPITRE VII  
ETUDE DES VOILES**

L'étude des voiles constituant la tour du réfrigérant nous permet d'assurer la stabilité de ce dernier vis à vis des différents efforts dus au vent, aux charges verticales et à la température.

**7.1 SOUS CHARGES HORIZONTALES**

Pour simplifier les calculs, les éléments conçus pour reprendre les forces horizontales dues au vent, dont la distribution est uniformément répartie sur toute la hauteur de la structure, seront uniquement les voiles 1,2 et 3 formant un ensemble en U. Le dimensionnement du portique extérieur sera uniquement vis à vis des charges verticales.

**7.1.1 Caractéristiques des voiles :**

**a. Centre de masse :**

Défini par la relation :

$$\left\{ \begin{array}{l} x_G = \frac{\sum_{i=1}^3 x_i m_i}{\sum_{i=1}^3 m_i} \\ y_G = \frac{\sum_{i=1}^3 y_i m_i}{\sum_{i=1}^3 m_i} \end{array} \right.$$

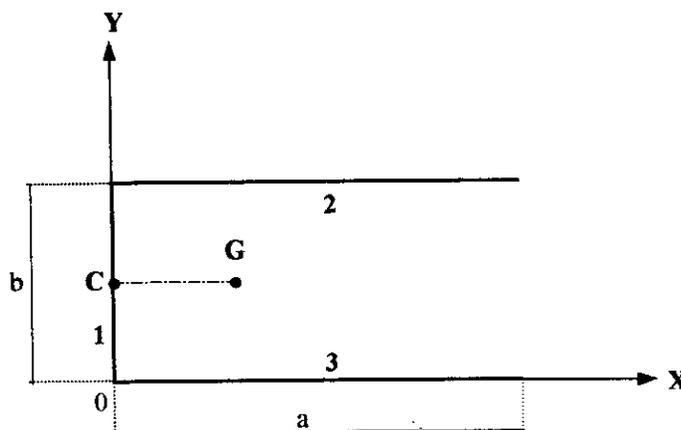


Figure 7.1 : Centre de masse.

où  $m_i$  est la masse du voile « i »  
Soit  $m_1 = m$  ,  $m_2 = m_3 = m'$

$$\left\{ \begin{array}{l} x_G = \frac{m'a}{m+2m'} \\ y_G = \frac{\frac{m'b}{2} + m'b}{m+2m'} = \frac{b}{2} \end{array} \right.$$

Pour  $a = 14.35$  m    $b = 8.5$  m    $e_1 = e_2 = e_3 = 25$  cm    $h_1 = h_2 = h_3 = 9.6$  m

$x_G = 5.54$  m  
 $y_G = 4.25$  m

**G (5.54 , 4.25) m**

**b. Centre de torsion :**

Le centre de torsion est le centre de gravité des inerties de l'ensemble des voiles. Il est caractérisé par les propriétés suivantes :

- Une force dont la ligne d'action passe par le centre de torsion engendre uniquement une translation des refends dans la direction parallèle à la force agissante.
- Un moment dont l'axe vertical passe par le centre de torsion engendre uniquement une rotation des refends de même sens que le moment.

Pour  $m$  voiles parallèles à OY  
 $n$  voiles parallèles à OX

Le centre de torsion est donné par :

$$\left\{ \begin{array}{l} x_c = \frac{\sum_{j=1}^m I_{y_j} \times x_j}{\sum_{j=1}^m I_{y_j}} \\ y_c = \frac{\sum_{i=1}^n I_{x_i} \times y_i}{\sum_{i=1}^n I_{x_i}} \end{array} \right. \quad \text{Où :}$$

$I_{y_i}$  : l'inertie du  $j^{\text{ème}}$  voile parallèle à OY  
 $I_{x_i}$  : l'inertie du  $i^{\text{ème}}$  voile parallèle à OX

$$I_1 = I \quad I_2 = I_3 = I'$$

$$X_c = 0$$

$$Y_c = (I'b/2I') = b/2 \quad \Rightarrow \quad C : (0, 4.25) \text{ m}$$

**c. Excentricité :**

$$E = (dx ; dy)$$

$$dx = |x_c - x_G| = 5.54 \text{ m}$$

$$dy = |y_c - y_G| = 0$$

Le centre de masse et le centre de torsion se trouvent sur la même ligne parallèle à OX.

### 7.1.2 Distribution des efforts horizontaux : [11]

La distribution des efforts horizontaux s'effectue à l'aide de la méthode du centre de torsion. Celle-ci est recommandée lorsque les voiles sont « ordonnés », c'est à dire ne présentent pas d'inclinaison.

Etant donné que la résultante des forces extérieures ne coïncide pas avec le centre de gravité des inerties, elle sera décomposée en un effort de translation et un effort de rotation.

En supposant le plancher infiniment rigide, les efforts dans les refends sont ceux d'un système isostatique (fig7.2)

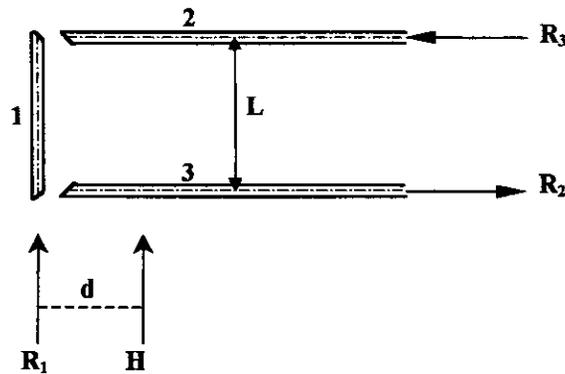


Figure 7.2 : Distribution des efforts horizontaux.

#### a. Sens transversal :

Le système peut être amené à une force  $R_1$ , agissant au droit du refend 1, à condition d'introduire un moment  $H.d$

$$\begin{aligned} \text{D'où} \quad R_1 &= H_t \\ R_2 = -R_3 &= Hd/l \end{aligned}$$

Avec :

$H_t$  : effort horizontal dû au vent,

$R_1$  : effort dû à la translation repris par le voile 1,

$R_2, R_3$  : efforts dus à la rotation repris par les voiles 2 et 3.

$$\text{AN : } d=5.54 \text{ m} \quad b=8.5 \text{ m}$$

$$H_t = 104.722 \text{ kN}$$

$$R_1 = 104.722 \text{ kN}$$

$$R_2 = -R_3 = 68.25 \text{ kN}$$

**b. Sens longitudinal :**

Le centre de masse et le centre torsion se trouvent sur la même ligne. La totalité des efforts est reprise par le voile 2 et 3.

$$R_2=R_3= H_1/2$$

AN :

$$H_1= 66.802 \text{ kN}$$

$$R_2=R_3= 33.401 \text{ kN}$$

**7.2 SOUS CHARGES VERTICALES**

On désigne par charges verticales, les charges permanentes (G) et les surcharges d'exploitation (Q). Ces charges sont transmises aux éléments porteurs, qui les acheminent jusqu'aux fondations.

Pour se faire, on utilise la méthode des lignes de rupture (fig73)

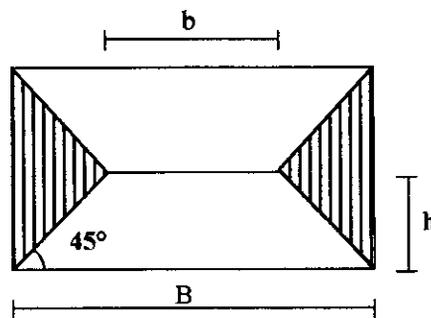


Figure 7.3 : Dalle reposant sur 4 appuis.

Surface triangulaire :  $h^2/2$

Surface trapézoïdale :  $(B + b)h/2$

**7.2.1 Revenant au voile 1 :**

- Charges et surcharges venant de la dalle II :

- poids propre :  $(5 \times 8.25^2)/4 = 85.1 \text{ kN}$

- surcharge d'exploitation :  $(1.5 \times 8.25^2)/4 = 25.5 \text{ kN}$

- Venant de la poutre Q<sub>7</sub> :
  - poids propre :  $25 \times 0.7 \times 0.3 \times 8.25 = 43.3 \text{ kN}$
  - poids du moteur :  $5.625 \text{ kN}$
  - poids du réducteur + l'hélice qui lui revient :  $25.06/2 = 12.53 \text{ kN}$
- Poids propre du voile :  $25 \times 0.25 \times 8.5 \times 9.6 = 510 \text{ kN}$

Finalelement :

$$N_G = 85.1 + (5.625 + 12.53 + 43.3) / 2 + 510 = 625.8 \text{ kN}$$

$$N_Q = 25.5 \text{ kN}$$

### 7.2.2 Revenant aux voiles 2 et 3 :

Les voiles 2 et 3 sont identiques, les charges et surcharges qui leur reviennent sont :

- Dalle I ;
  - poids propre :  $(5 \times 18) / 2 = 45 \text{ kN}$
  - poids de l'eau :  $(4 \times 18) / 2 = 36 \text{ kN}$
- Dalle II ;
  - poids propre :  $85.1 \text{ kN}$
  - surcharge :  $25.5 \text{ kN}$
- Poutre Q<sub>6</sub> ;
  - poids propre :  $43.3 \text{ kN}$
  - poids du réducteur + l'hélice :  $12.53 \text{ kN}$
- Poutre Q<sub>8</sub> ;
  - poids propre :  $43.3 \text{ kN}$
  - charges qui lui revient des deux dalles I et II :
 
$$4 \times 15 + 5 \times 15 + 85.1 = 220.1 \text{ kN}$$

- surcharges : 25.5 kN
- réaction due à la poutre Q<sub>7</sub>: 33.2 kN
- Poids propre du voile : 25×0.25×14.35×9.6= 861 kN

Finalement :

$$N_G = 45 + 36 + 85.1 + (43.3 + 12.53)/2 + (43.3 + 220.1 + 33.2)/2 + 861 = 1203 \text{ kN}$$

$$N_Q = 51 \text{ kN}$$

### **7.3 EFFET DE LA TEMPERATURE**

Considérée souvent comme un facteur secondaire, moins important que la sollicitation mécanique, la température est cependant un paramètre essentiel à prendre en compte lors de l'étude du comportement d'un ouvrage en béton. Les structures sont en effet toujours susceptibles d'être soumises à une action thermique comme dans le cas étudié, pour des raisons fonctionnelles (ouvrages subissant normalement des gradients élevés en service).

#### **7.3.1 Evaluation du gradient thermique :**

Le calcul du gradient thermique dû à l'effet de la température est calculé par la méthode proposée dans le livre de M.Diver[12].

On considère que la température de la vapeur d'eau demeure constante sur toute la hauteur de la tour du réfrigérant.

Pour simplifier les calculs on suppose que le gradient thermique est linéaire dans l'épaisseur de la paroi (fig.7.4 ), quoique les dernières recherches semblent prouver que le gradient suit une loi plus au moins parabolique.

La quantité de chaleur qui traverse 1m<sup>2</sup> de paroi pendant l'unité de temps est :

$$Q = K(T_i - T_e) = \frac{1}{\frac{h_0}{C_b}}(t_i - t_e) = \frac{1}{\frac{1}{k_1}}(T_i - t_i) = \frac{1}{\frac{1}{k_2}}(t_e - T_e)$$

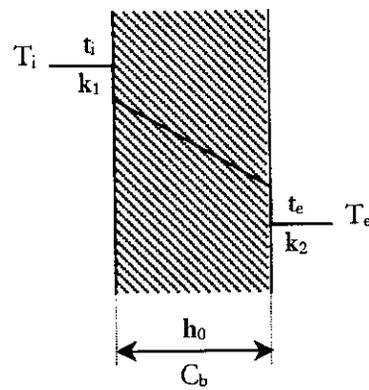


Figure 7.4 : calcul du gradient thermique.

où :

$T_i$  : température intérieure,

$T_e$  : température extérieure,

$t_i, t_e$  : températures sur les parois de l'ensemble,

$C_b$  : conductibilité thermique du béton ( $=1,7 \text{ kcal/m/m}^2 \text{ h } ^\circ\text{C}$ )

$h_0$  : épaisseur du matériau pris en considération en m,

$k_1$  : coefficient de transmission de la chaleur à la surface intérieure de l'ensemble(dépend de la température et de la vitesse du gaz),

$k_2 = 18 \text{ kcal/m}^2/\text{h}^\circ\text{C}$  : le coefficient de transmission de la chaleur à la surface extérieure de l'ensemble,

$K$  : conductibilité thermique de l'ensemble =

$$\frac{1}{\frac{h_0}{C_b} + \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2}}$$

Le gradient thermique du fût en béton armé, peut être évalué par la relation :

$$t = t_i - t_e = K \frac{h_0}{C_b} (T_i - T_e)$$

**Application :**

$h_0 = 25 \text{ cm}$        $C_b = 1.7 \text{ kcal/m/m}^2 \text{ h}^\circ\text{C}$

$k_1 = 45 \text{ kcal/m}^2 \text{ h}^\circ\text{C}$  (donné par l'abaque de la fig.C.4 M.Diver pour une vitesse de vapeur de 20 m/s)

$k_2 = 18 \text{ kcal/m}^2 \text{ h}^\circ\text{C}$

La conductibilité thermique de l'ensemble sera donc ;

$$K = 1/((0.25/1.7)+(1/45)+(1/18)) = 4.45 \text{ kcal/m}^2 \text{ h}^\circ\text{C}$$

Le gradient thermique ;

$$T_i = 55^\circ \quad T_e = 0^\circ (\text{cas extrême dans la nuit en saison d'hiver})$$

$$t = 4.45(0.25/1.7)(55-0) = 36^\circ$$

### 7.3.2 Moment d'origine thermique :

Le moment engendré par le gradient thermique dans le fût en béton armé dépend du diagramme des contraintes d'origine thermique  $K_t$ , considéré, pour une température donnée, comme une caractéristique de la section.

### 7.3.3 Pente du diagramme des contraintes :

Considérons un tronçon de la tour de hauteur  $l$ , limité par deux plans horizontaux, dont la température a subi un accroissement  $t_i$  sur la paroi intérieure et  $t_e$  sur la paroi extérieure ( $t_i > t_e$ ) (fig.75).

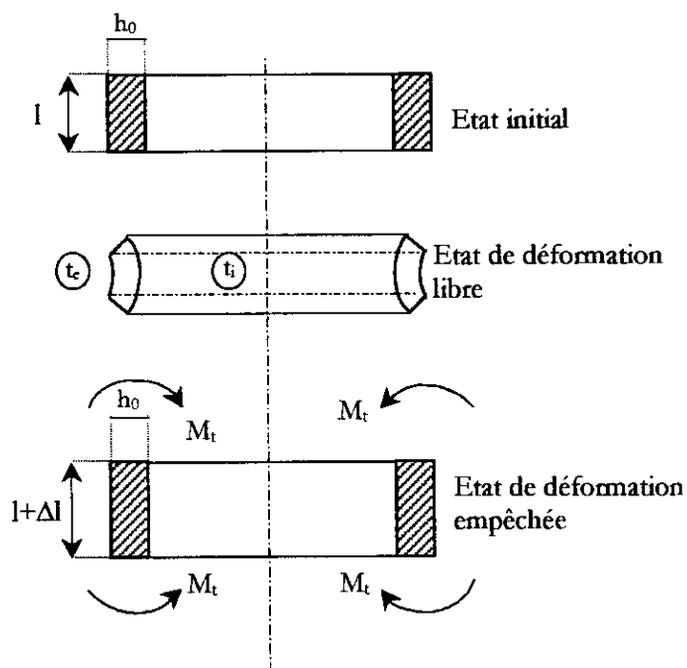


Figure 7.5: Gradient thermique.

La variation de température a pour effet de produire :

1. Un allongement uniforme du tronçon d'amplitude  $\Delta l$ , où :

$$\Delta l = \mu (t_i - t_e) l$$

$\mu$  désigne le coefficient de dilatation linéaire du béton ( $=10^{-5}$ ).

$$\mu = 10^{-5} \quad t = t_i - t_e = 36^\circ \quad l = 9.6 \text{ m}$$

$$\text{d'où :} \quad \Delta l = 3.46 \text{ mm}$$

2. Une déformation due à la différence de température  $t = t_i - t_e$ .

Cette déformation provoque une création des couples  $M_t$  sur tout le contour. Il en résulte une compression sur la face extérieure et une traction sur la face intérieure du fût.

Pour trouver la pente du diagramme des contraintes provoquées par le gradient thermique, on examine la variation de température dans la section (fig.7.6)

A la distance  $x$  de la face extérieure, la variation de température est :

$$t(x) = t \cdot x / h_0$$

La variation linéaire qui en résulte est :

$$\frac{\Delta l}{l}(x) = \mu \frac{tx}{h_0}$$

et les contraintes engendrées :

$$\sigma(x) = E_v \mu \frac{tx}{h_0}$$

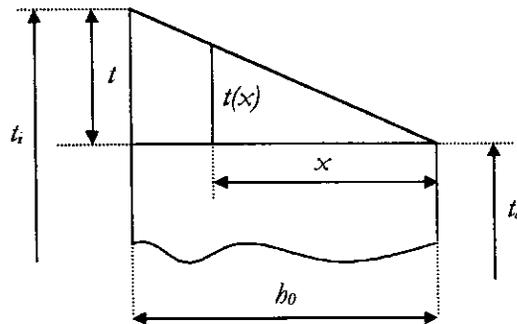


Figure 7.6 : Variation de la température dans la section.

Par dérivation on trouve la pente du diagramme des contraintes :

$$K_t = E_v \mu \frac{t}{h_0}$$

$E_v$  est le module d'élasticité du béton sous charge de longue durée.

$$E_v = 10043.35 \text{ Mpa} \quad \mu = 10^{-5} \quad t = 36^\circ \quad h_0 = 25 \text{ cm}$$

D'où :

$$K_t = 1.45 \text{ kg/cm}^3$$

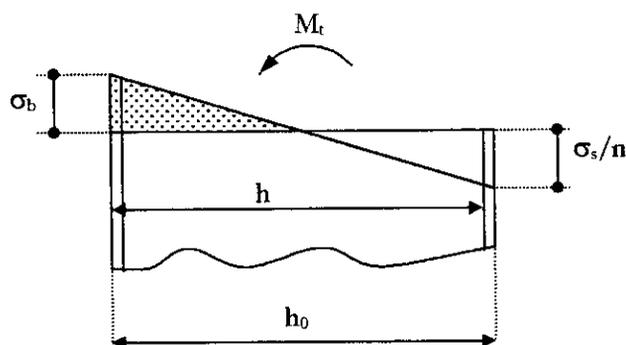


Figure 7.7: Diagramme des contraintes.

Le moment  $M_t$  dû à la différence de température provoque ;

- Pour une section partiellement comprimée (tendue), des compressions à l'extérieur et des tractions à l'intérieur du fût ;
- Pour une section entièrement tendue, une surtension dans le ferrailage intérieur et une détention dans le ferrailage extérieur ;
- Pour une section entièrement comprimée, une décompression de la partie de la section située vers l'intérieur et une surcompression de la partie de la section située vers l'extérieur du fût.

#### **7.4 CALCUL DES EFFORTS PAR LE SAP90 :**

La modélisation des différentes parties s'effectue à l'aide de l'élément fini de base SHELL (rectangulaire à 4 nœuds) (fig7.9) en rajoutant aux données nécessaires citées dans le chapitre parag.1.4, les propriétés suivantes [6]:

$$T = \langle \Delta t \rangle \quad TA = \langle \alpha \rangle$$

Avec :

- $\Delta t$  : gradient thermique,
- $\alpha$  : coefficient de dilatation thermique.

Dans le bloc COMBO nous utiliserons les combinaisons suivantes :

- **A PELU :**

Les coefficients de majorations pour les différents cas sont cités dans l'article A.3.3,21 des BAEL91[9].

$$\begin{aligned}
 & 1.35G + 1.5Q + 1.2W \\
 & 1.35G \\
 & 1.35G' + 1.5Q \\
 & 1.35G + 1.5Q + 1.2W
 \end{aligned}$$

- **APELS :**

$$\begin{aligned}
 & G + Q + W \\
 & G \\
 & G' + Q \\
 & G' + Q + W
 \end{aligned}$$

Où : G : charges permanentes (poids propre, température),  
 G' : charge permanente (poids propre),  
 Q : charges d'exploitation,  
 W : action du vent.

#### 7.4.1 Interprétation :

D'après les résultats obtenus par le SAP90, la section du béton dans les voiles 1,2 et 3 est toujours entièrement comprimée pour toutes les combinaisons citées précédemment (fig7.11). Les moments créés par la température, dans notre cas sont faibles et provoquent une faible décompression de la partie intérieure du voile et une légère surcompression de la partie extérieure.

### 7.5 CALCUL DES ARMATURES

#### 7.5.1 Armatures verticales :

L'effort normal dans la section du béton est :

- **Voile 1 :**

$$N = 660 \text{ kN}$$

Pour une largeur  $b = 1\text{m}$  et  $e = 25\text{ cm}$  ;

La contrainte de compression du béton est :

$$\sigma_b = \frac{N}{A} = \frac{660 \times 10^{-3}}{0.25 \times 1} = 2.64 \text{ Mpa} < \bar{\sigma}_b = 12 \text{ Mpa}$$

- **Voile 2(3) :**

$$N = 1320 \text{ kN}$$

$$\sigma_b = \frac{N}{A} = \frac{1320 \times 10^{-3}}{0.25 \times 1} = 5.28 \text{ Mpa} < \bar{\sigma}_b = 12 \text{ Mpa}$$

De ces résultats on conclut que le béton peut reprendre seul les efforts de compression. Dans ce cas on mettra un ferrailage constructif de manière à assurer un pourcentage minimal d'armature pour le béton, la condition de non-fragilité fixe la section d'armature «  $A_s$  » ;

$$A_s \geq \frac{B \times f_{t28}}{f_e}$$

$$f_{t28} = 1.8 \text{ Mpa}$$

$$f_e = 400 \text{ Mpa}$$

$$A_s \geq \frac{0.25 \times 1 \times 1.8}{400} = 11.25 \text{ cm}^2$$

$$A_{s_{\min}} = 11.25 \text{ cm}^2 \quad , \quad \text{soit } 10\text{HA}12/\text{ml}$$

Donc :  $A_s = 5\text{HA}12/\text{ml}/\text{face}$

$$s = 20 \text{ cm}$$

### 7.5.2 Armatures horizontales :

- **Voile 1 :**

L'effort tranchant dans les deux directions est :

$$T_r = 68.25 \text{ kN}$$

$$T_l = 33.01 \text{ kN}$$

La contrainte de cisaillement doit vérifier [3] (4.3.2.1),:

$$\tau_b = \frac{1.4T}{z \times b} \leq \bar{\tau}_b$$

Avec :

$$z = 0.8h$$

AN :  $b = 1\text{m}$        $h = 14.35\text{m}$

$$\tau_b = \frac{1.4 \times 101.65 \times 10^{-3}}{0.8 \times 14.35 \times 0.25} = 0.05 \text{ Mpa} < \bar{\tau}_b = 2 \text{ Mpa}$$

• **Voile 2(3) :**

$T_t = 104.722 \text{ kN}$        $h = 8.5\text{m}$

$$\tau_b = \frac{1.4 \times 104.722 \times 10^{-3}}{0.8 \times 8.5 \times 0.25} = 0.086 \text{ Mpa} < \bar{\tau}_b = 2 \text{ Mpa}$$

On remarque que dans les deux cas la contrainte de cisaillement est inférieure à la contrainte admissible. Nous utiliserons donc, un ferrailage minimum donné par les RPA88 :

$$0.025 f_{c28} = 0.5 \text{ Mpa} > \tau_b$$

avec :  $f_{c28} = 20 \text{ Mpa}$

$A_h = 0.15 \%$  de la section cisailée

On trouve  $A_h = 3.75 \text{ cm}^2/\text{ml} \Rightarrow A_h = 1.875 \text{ cm}^2/\text{ml}/\text{face}$

Soit :  $5\phi 10/\text{ml}/\text{face}$ .

L'espacement 's' doit vérifier :

$$s \leq \min \{1.5e; 30 \text{ cm}\}$$

Soit  $s = 20 \text{ cm}$ .

### 7.6 SCHEMA DE FERRAILLAGE

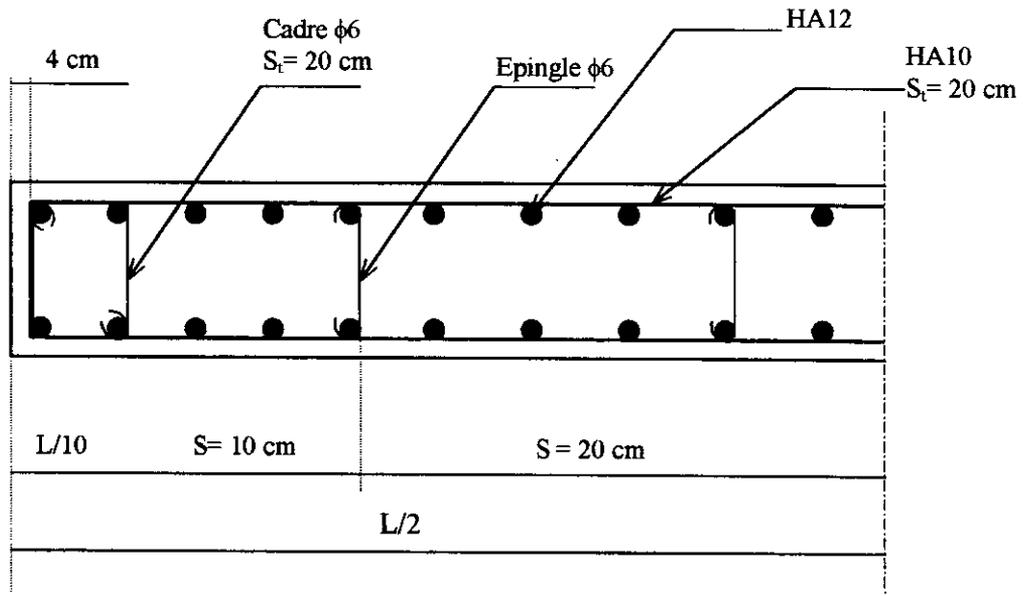


Figure 7.8: Ferrailage des voiles.

Au niveau des voiles 1, 2 et 3, on rajoute des poteaux (noyés) afin de rigidifier la jonction voiles-poutres croisées sur lesquelles repose l'hélice.

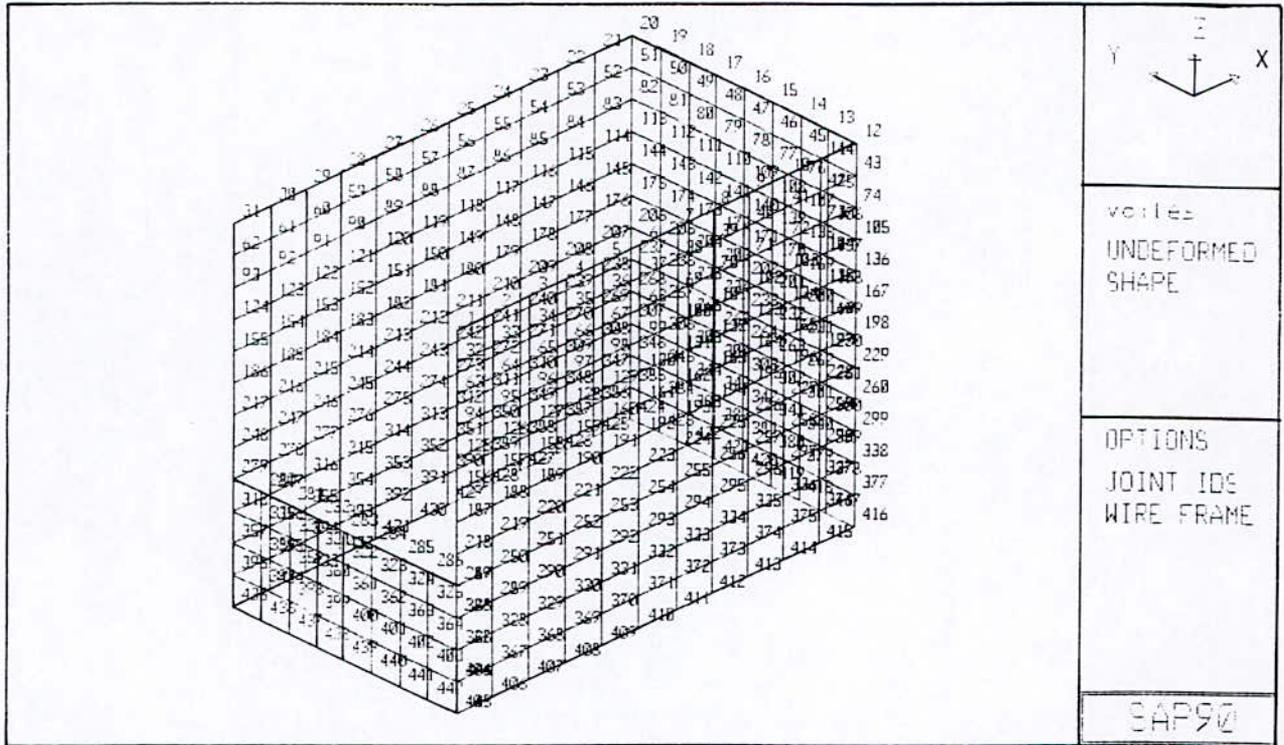


Figure 7.9 : Les nœuds.

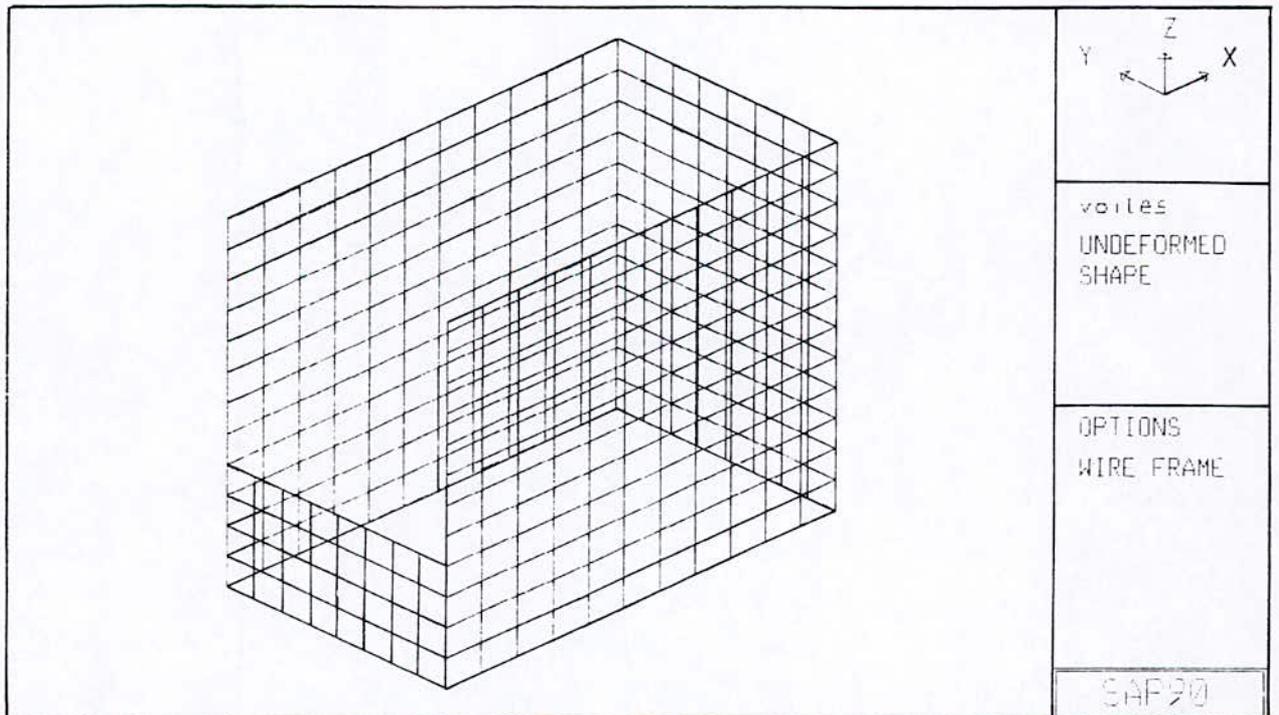


Figure 7.10 : Forme indéformée des voiles.

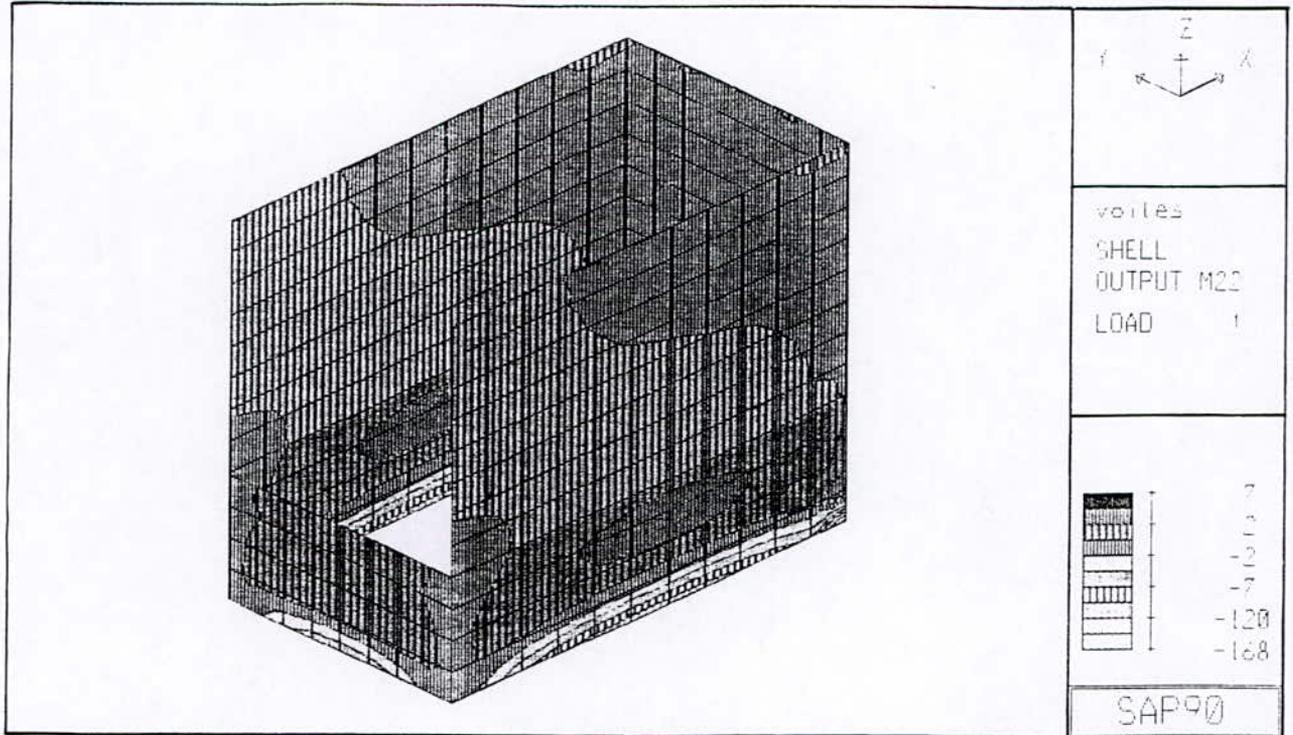


Figure 7.11 : Diagramme des moments.

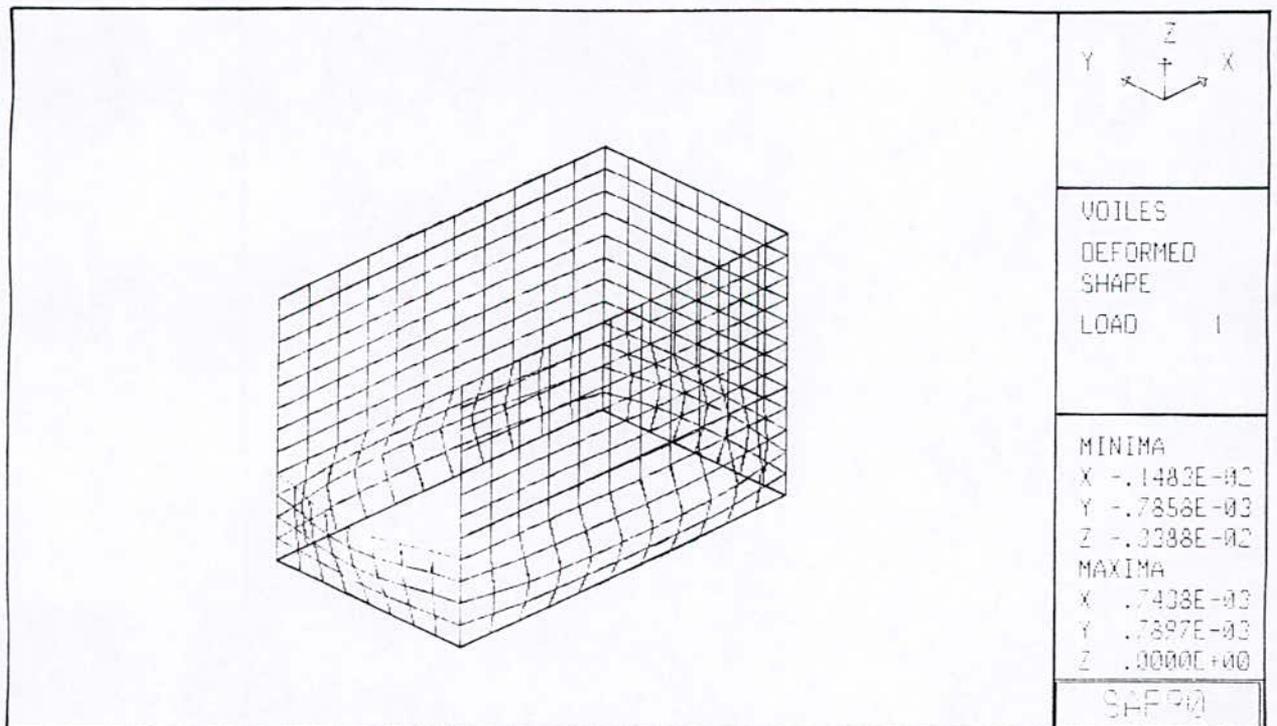


Figure 7.12 : Déformée des voiles.

# CHAPITRE VIII

---

---

## CALCUL DU BASSIN

---

---

*« L'imagination est plus importante que la connaissance. »*

*Einstein*

## CHAPITRE VIII CALCUL DU BASSIN

### 8.1 INTRODUCTION

Le bassin de réception d'eau refroidie placé sous le réfrigérant est rectangulaire, posé sur le sol.

Ses dimensions sont ;

- longueur :	14.35 m
- largeur :	8.50 m
- hauteur :	4.80m
- épaisseur des parois :	0.30m

Le niveau d'eau dans ce bassin est réglé par un trop-plein relié à l'égout. Ce niveau se situe normalement à au moins 0.25 m en dessous du bord. Le bassin doit être réalisé avec soin et les problèmes d'étanchéité sont toujours délicats à résoudre. L'addition d'un produit hydrofuge est recommandée dans le béton et l'étanchéité sera parfaite par un enduit de mortier ou mieux par une peinture bitumineuse passée après séchage du béton.

### 8.2 CALCUL DES PAROIS

#### 8.2.1 Action de l'eau : [13]

L'action  $Q$  exercée par l'eau sur les parois du bassin, en fonction de la hauteur  $h$  est donnée par :

$$Q = \frac{\rho \times h^2}{2}$$

$\rho$  : poids volumique de l'eau

$$\rho = 10 \text{ kN/m}^3$$

Pour  $h = 4.8 \text{ m}$  et une largeur de 1 m ;

$$Q = 10 \times 4.8^2 / 2 = 115.2 \text{ kN}$$

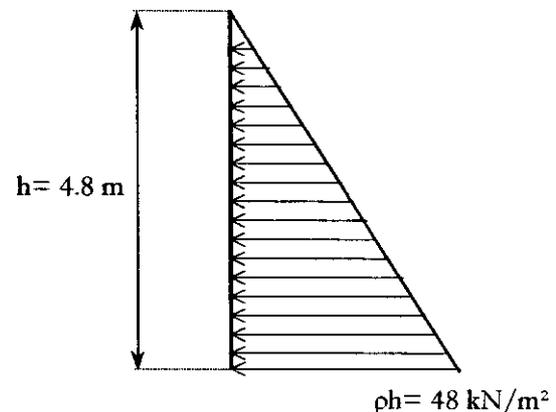


Figure 8.1 : Action de l'eau.

### 8.2.1 Calcul de la paroi :

On effectuera le calcul par mètre de paroi en la considérant encastree à la base dans le radier.

D'après le diagramme des moments représenté dans le chapitre précédent (fig.7.12), la section dangereuse se situe au niveau de l'encastrement (jonction parois-radier).

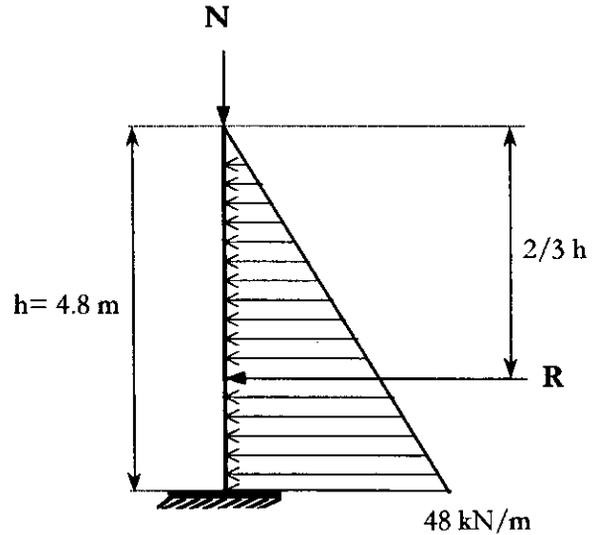


Figure 8.2 : Sollicitations d'ensemble.

#### 8.2.2.1 Calcul à P.E.L.U :

Les sollicitations revenant à une bande de 1m de largeur sont :

$$\begin{cases} N_u = 130 \text{ kN} \\ M_u = 250 \text{ kN.m} \end{cases}$$

Le calcul de la section d'armature s'effectue en flexion composée[8].

$$e = M/N = 1.92 \text{ m} \quad b = 0.3 \text{ m} \quad d = 0.26 \text{ m} \quad d' = 0.04 \text{ m}$$

$$e_{As} = 1.92 + 0.3/2 - 0.04 = 2.03 \text{ m}$$

La section du béton étant partiellement comprimée  $\Rightarrow$  calcul par assimilation à la flexion simple ;

$$M_{uA} = 264 \text{ kN.m}$$

$$A_{sc} = \frac{M_u - M_{lu}}{\sigma_{sce} (d - d')}$$

$$A_s = \left( \frac{M_{lu}}{Z_{bl} \times f_{su}} + A_{sc} \frac{\sigma_{sce}}{f_{su}} \right) - \frac{N_u}{f_{su}}$$

A.N :

$$\begin{cases} A_{sc} = 9.82 \text{ cm}^2 \\ A_s = 31.85 \text{ cm}^2 \end{cases}$$

8.2.2.2 Calcul à l'E.L.S :

$$\begin{cases} N_{ser} = 96.29 \text{ kN} \\ M_{ser} = 185.19 \text{ kN.m} \end{cases}$$

$$e_{As} = 2.03 \text{ m}$$

$$M_{ser,A} = 195.47 \text{ kN.m}$$

$$A_{sc,ser} = \frac{M_{ser} - M_{lser}}{\sigma_{sc,ser} (d - d')}$$

$$A_{s,ser} = \left( \frac{M_{lser}}{Z_{bl} \times \sigma_{s,ser}} + A_{sc,ser} \frac{\sigma_{sc,ser}}{\sigma_{s,ser}} \right) - \frac{N_{ser}}{\bar{\sigma}_s}$$

A.N :

$$\begin{cases} A_{sc,ser} = 11.63 \text{ cm}^2 \\ A_s = 38.8 \text{ cm}^2 \end{cases}$$

Soit

$$A_s \longrightarrow 8\text{HA}25 \quad s=12.5 \text{ cm}$$

$$A_{sc} \longrightarrow 8\text{HA}14 \quad s=12.5 \text{ cm}$$

8.2.3 Vérification au cisaillement :

$$T = 155.52 \text{ kN}$$

$$\tau = \frac{T}{b_0 d} = 0.60 \text{ Mpa} < \bar{\tau}_b = 2 \text{ Mpa}$$

$$s_t \leq \min \{40 \text{ cm}, 0.9d\} = 23.4 \text{ cm}$$

La justification vis a vis de l'E.L.U s'exprime par la relation ;

$$\frac{A_{st}}{b \times s_t} \geq \frac{\tau_u - 0.3f_y \times k}{0.9f_{su}} \quad k=0 \text{ (fissuration très préjudiciable)}$$

$$A_{st} \geq \frac{b \times s_t \times \tau_u}{0.9f_{su}}$$

$$A_{st} \geq \frac{1 \times 0.2 \times 0.6}{0.9 \times 348} = 3.83 \text{ cm}^2 \quad \text{Soit : } 5\text{HA}10/\text{ml} \quad S_t=20 \text{ cm}$$

8.2.4 Schéma de ferrailage :

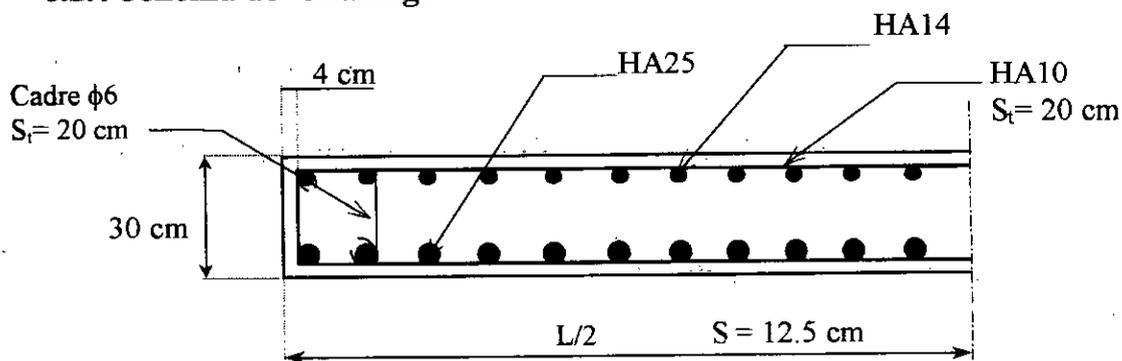


Figure 8.3: Ferrailage des parois.

### 8.3.2 Dimensionnement du radier :

Le radier fonctionne comme un plancher renversé dont les appuis sont constitués par les parois d'extrémités du bassin et qui est soumis à la réaction du sol diminuée du poids propre du radier et celui de l'eau.[13]

La modélisation et le calcul du radier s'effectuent comme celui des dalles calculées dans le chapitre V, avec une épaisseur de 60 cm, soumis à une charge uniformément répartie dirigée vers le haut.

Pour  $b = 1 \text{ m}$   $h = 60 \text{ cm}$   $d = 56 \text{ cm}$   $d' = 4 \text{ cm}$ ,

Les moments max. en travée et en appuis sont résumés dans le tableau ci-dessous ;

Eléments	Nœuds	Etat Limite Ultime		Etat Limite de Service	
		$M_x$ [kN.m]	$M_y$ [kN.m]	$M_x$ [kN.m]	$M_y$ [kN.m]
9-10-93-94	10-114	-143.67	-145.623	-106.421	-117.870
45-46-57-58	62	195.82	324.046	144.948	221.918

**Tableau 8.1 :** Moments max. en travées et appuis du radier.

Remarque :

- Suivant x  $\rightarrow$  grande portée
- Suivant y  $\rightarrow$  petite portée

### 8.3.3 Calcul des armatures :

Les sections d'armatures pour les différents cas, sont représentées dans le tableau ci-dessous ;

Etat Limite Ultime		Etat Limite de Service		
Moments [kN.m]	$A_u$ [cm <sup>2</sup> ]	Moments [kN.m]	$A_{ser}$ [cm <sup>2</sup> ]	$\sigma_b$ [Mpa]
-143.67	7.537.53	-106.421	11.65	3.37
195.82	10.34	144.948	16.05	5.33
-145.623	7.64	-117.870	12.16	4.19
324.046	17.47	221.918	25.09	5.33

**Tableau 8.2 :** Sections d'armatures du radier.

• **Choix du ferrailage :**

- sens x :

nappe inférieure 8HA14/ml s= 12 cm  
 nappe supérieure 8HA16/ml s= 12 cm.

- sens y :

nappe inférieure 8HA14/ml s= 12 cm  
 nappe supérieure 8HA20/ml s= 12 cm.

**8.3.4 Vérification au poinçonnement :**

On admet qu'aucune armature particulière n'est nécessaire si la condition suivante est satisfaite [BAEL83 art.5.2,4] :

$$Q_u \leq 0.045 U_c h f_{c28}$$

Avec ;

$Q_u$ : charge de calcul (à l'ELU)

$U_c$ : périmètre du contour de l'aire S sur laquelle agit la charge dans le feuillet moyen.

Pour  $h = 60$  cm       $f_{c28} = 20$  MPa

$Q_u = 141.66$  kN (charge à la base d'un poteau central)

$$\begin{cases} U = U_0 + h & U_0 = 30 \text{ cm} \\ V = V_0 + h & V_0 = 53 \text{ cm} \end{cases}$$

$$\begin{cases} U = 90 \text{ cm} \\ V = 113 \text{ cm} \end{cases} \Rightarrow U_c = 2(0.9 + 1.13) = 4.06 \text{ m}$$

$$0.045 \times 4.06 \times 0.6 \times 20 \times 10^6 = 2192.4 \text{ kN}$$

$$Q_u = 141.66 \text{ kN} < 2192.4 \text{ kN} \Rightarrow \text{vérifié.}$$

Aucune armature particulière n'est requise.

8.3.5 Schéma de ferrailage :

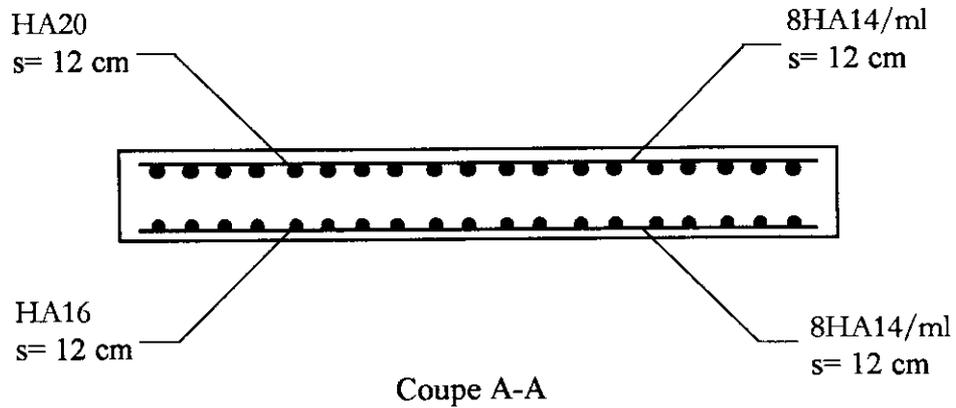
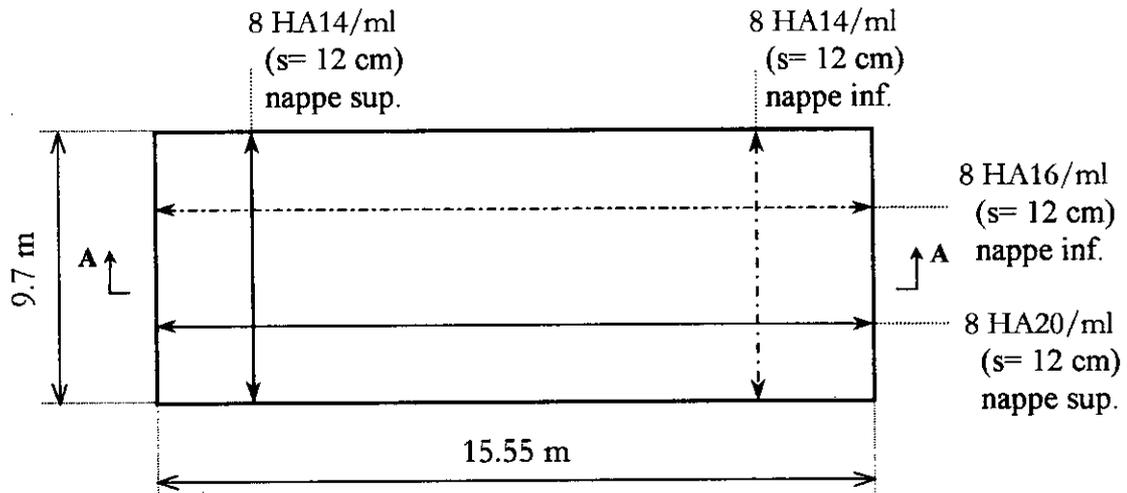


Figure 8.4 : Ferrailage du radier.

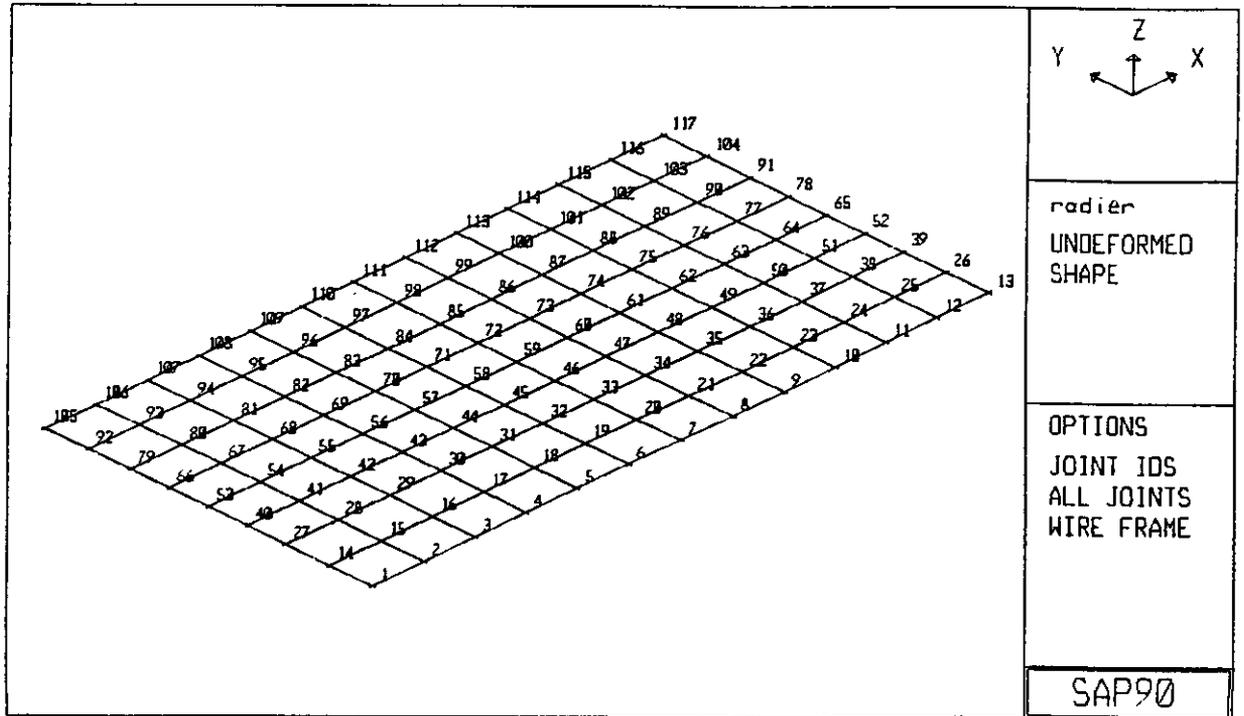


Figure 8.5 : Les nœuds.

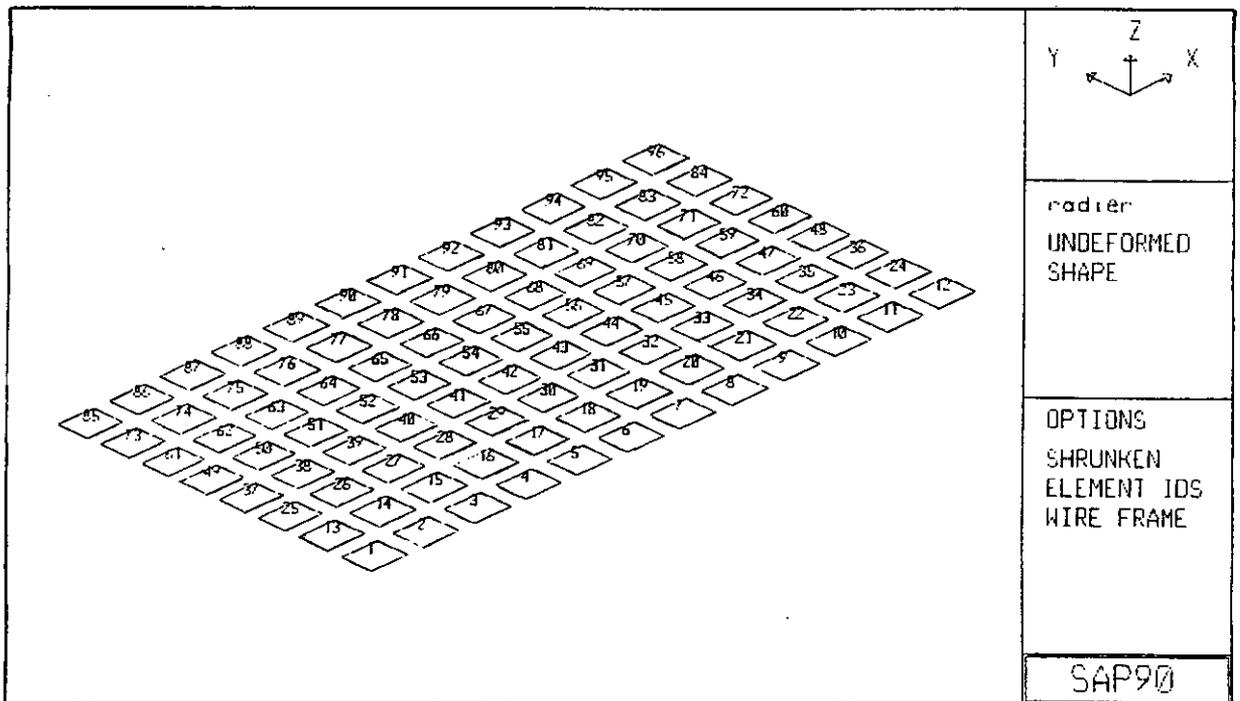


Figure 8.6 : Les éléments.

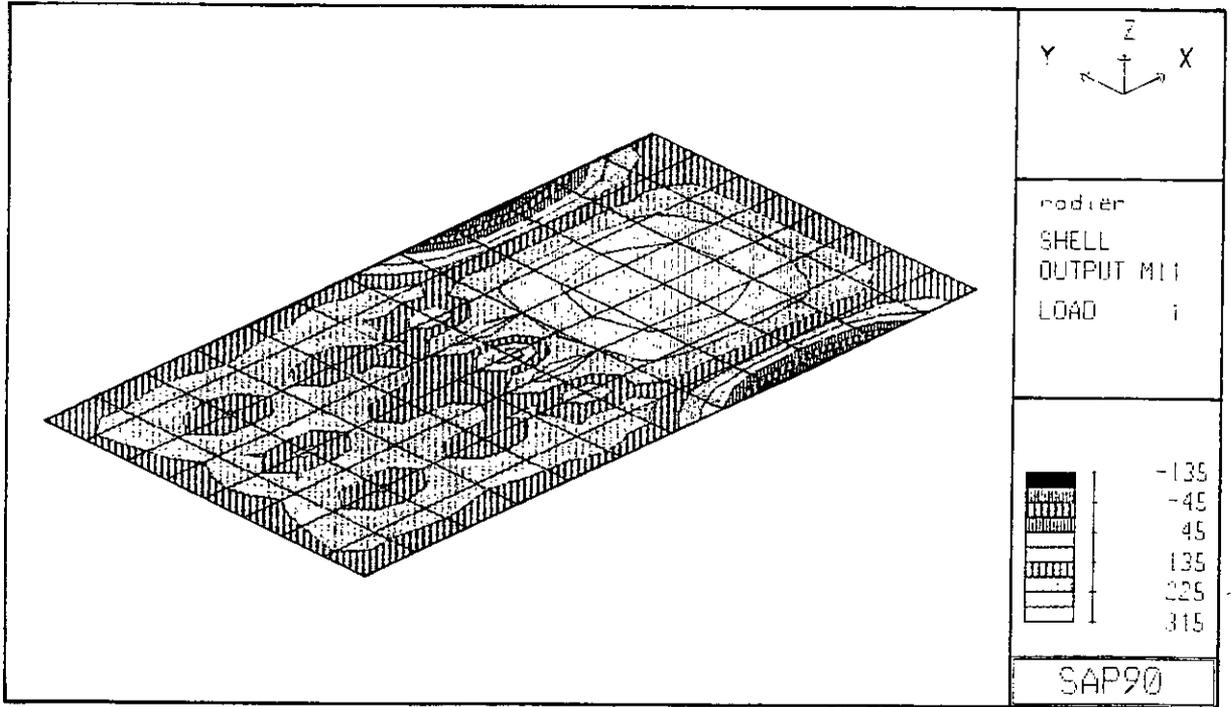


Figure 8.7 : Diagramme des moments.

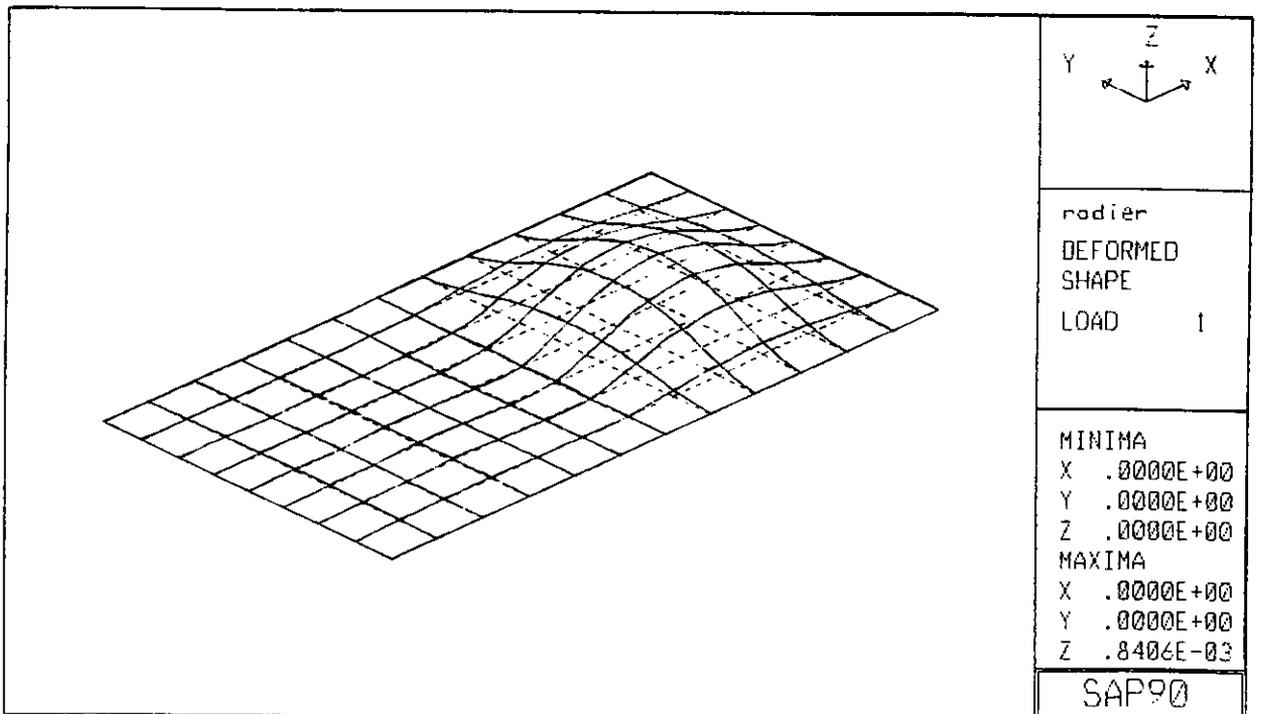


Figure 8.8 : Déformée du radier.

# CHAPITRE IX

---

---

## ***CALCUL DES PORTIQUES***

---

---

*« Ce n'est pas parce que les choses sont difficiles qu'on n'ose pas mais,  
parce qu'on n'ose pas que les choses sont difficiles. »*

## CHAPITRE IX CALCUL DES PORTIQUES

Les portiques du réfrigérant sont destinés à reprendre uniquement les charges verticales. Les sections des poutres sont identiques, ainsi que celles des poteaux.

Le chargement extérieur revenant aux portiques diffère selon leurs positions. Ils sont de deux types :

- *Portique extérieur* ; encasté dans la paroi du bassin. Il supporte la charge uniformément répartie, venant de la dalle I. (fig.9.2)
- *Portiques intérieurs* ; encastés dans le radier. Leur rôle est de reprendre uniquement les charges concentrées à chaque niveau, dues à la réaction des poutrelles supportant les lattes en bois. (fig.9.4)

### 9.1 MODELISATION

Pour la modélisation des portiques (poteaux-poutres), nous utiliserons l'élément fini de base FRAME défini dans le chapitre IV,4.2.

Afin d'établir un fichier de données correct, on définit les propriétés, l'emplacement et le chargement associés à cet élément : [6]

#### FRAME

NM= <npro>                      NL= <nbsl>                      Z== <z<sub>1</sub>,...,z<sub>n</sub>>

<np> A= <a> J= <j> I= <i<sub>33</sub>,i<sub>22</sub>> E= <e> G= <g> W= <w> M= <m>

<ns> WG= <w<sub>x</sub>,w<sub>y</sub>,w<sub>z</sub>>                      PLD= <d<sub>1</sub>,p<sub>1</sub>,f<sub>1</sub>,d<sub>2</sub>,p<sub>2</sub>,f<sub>2</sub>>

<nel> <ni> <nf> M= <pm<sub>i</sub>,pm<sub>f</sub>> Lp= <n<sub>1</sub>,n<sub>2</sub>>                      NSL= <l<sub>1</sub>,...,l<sub>nl</sub>>  
G= <ng,ninc,g<sub>1</sub>,g<sub>2</sub>>

Avec :

- *Information de contrôle* ;

npro : nombre total de types de propriétés des sections,

nbsl : nombre de cas de charges,

pour introduire l'effet du poids propre,

z<sub>i</sub> : coefficient multiplicateur gravitationnel selon Z,

np : numéro d'identification de la propriété,

a : aire de la section,

j : moment d'inertie polaire ou de torsion,

$i_{33}, i_{22}$  : moments d'inerties par rapport aux directions 1 et 2 dans le repère local,  
 $e$  : module d'élasticité longitudinale,  
 $g$  : module d'élasticité transversale,  
 $w$  : poids par unité de longueur,  
 $m$  : masse par unité de longueur.

• *Définition du type de chargements ;*

$ns$  : numéro spécifiant le type de chargement,  
 $w_{x,y,z}$  : charge uniforme (force/longueur) selon les axes X,Y et Z,  
 $d_{1,2,..}$  : distance de  $i$  pour localiser  $p_1(p_{2,..})$  ou  $f_1(f_{2,..})$ ,  
 $p_{1,2,..}$  : charges concentrées suivant la direction 2,  
 $f_{1,2,..}$  : charges concentrées suivant la direction 3.

• *Emplacement des éléments ;*

$nel$  : numéro d'identification de l'élément,  
 $ni,nf$  : numéros des nœuds initial et final,  
 $p_{mi}(f)$  : numéros de la propriété mécanique pour le nœud  $i(f)$ ,  
 $n_1,n_2$  : chiffres indiquant la direction des axes locaux,  
 $l_1,..$  : numéro du type de chargement préalablement défini,  
 $ng$  : nombre d'éléments additionnels identiques à générer,  
 $ninc$  : incrément de numérotation des éléments générés,  
 $g_{1(2)}$  : incrément pour le nœud initial  $i$  (final  $f$ ).

Les résultats du SAP90 montrent que les efforts dans les poteaux du portique extérieur (I) et dans les poutres du portique intérieur (II) sont faibles. La détermination du ferrailage a été effectuée pour les éléments les plus chargés (poutres du portique I et poteaux du portique II). Ce ferrailage est adopté pour tous les éléments.

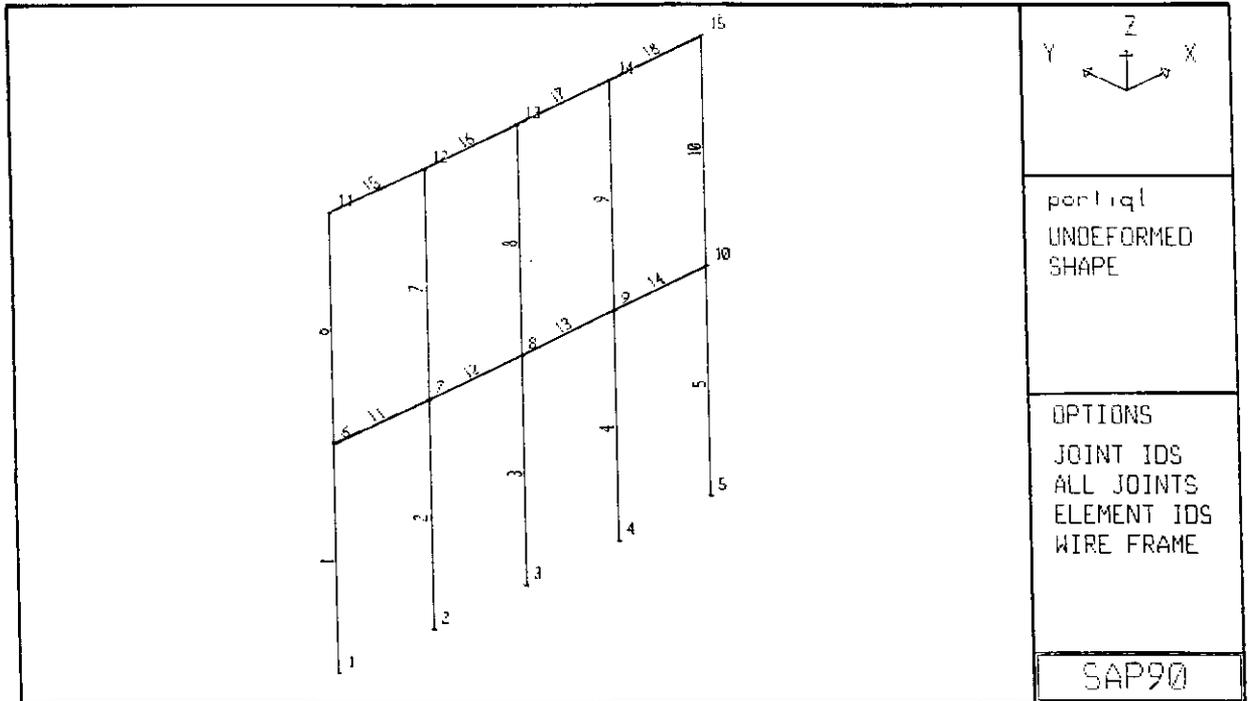


Figure 9.1 : Portique extérieur.

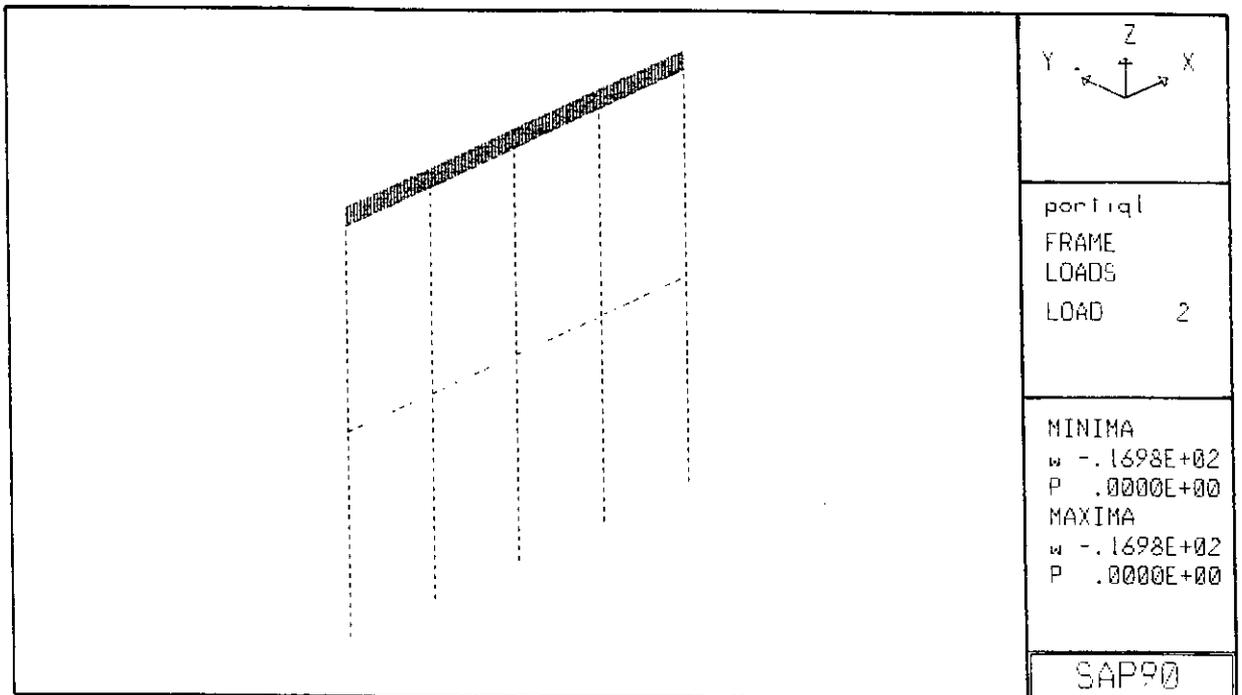


Figure 9.2 : Chargement extérieur.

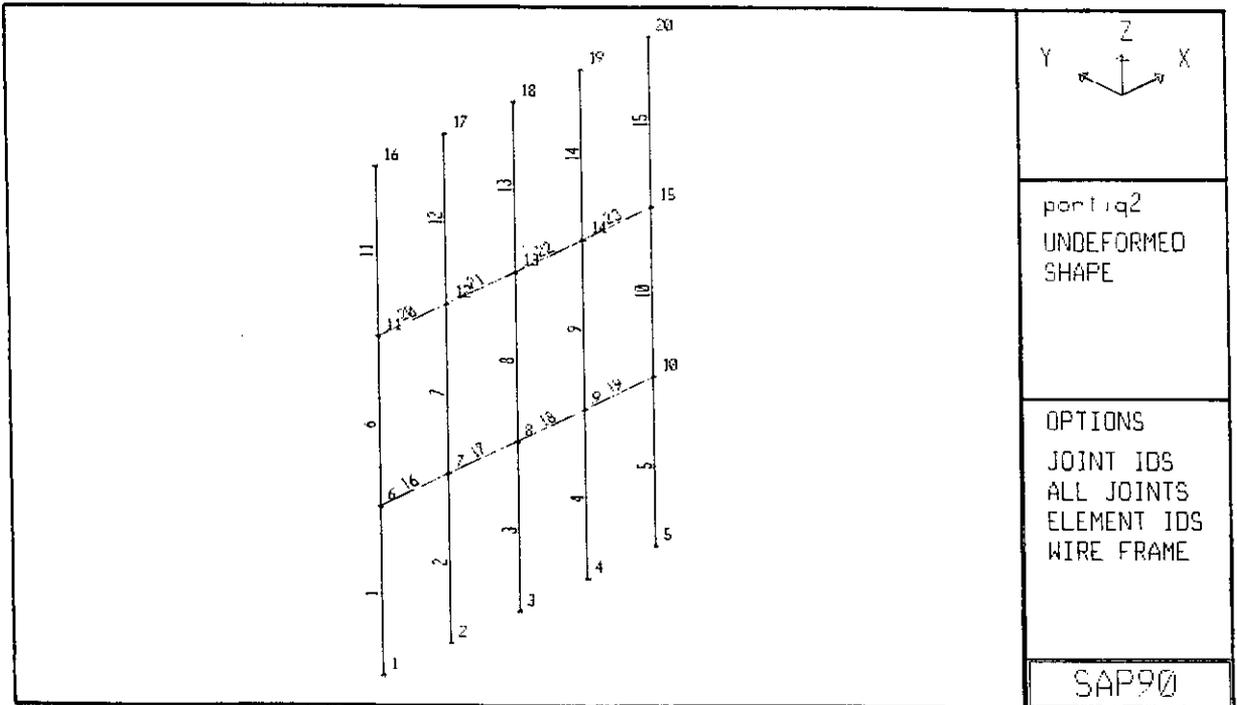


Figure 9.3 : Portique intérieur.

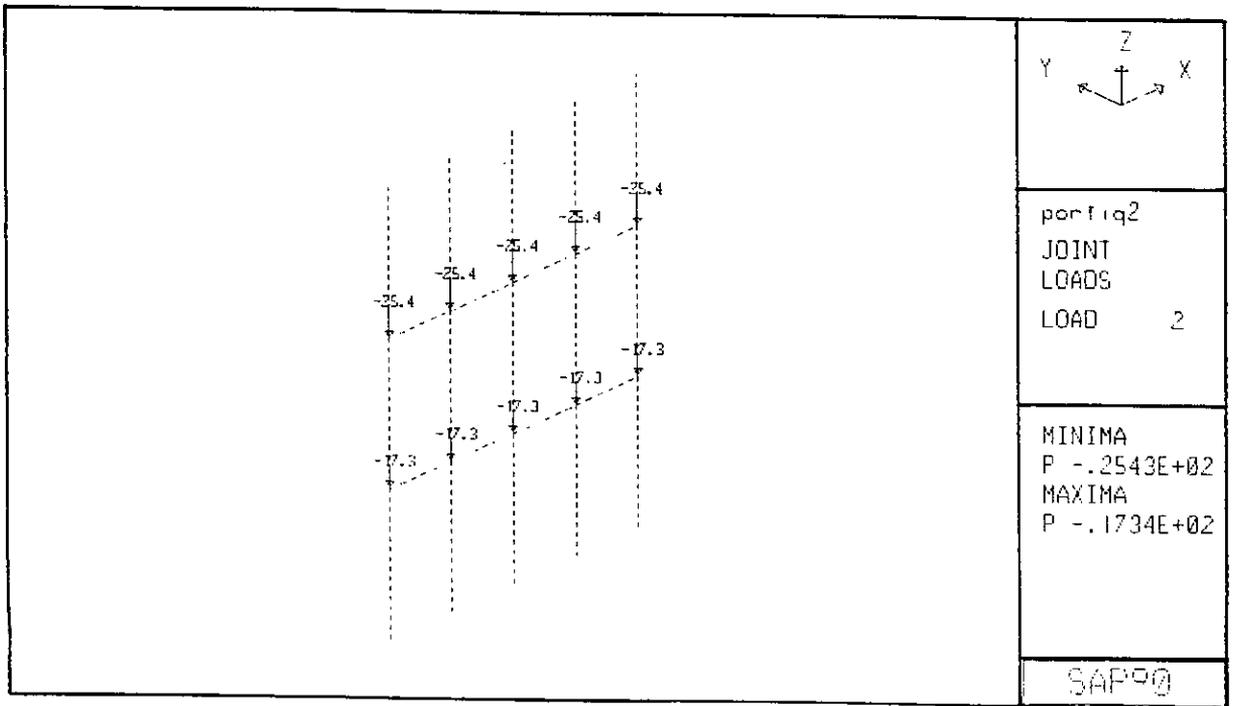


Figure 9.4 : Chargement extérieur.

## 9.2 CALCUL DES POUTRES

Les moments max. en travées et en appuis sont aux niveaux des éléments 15,16,17 et 18.

### 9.2.1 Calcul à l'E.L.U :

A mi-travée  $M_{\max} = 3.6 \text{ kN.m}$   
 $\mu_{bu} = 0.22 < \mu_{lu} = 0.3$   
 $A_{su} = 0.47 \text{ cm}^2$

En appuis  $M_{\max} = -7.2 \text{ kN.m}$   
 $\mu_{bu} = 0.056 < \mu_{lu}$   
 $A_{su} = 0.96 \text{ cm}^2$

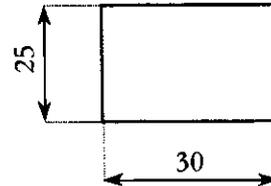


Figure 9.5 : poutre  $Q_1$

### 9.2.1 Calcul à l'E.L.S :

A mi-travée  $M_{\max} = 2.67 \text{ kN.m}$   
 $\mu_{ser} = 0.015 < \mu_{lu}$   
 $A_{s,ser} = 0.73 \text{ cm}^2$

En appuis  $M_{\max} = -5.33 \text{ kN.m}$   
 $\mu_{ser} = 0.031 < \mu_{lu}$   
 $A_{s,ser} = 1.5 \text{ cm}^2$

### 9.2.3 Vérification du ferrailage minimal :

- Condition de non-fragilité du béton

$$A_{\min} \geq 0.23 b_0 d f_{t28}/f_c$$

$$A_{\min} \geq 0.23 \times 0.3 \times 0.22 \times 1.8 / 400 = 0.68 \text{ cm}^2$$

### 9.2.3 Vérification à l'effort tranchant :

$$V_u = 23.44 \text{ kN}$$

$$\tau_u = \frac{V_u}{b_0 d} = 0.31 \text{ Mpa} < \bar{\tau}_b = 2 \text{ Mpa}$$

$$\phi_t \leq \min (h/35, \phi, b/10) = 0.7 \text{ cm}$$

$$\text{soit } A_t = 0.57 \text{ cm}^2 \quad 1 \text{ cadre } \phi 6$$

l'espacement  $s_t$  ;

- en zone nodale  $s_t \leq \min (h/4, 12\phi) = 6.25 \text{ cm}$   
 $s_t = 6 \text{ cm}$  sur une longueur de 36 cm

- en zone courante  $s_t \leq h/2 = 12.5 \text{ cm}$   $s_t = 10 \text{ cm}$ .

### 9.3 CALCUL DES POTEAUX

L'effort normal max. est celui revenant aux poteaux de base n° 2,3 et 4.

#### 9.3.1 Etude de la compression simple à l'E.L.U :

L'étude des poteaux en compression simple se fait uniquement à l'E.L.U. Les règles BAEL apportent à l'équation d'équilibre de base certaines corrections.

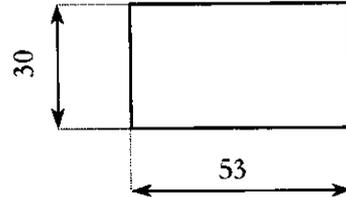


Figure 9.6 : poteau P<sub>1</sub>

#### a- Longueur de flambement :

$$l_f = 0.7 l_0$$

$$l_0 = 4.55 \text{ m} \quad \Rightarrow \quad l_f = 3.20 \text{ m}$$

#### b- L'élanement :

$$\lambda = \frac{l_f}{i} \quad i = \sqrt{\frac{I}{A_b}} \quad \text{avec} \quad A_b = b \times h \quad I = \frac{bh^3}{12}$$

$$\Rightarrow \lambda = 3.46 \frac{l_f}{h} = 20.89$$

#### c- Section réduite du béton :

$$A_{br} = (b - 2)(h - 2)$$

$$= (30 - 2)(53 - 2) = 1428 \text{ cm}^2$$

#### d- Armatures longitudinales :

On admet que  $\sigma_s = f_{su}$

La section d'armature longitudinale est donnée par l'inégalité suivante :

$$A_s \geq \frac{1}{0.85 f_{su}} \left[ \beta N_u - \frac{A_{br} \times f_{bu}}{0.9} \right]$$

pour  $j > 90$  jours

$$\beta = 1 + 0.2 \left( \frac{\lambda}{35} \right)^2 \quad \lambda \leq 50$$

Application :

$$\lambda = 20.89 < 50 \quad \Rightarrow \quad \beta = 1.071$$

$$N_u = 117.25 \text{ kN}$$

$$A_s < 0$$

$$A_{s,\min} = \max [4U(m), 0.2\% A_b(\text{cm}^2)]$$

$$\begin{cases} U(\text{perimètre}) = 1.66 \text{ m} \\ A_b = 1590 \text{ cm}^2 \end{cases} \quad \Rightarrow \quad A_{\min} = 6.64 \text{ cm}^2$$

e- *Armatures transversales :*

$$\phi_t = 1/3 \phi_l$$

$$\text{soit } \phi_t = 6 \text{ mm}$$

$$s_t \leq \min (15\phi_l, 40 \text{ cm}, a+10 [\text{cm}])$$

$$\leq 18 \text{ cm}$$

$$\text{soit } s_t = 15 \text{ cm.}$$

### 9.3.2 Vérification des contraintes à l'E.L.S :

- *Contrainte du béton ;*

$$\begin{aligned} \sigma_b &= \frac{N_{ser}}{A_{br} + n A_s} \\ &= \frac{86.8}{1428 + 15 \times 12.32} = 5.4 \text{ Mpa} < \bar{\sigma}_b = 12 \text{ Mpa} \end{aligned}$$

- *Contrainte des aciers ;*

$$\begin{aligned} \sigma_s &= n \sigma_b \\ &= 81 \text{ Mpa} < \bar{\sigma}_s = 176 \text{ Mpa} \end{aligned}$$

**9.4 SCHEMAS DE FERRAILLAGES**

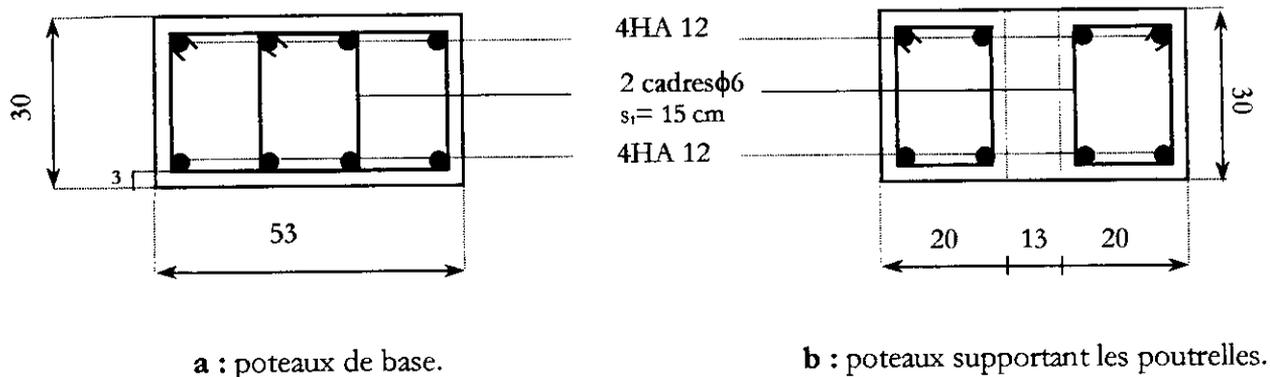


Figure 9.7 : Ferrailages des poteaux  $P_1$

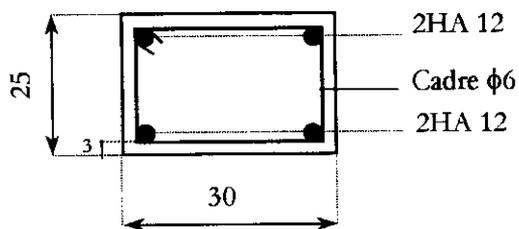


Figure 9.8 : Ferrailage des poutres ( $Q_1$ )

# CHAPITRE X

---

---

## ***CALCUL DES POUTRES***

---

---

*« Ceux qui ont amassé tant de connaissance, qui nous ont conduits vers le savoir, ne sont-ils pas noyés eux-mêmes dans le doute ? »*

**O. Rhayyam**

---

**CHAPITRE X**  
**CALCUL DES POUTRES**

---

Les différentes poutres qui constituent le réfrigérant, de sections différentes, possèdent la même portée (8.25 m). La forme de leur section droite est adaptée au rôle prévu, qui dépend de leur position dans la structure.

- Poutres Q<sub>2</sub> et Q<sub>3</sub> : supportent les panneaux séparateurs de gouttelettes d'une part, et les dalles permettant l'accès à l'intérieur de la tour dans sa partie supérieure.
- Poutre Q<sub>4</sub> : possède deux décrochements permettant de maintenir les panneaux séparateurs (inférieur et supérieur).
- Poutre Q<sub>5</sub> : de forme en té, permet l'accès au premier niveau (au-dessus du bassin) et contient des trous pour l'évacuation de l'eau récupérée de la vapeur sur les panneaux.
- Poutres Q<sub>6</sub> Q<sub>7</sub> Q<sub>8</sub> : supportent le moteur, le réducteur et l'hélice, situées au-dessous de la dalle avec ouvertures.

### **10.1 FERRAILLAGES DES POUTRES**

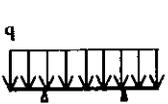
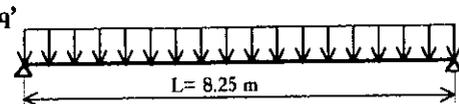
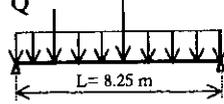
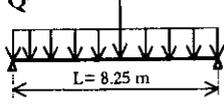
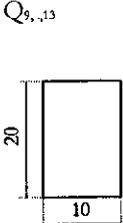
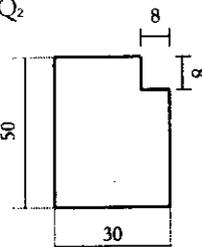
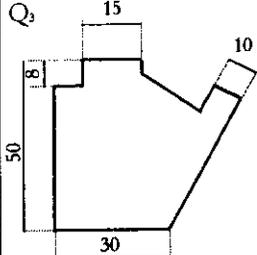
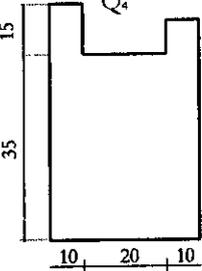
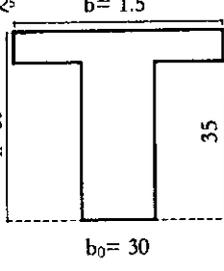
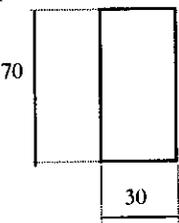
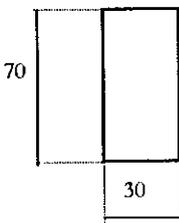
Tenant compte de la diversité des sections des poutres utilisées, la détermination des ferrailrages a conduit à de nombreux calculs. Nous avons estimé plus intéressant, dans un souci de clarté, de grouper les résultats dans un tableau (tabl.10.1).

Les calculs détaillés de la détermination du ferraillage ne sont donnés que pour les poutres croisées (parag.10.2).

*Remarque :*

Les flèches de toutes les poutres sont vérifiées par rapport à la flèche admissible ( $f_{adm} = 1.325$  cm).

Tableau 10.1 : Ferrailages des poutres.

							
Poutre							
$d - b - d'$ [cm]	18 - 10 - 2	45 - 30 - 5	45 - 30 - 5	30 - 30 - 5	45 - 150 - 5	65 - 30 - 5	65 - 30 - 5
$M_u - M_{ser}$ [kN.m]	0.675 - 0.5	61.17 - 44.7	97.33 - 71.51	56.58 - 41.9	132.66 - 96.14	131.91 - 93.74	310.2 - 220.5
$A_{su} - A_{s,ser}$ [cm <sup>2</sup> ]	0.11 - 0.2 C.N.F	4.10 - 6.30	6.73 - 10.33	5.86 - 7.87	8.65 - 13.07	6.13 - 9.14	15.65 - 22.6
$V_u$ [kN]	1.68	29.66	47.19	27.43	64.31	55.27	192.3
$\tau_u = V_u / bd$ [Mpa]	0.09	0.22	0.35	0.30	0.48	0.28	0.99
$A_t$ [cm <sup>2</sup> ]	0.57	3.14	3.14	3.14	3.14	3.14	3.14
$s_t$ [cm] zone nodale (1m)	20	10	10	10	10	15	15
$s_t$ [cm] zone courante	20	20	20	20	20	20	20

## 10.2 ETUDE DES POUTRES CROISEES

Ces trois poutres  $Q_6$ ,  $Q_7$  et  $Q_8$  de même section (fig.10.1), se croisent dans la partie supérieure ouverte du réfrigérant afin de supporter les équipements du ventilateur.

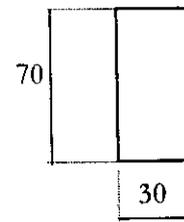


Figure 10.1 : Section des poutres croisées.

Pour la représentation schématique de ces poutres voir fig.10.2,10.6.

### 10.2.1 Analyse modale : [7]

La méthode de superposition modale consiste à définir la solution dans la base des modes propres de vibration de la structure.

Dans le cas de structures faiblement amorties, la résolution d'un système par le problème aux valeurs propres revient à déterminer les valeurs et les formes propres de l'équation :

$$[K][\Omega] = [M][\phi][\Omega^2]$$

avec :

$K$  : matrice de rigidité de la structure,

$M$  : matrice de masse,

$\Omega^2$  : matrice diagonale formée de valeurs propres,

$\phi$  : matrice dont les colonnes représentent des vecteurs propres.

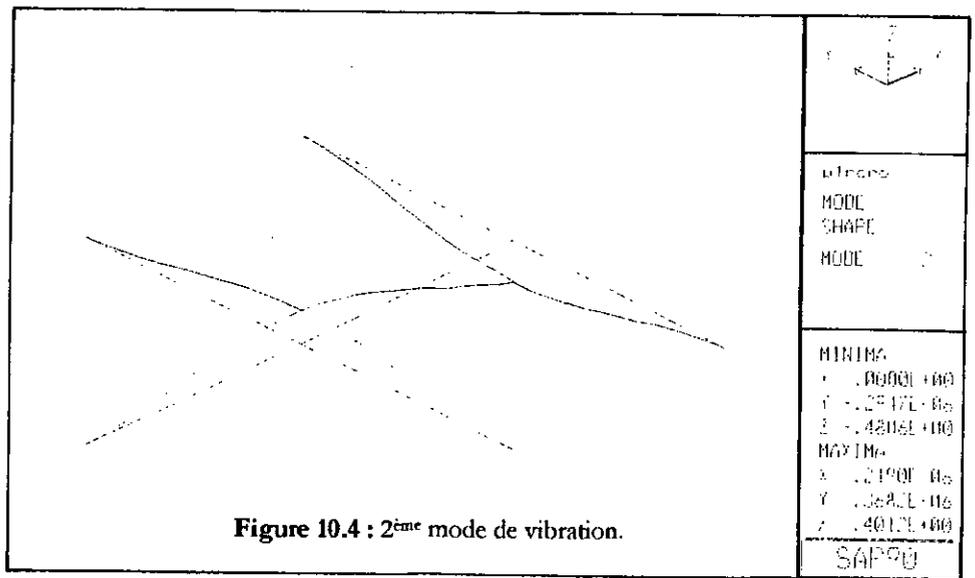
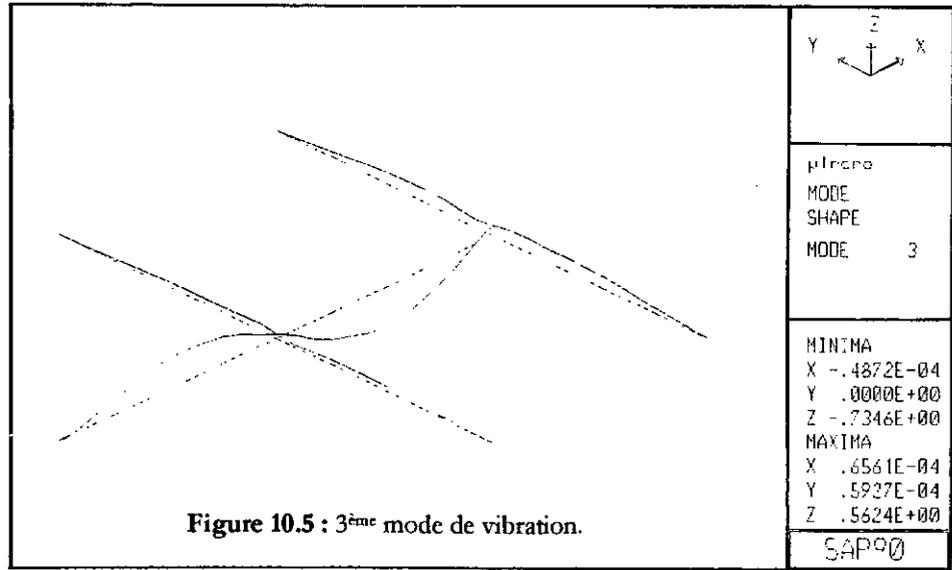
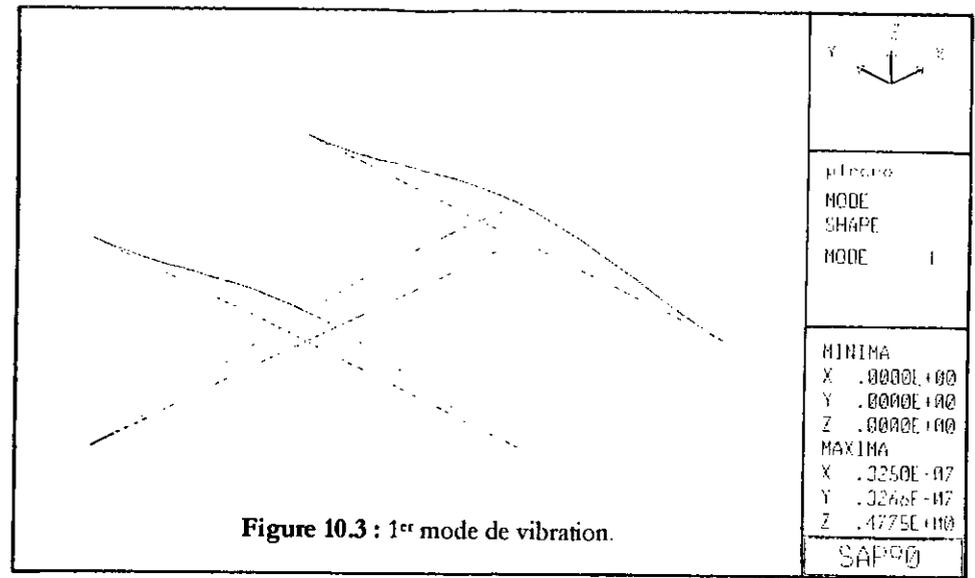
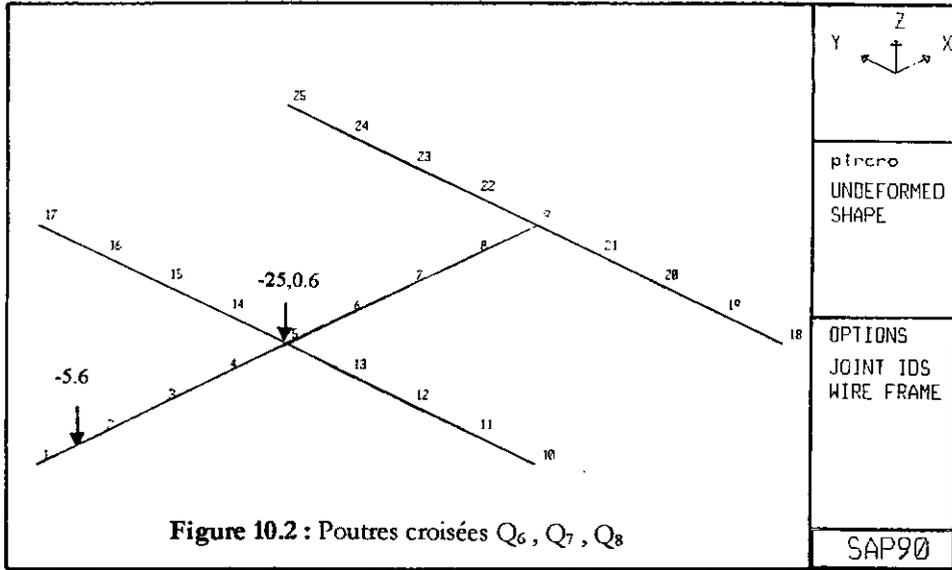
Ce système carré de pulsation propres  $\lambda_i = \omega_i$  de dimension 'n' a 'n' solutions propres «  $\phi_i$  » permettant de définir les déformées modales de la structure et 'n' valeurs propres associées. Seuls les trois premiers modes de vibration ont été considérés, puisqu'ils absorbent toute l'énergie de déformation.

### 10.2.2 Vérification des modes de vibrations :

Pour les trois premiers modes propres de vibrations des poutres croisées, nous résumons les résultats donnés par le SAP90 dans le tableau suivant ;

Modes (n)	Période [s] (T)	Fréquence [Hz] $F=1/T$	Participation [%]
1	0.034042	29.375	77.683
2	0.024711	40.468	78.650
3	0.010608	94.266	84.799

Tableau 10.2 : Analyse modale



### 10.2.3 Comparaison des résultats :

La fréquence de l'excitation extérieure (réducteur) est égale à :

$$f = 3.43 \text{ Hz}$$

En augmentant la valeur de la fréquence du chargement extérieur, on se rapproche de la fréquence propre de vibration du système « résonance ». Un intervalle de 20 % entre les deux fréquences est maintenu par mesure de sécurité, les déplacements restant ainsi inférieurs aux déplacements max. admis aux poutres.

$$f / F_1 = 11.68 \% < 20 \%$$

$$f / F_2 = 8.48 \% < 20 \%$$

$$f / F_3 = 3.64 \% < 20 \%$$

Les fréquences propres du système calculé sont vérifiées par rapport à la fréquence d'excitation.

### 10.2.4 Calcul des poutres Q<sub>6</sub> et Q<sub>7</sub> :

#### 10.2.4.1 Calcul à l'E.L.U :

D'après les résultats du SAP90 ;

$$M_u = 131.91 \text{ kN.m}$$

$$b = 0.3 \text{ m} \quad d = 0.65 \text{ m} \quad d' = 0.05 \text{ m}$$

$$\mu_{bu} = 0.09 < \mu_u = 0.3$$

$$\alpha = 0.12 < \alpha_{AB} \Rightarrow \text{pivot A}$$

$$A_{su} = 6.13 \text{ cm}^2$$

#### 10.2.4.2 Calcul à l'E.L.S :

$$M_{ser} = 93.74 \text{ kN.m}$$

$$\mu_{ser} = 0.062 < \mu_{ab} = 0.203$$

$$\alpha = 0.311 < \alpha_{ab} \Rightarrow \text{pivot a}$$

$$A_{su} = 9.14 \text{ cm}^2$$

#### 10.2.4.3 Vérification à l'effort tranchant :

$$V_u = 55.27 \text{ kN}$$

$$\tau_u = \frac{V_u}{b_0 d} = 0.283 \text{ Mpa} < \bar{\tau}_b = \min [0.1 f_{c28}, 3 \text{ Mpa}] = 2 \text{ Mpa}$$

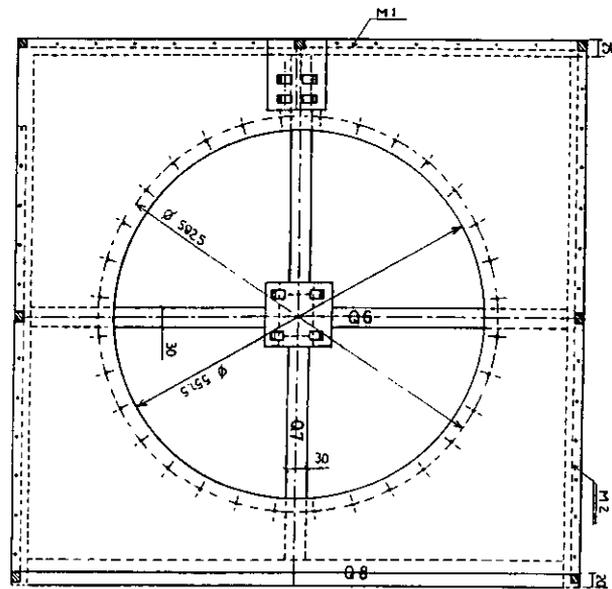


Figure 10.6 : Vue en plan des poutres croisées.

$A_t$ ; section d'armature transversale

$$\phi_t \leq \min [ h/35, \phi, b/10 ] = 1.6 \text{ cm}$$

$$\text{soit } A_t = 3.14 \text{ cm}^2 \quad 1 \text{ cadre} + 1 \text{ étrier } \phi 10$$

$$s_t \leq \frac{0.9 f_{su} A_t}{b \tau_u} = 54.81 \text{ cm}$$

et

$$s_t \leq s_{t,\max} = \min [ 0.9d, 40 \text{ cm} ] = 40 \text{ cm}$$

Compte tenu des RPA ;

$$\begin{aligned} s_t &\leq \min [ h/4, 12\phi ] = 17.5 \text{ cm} &\Rightarrow & s_t = 15 \text{ cm} && \text{en zone nodale (1m)} \\ s_t &\leq h/2 = 35 \text{ cm} &\Rightarrow & s_t = 20 \text{ cm} && \text{en zone courante.} \end{aligned}$$

### 10.2.5 Calcul de la poutre $Q_8$ :

En plus de son poids propre et la réaction due à la poutre  $Q_7$ , cette poutre supporte les charges et surcharges qui lui reviennent des deux dalles I et II ;

$$g = 31.93 \text{ kN/ml}$$

$$q = 3.1 \text{ kN/ml}$$

#### 10.2.5.1 Calcul à l'E.L.U :

$$M_u = 310.2 \text{ kN.m}$$

$$\mu_{bu} = 0.216 < \mu_{lu}$$

$$\alpha = 0.307 < \alpha_{AB} \Rightarrow \text{pivot A}$$

$$A_{su} = 15.65 \text{ cm}^2$$

#### 10.2.5.2 Calcul à l'E.L.S :

$$M_{ser} = 220.5 \text{ kN.m}$$

$$\mu_{ser} = 0.145 < \mu_{ab}$$

$$\alpha = 0.441 < \alpha_{ab} \Rightarrow \text{pivot a}$$

$$A_{su} = 22.6 \text{ cm}^2$$

#### 10.2.5.3 Vérification à l'effort tranchant :

$$V_u = 192.3 \text{ kN}$$

$$\tau_u = \frac{V_u}{b_0 d} = 0.986 \text{ Mpa} < \bar{\tau}_b = 2 \text{ Mpa}$$

$$\text{soit } A_t = 3.14 \text{ cm}^2 \quad 2 \text{ cadre } \phi 10$$

$$s_t \leq 15 \text{ cm} \quad \text{en zone nodale}$$

$$s_t \leq 20 \text{ cm} \quad \text{en zone courante.}$$

### 10.2.5.4 Vérification de la flèche

La flèche maximale calculée par le SAP90 :

$$f = 0.893 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 0.893 \text{ mm}$$

$$f_{adm} = 1/1000 + 0.5 \text{ cm} = 1.325 \text{ cm} \quad (l=8.25 \text{ m}) \quad [\text{art B.6.5,2 BAEL83}]$$

$$f < f_{adm} \Rightarrow \text{vérifiée}$$

### 10.3 SCHEMAS DE FERRAILLAGES

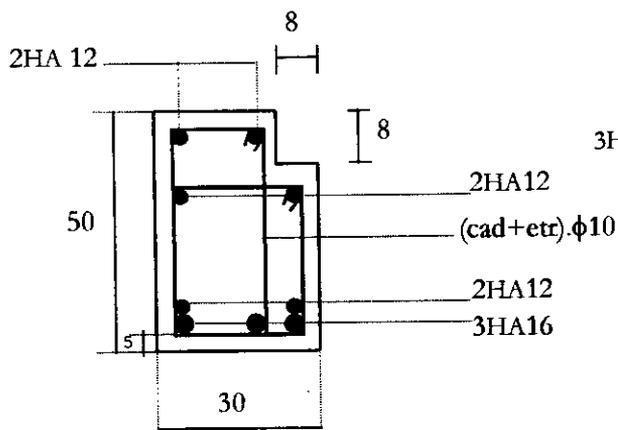


Figure 10.7 : Poutre Q<sub>2</sub>

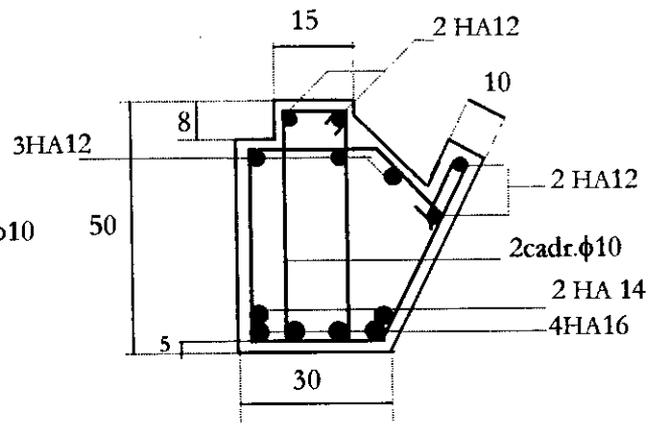


Figure 10.8 : Poutre Q<sub>3</sub>

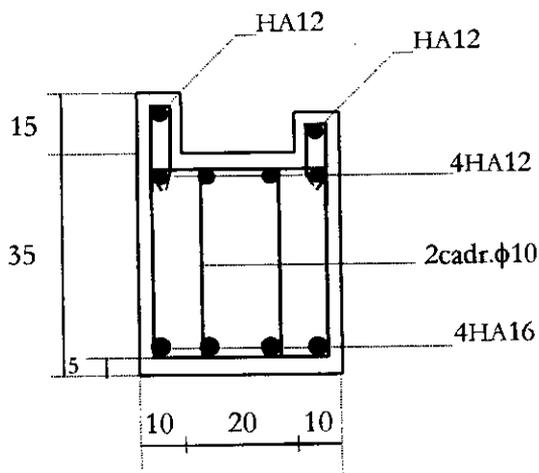


Figure 10.9 : Poutre Q<sub>4</sub>

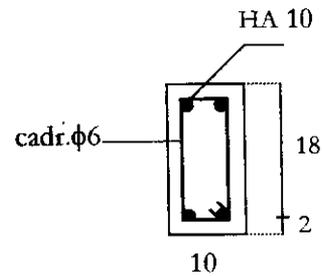


Figure 10.10 : Poutrelles Q<sub>9, ..., 13</sub>

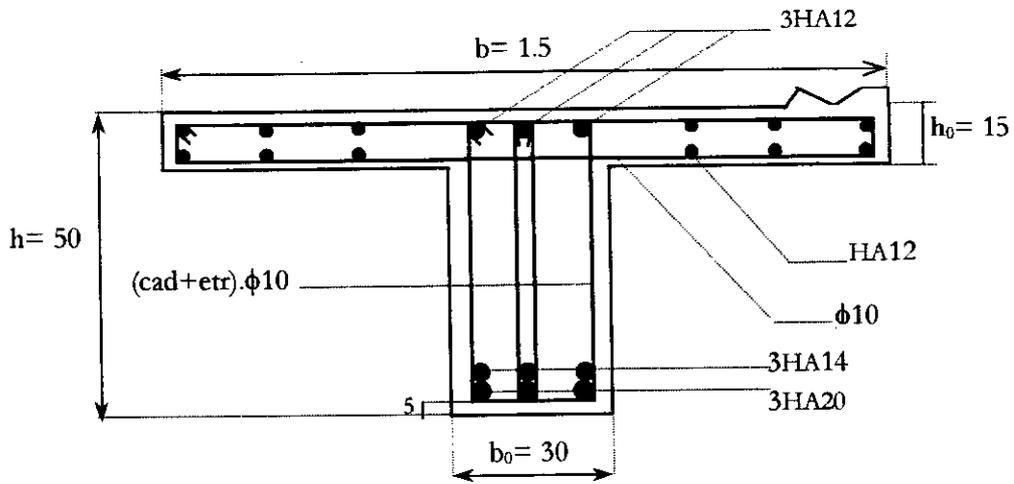


Figure 10.11 : Poutre Q<sub>5</sub>

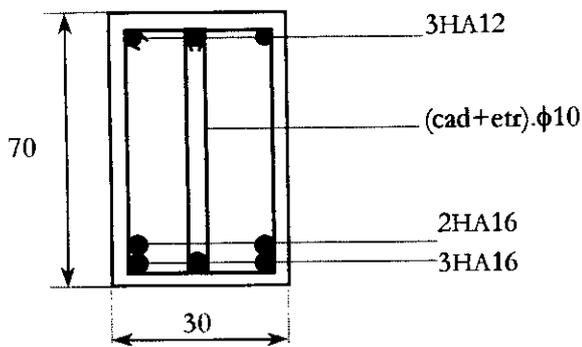


Figure 10.12 : Poutres Q<sub>6,7</sub>

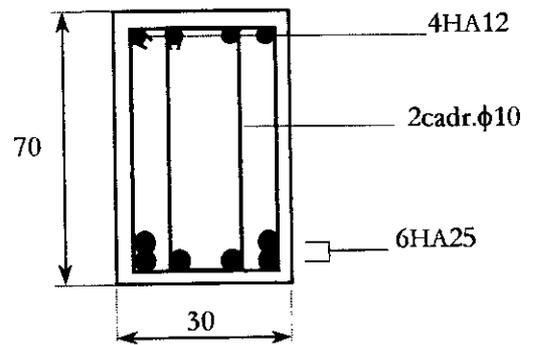


Figure 10.13 : Poutre Q<sub>8</sub>

# CHAPITRE VI

---

---

## *CALCUL DES ELEMENTS*

---

---

*« Les connaissances acquises sous toutes les formes n'ont d'intérêt réel  
que par l'utilisation qu'on en fait. »*

**R.AMATO**

## CHAPITRE XI CALCUL DES ELEMENTS

### 11.1 ESCALIERS

Les escaliers prévus sont extérieurs au réfrigérant. C'est pourquoi la prise en compte de l'action du vent s'impose.

Les escaliers à 5 volées permettent l'accès à la terrasse pour la maintenance et la vérification du moteur.

Les escaliers à 2 volées permettent l'accès à l'intérieur du réfrigérant.

L'encombrement créé par la conduite ramenant l'eau chaude jusqu'à la terrasse a amené à l'adoption des dimensions suivantes pour les gradins.

$$\left\{ \begin{array}{l} g = 20 \text{ cm} \\ h = 20 \text{ cm} \\ \text{emmarchement} = 80 \text{ cm} \end{array} \right.$$

#### 11.1.1 Calcul de la volée :

La volée est assimilée à une poutre statique simplement appuyée sur le palier.[1]

##### 11.1.1.1 Evaluation des charges :

$b$ (largeur de la paille) = 0.8 m

- Charge permanente (poids propre + poids des marches) ;  
 $G = 6.6 \text{ kN/m}^2$
- Charge d'exploitation ;  
 $q = 2 \text{ kN/m}^2$  ([4]parag.7.8)
- Action du vent ;  
 $w = 0.991 \text{ kN/m}^2$
- Combinaisons d'actions ;

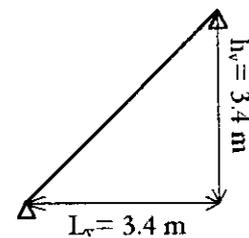


Figure 11.1 : Schéma statique d'une volée.

$$\begin{aligned} \text{- à l'E.L.U :} \quad q_u &= (1.35G + 1.5q + 1.2w) \times 0.8 \\ &= 10.47 \text{ kN/ml} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{- à l'E.L.S :} \quad q_{\text{ser}} &= (G + q + w) \times 0.8 \\ &= 7.67 \text{ kN/ml} \end{aligned}$$

**11.1.1.2 Armatures longitudinales :**

$$d = 0.15 \text{ m} \quad d' = 0.03 \text{ m}$$

## • à l'E.L.U

$$M_u = 15.13 \text{ kN.m}$$

$$\mu_{bu} = 0.074$$

$$A_{su} = 3.02 \text{ cm}^2$$

## • à l'E.L.S

$$M_{ser} = 11.08 \text{ kN.m}$$

$$\mu_{ser} = 0.051$$

$$A_{s,ser} = 4.58 \text{ cm}^2$$

## • Condition de non-fragilité ;

$$A_s \geq 0.23 b_0 d f_{t28}/f_c = 1.24 \text{ cm}^2$$

$$\text{Soit } 4\text{HA}12 \quad s = 25\text{cm}$$

**11.1.1.3 Armatures de répartitions :**

D'après les BAEL83

$$A_r = 1/4 A_s / \text{ml}$$

$$= 4.62 / (4 \times 0.8) = 1.44 \text{ cm}^2/\text{ml} \quad \text{soit } 2\phi 10 \quad s = 20 \text{ cm.}$$

**11.1.1.4 Vérification au cisaillement :**

- La volée est bétonnée sans reprise dans toute son épaisseur,
- $b = 0.8 \text{ m} > 3h = 0.54 \text{ m}$
- $V_u/d = 0.12 \text{ Mpa} < 0.05 f_{c28} = 1 \text{ Mpa}$   
 $\Rightarrow$  Aucune armature d'effort tranchant n'est requise.

**11.1.2 Calcul de la poutre palière :**

Cette poutre est encadrée dans le mur et supporte la volée. Le calcul se fera à la flexion et à la torsion. Pour cela le ferrailage ne sera fait qu'à l'E.L.U.[8]

## • Charges appliquées à la poutre ;

$$\text{- Réaction de la volée} \quad q_u = 20.94 \text{ kN/ml}$$

$$\text{- Poids propre} \quad g = 3 \text{ kN/ml}$$

$$\text{- Surcharge} \quad q = 0.6 \text{ kN/ml}$$

$$\text{- Couple de torsion } C \text{ du à la réaction de la volée}$$

$$C = q_u \times e = 20.94 \times 0.36 = 7.54 \text{ kN.m/ml}$$

$$Q_u = (1.35g + 1.5q) + q_u$$

$$= 25.89 \text{ kN/ml.}$$

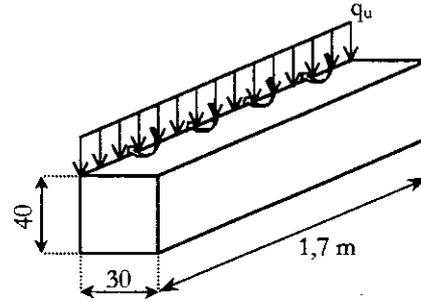


Figure 11.2 : Poutre palière.

11.1.2.1 Ferrailage à la flexion :

$$d = 0.36 \text{ m} \quad d' = 0.04 \text{ m}$$

a- Armatures longitudinales :

$$M_u = q_u l^2 / 12$$

$$= 37.4 \text{ kN.m}$$

$$\mu_{bu} = 0.085$$

$$A_{su} = 3.13 \text{ cm}^2$$

b- Armatures transversales :

$$V_u = 44.013 \text{ kN}$$

$$\tau_{u,f} = \frac{V_u}{b d} = 0.407 \text{ Mpa}$$

$$\frac{A_t}{b s_t} \geq \frac{\tau_{u,f}}{0.9 f_{su}}$$

$$\frac{A_t}{s_t} \geq \frac{0.407 \times 0.3}{0.9 \times 348}$$

$$d'où \quad \frac{A_t}{s_t} = 3.9 \cdot 10^{-4} \text{ m}$$

11.1.2.2 Ferrailage à la torsion :

$$M_{tu} = 12.75 \text{ kN.m}$$

La contrainte tangentielle est donnée par :

$$\tau_{u,t} = \frac{M_{tu}}{2 \Omega b_0}$$

Avec :

$b_0$  : épaisseur fictive

$b_0 = a/6$  où  $a$  est le petit côté

$\Omega$  : aire enveloppée par le contour tracé à mi-épaisseur des parois.

Application :

$$a = 30 \text{ cm} \Rightarrow b_0 = 5 \text{ cm}$$

$$\Omega = (a - b_0)(b - b_0) = 875 \text{ cm}^2$$

$$\tau_{ut} = 1.45 \text{ Mpa.}$$

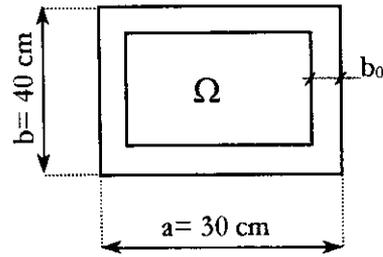


Figure 11.3 : Section fictive de la poutre palière.

**a- Armatures transversales :**

Données par la relation ;

$$\frac{A_t}{s_t} \geq \frac{\tau_{u,t}}{f_{su}} = \frac{1.45 \times 0.05}{348} = 2.08 \cdot 10^{-4} \text{ m}$$

**b- Armatures longitudinales :**

$$A_l = \frac{A_t}{s_t} u$$

$u$  : périmètre de l'aire de la section  $\Omega$

$$u = 2[(a - b_0) + (b - b_0)] = 120 \text{ cm}$$

$$A_l = 2.08 \times 10^{-2} \times 120 = 2.49 \text{ cm}^2$$

• **Finalemment :**

$$\frac{A_t}{s_t} \geq \left( \frac{A_t}{s_t} \right)_{flexion} + \left( \frac{A_t}{s_t} \right)_{torsion} = 5.98 \cdot 10^{-4} \text{ m}$$

Soit  $A_t = 2.01 \text{ cm}^2$  (4 $\phi$ 8)

$$\left\{ \begin{array}{l} s_t \leq 33.6 \text{ cm} \\ \text{et} \\ s_t \leq \min [0.9d, 40 \text{ cm}] = 34 \text{ cm} \end{array} \right.$$

on prend  $s_t = 15 \text{ cm}$

$$A_t \geq (A_t)_{flexion} + (A_t)_{torsion}$$

$$\Rightarrow A_t \geq 3.13 + 2.49 = 5.62 \text{ cm}^2$$

soit 3HA12 + 2HA14

11.1.3 Schémas de ferrailages :

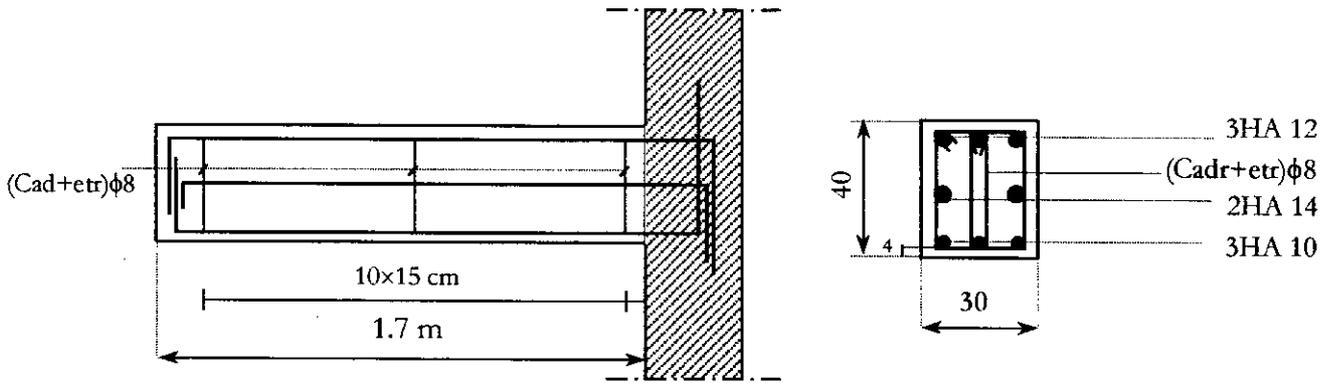


Figure 11.4 : Ferrailage de la poutre palière.

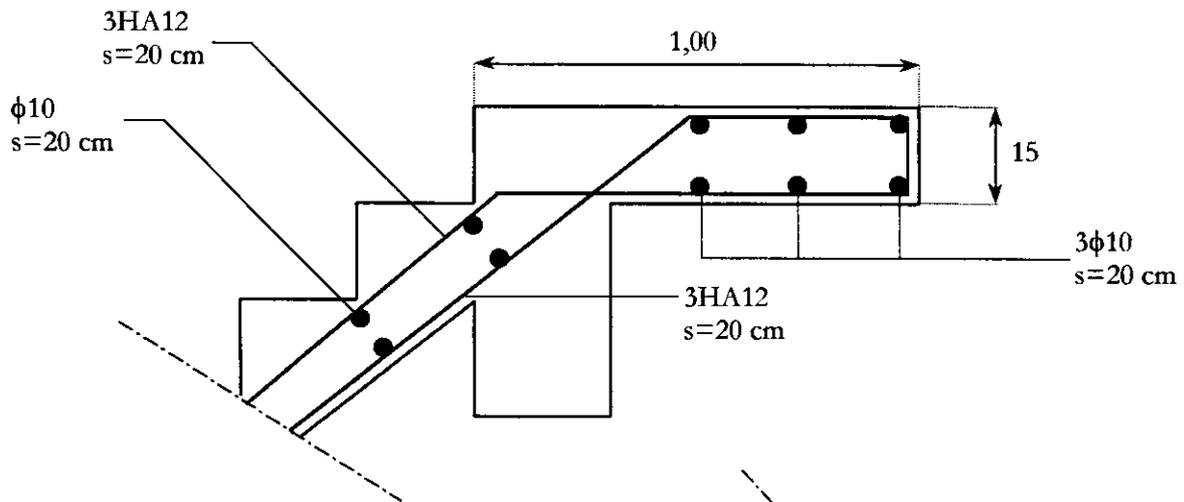


Figure 11.5 : Ferrailage d'une volée.

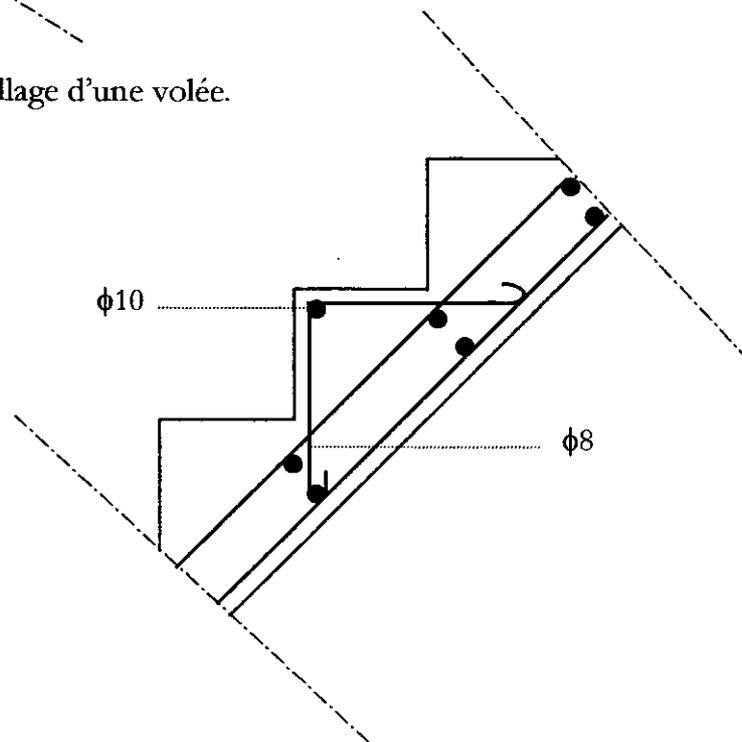


Figure 11.6 : Détail d'une marche.

### 11.2 CALCUL DES DALLETTES

Les dallettes reposent sur les poutres Q<sub>2</sub> et Q<sub>3</sub>, elles jouent le rôle d'une passerelle permettant l'accès à l'intérieur de la structure en cas de maintenance.



- Charge permanente  $G = 1.12 \text{ kN/ml}$
- Charge d'exploitation  $Q = 0.84 \text{ kN/ml}$  ([4]parag.7.8)
- Combinaison à l'E.L.U :  $1.35G + 1.5Q = 2.772 \text{ kN/ml}$
- Combinaison à l'E.L.S :  $G + Q = 1.96 \text{ kN/ml}$

Ce qui nous donne ;

- à l'E.L.U :  
 $M_u = q_u l^2 / 8 = 0.256 \text{ kN.m}$   
 $A_u = 0.15 \text{ cm}^2$
- à l'E.L.S :  
 $M_{ser} = q_{ser} l^2 / 8 = 0.181 \text{ kN.m}$   
 $A_u = 0.24 \text{ cm}^2$

La section d'armatures étant très faible, nous utiliserons des barres de  $\phi 8$  dans les deux sens.

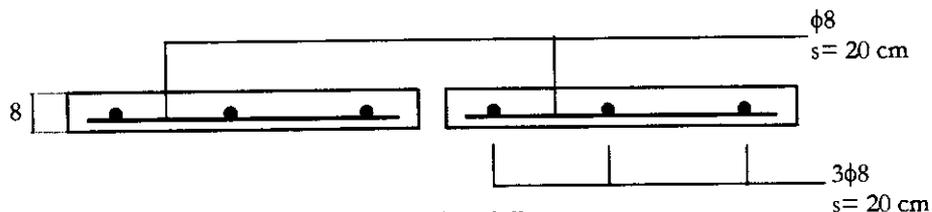


Figure 11.7 : ferrailage des dallettes.

### 11.3 CALCUL DES PERSIENNES

Dans les réfrigérants à ventilateur aspirant, il est recommandé de munir les entrées d'air de persiennes inclinées à 45-50° pour limiter les sorties d'eaux en partie basse d'une part et de diriger le courant d'air vers l'intérieur d'autre part.

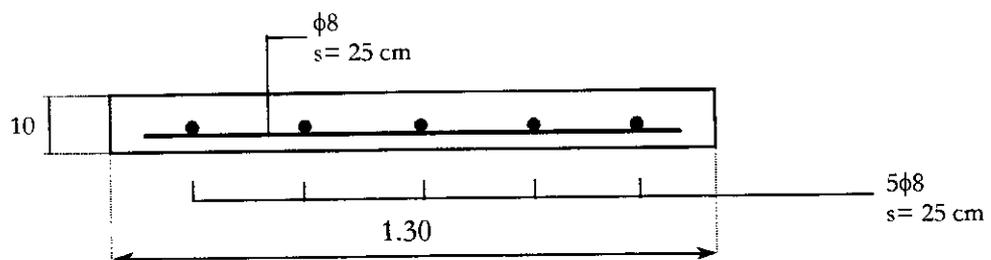


Figure 11.8 : Ferrailage des persiennes.

---

---

**CONCLUSION GENERALE**

---

---

## CONCLUSION GENERALE

Tous les ouvrages ou les éléments d'ouvrages doivent être conçu et calculés de façon à pouvoir résister, avec une sécurité appropriée à toutes les sollicitations et déformations prévues, pendant la période d'utilisation et à pouvoir présenter une durabilité satisfaisante pendant toute la durée de vie prévue.

L'intérêt des réfrigérants atmosphériques n'est plus à démontrer, vu que leurs domaines d'utilisations deviennent plus vastes et très appréciables.

Néanmoins le calcul de ces ouvrages est très laborieux, et leur réalisation devant être menée avec soins, chaque élément constitutif de l'ouvrage nécessite une étude particulière. La littérature spécialisée fait cruellement défaut pour l'étude des différents phénomènes qui interviennent.

L'utilisation des méthodes numériques, telle que le programme SAP90, basé sur la méthode des éléments finis facilite la tâche et permet d'évaluer les efforts internes dans les éléments résistants de la structure.

Enfin, nous pouvons dire que la réalisation de ce modeste travail nous a permis d'une part, de mesurer l'importance des réfrigérants, surtout dans les zones sahariennes, et d'autre part d'apprendre à utiliser l'outil informatique dans le domaine du génie civil en utilisant le logiciel SAP90.

---

---

# БИБЛИОГРАФИЈЕ

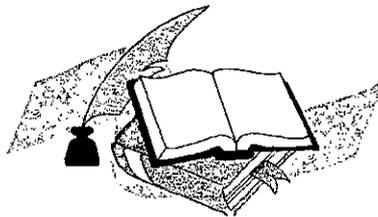
---

---



## BIBLIOGRAPHIE

- [1] P.CHARON, **«Calcul des Ouvrages en Béton Armé Suivant les Règles B.A.E.L83»**  
Editions Eyrolles 1983.
- [2] M.DIVERS, **«Calcul des Tours en Béton Armé»**  
Editions Eyrolles 1977.
- [3] DTR B.C 2.48, **«Règles Parasismiques Algérienne - RPA88»**  
Ministère de l'Équipement 1988.
- [4] DTR B.C 2.2, **«Charges Permanentes et Charges d'Exploitations»**  
Ministère de l'Équipement 1989.
- [5] DIRASSAT SARL, **«Guide Pratique du SAP90»**  
Alger 1992.
- [6] E.WILSON, A.HABIBULLAH **«SAP90 Users Manual»**  
Computers & Structures INC 1990.
- [7] M.DEMIDEM ; notes de cours, **«Méthodes Numérique»**  
E.N.P. 1998.
- [8] R.BOUTEUMEUR; notes de cours, **«Béton Armé & Béton Précontraint»**  
E.N.P. 1997.
- [9] B.A.E.L91, **«Règles Techniques de Conception et de Calcul des Ouvrages en B.A.»**  
Editions Eyrolles 1992.
- [10] HAMON, **«Réfrigérants»**  
HAMON 1995.
- [11] A.FUENTES, **«Calcul Pratique des Ossatures de Bâtiments»**  
Editions Eyrolles 1983.
- [12] Groupe de Coordination des Textes Techniques, **«Règles Neige et Vent 65»**  
Editions Eyrolles NV65.
- [13] A.GUERRIN, **«Traité de Béton Armé»**, Tome IV et VI  
Editions Dunod 1972.
- [14] TECHNIQUE DE L'INGENIEUR, **«Réfrigérants Atmosphériques»**  
B2 481



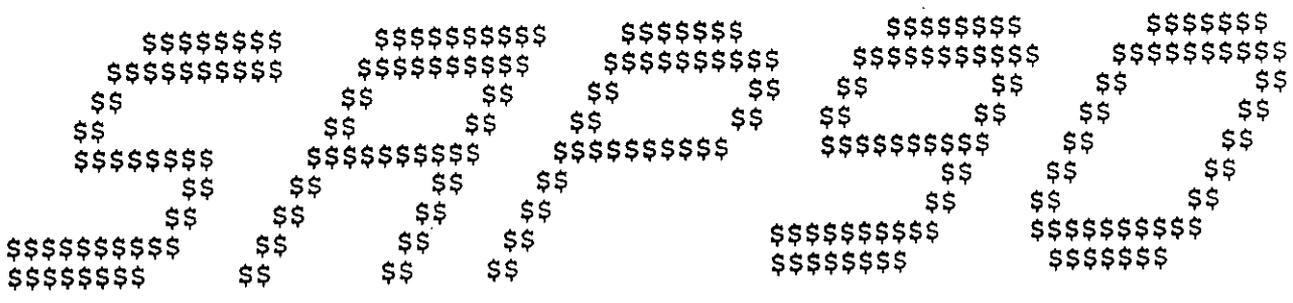
---

---

# ***ANNEXES***

---

---

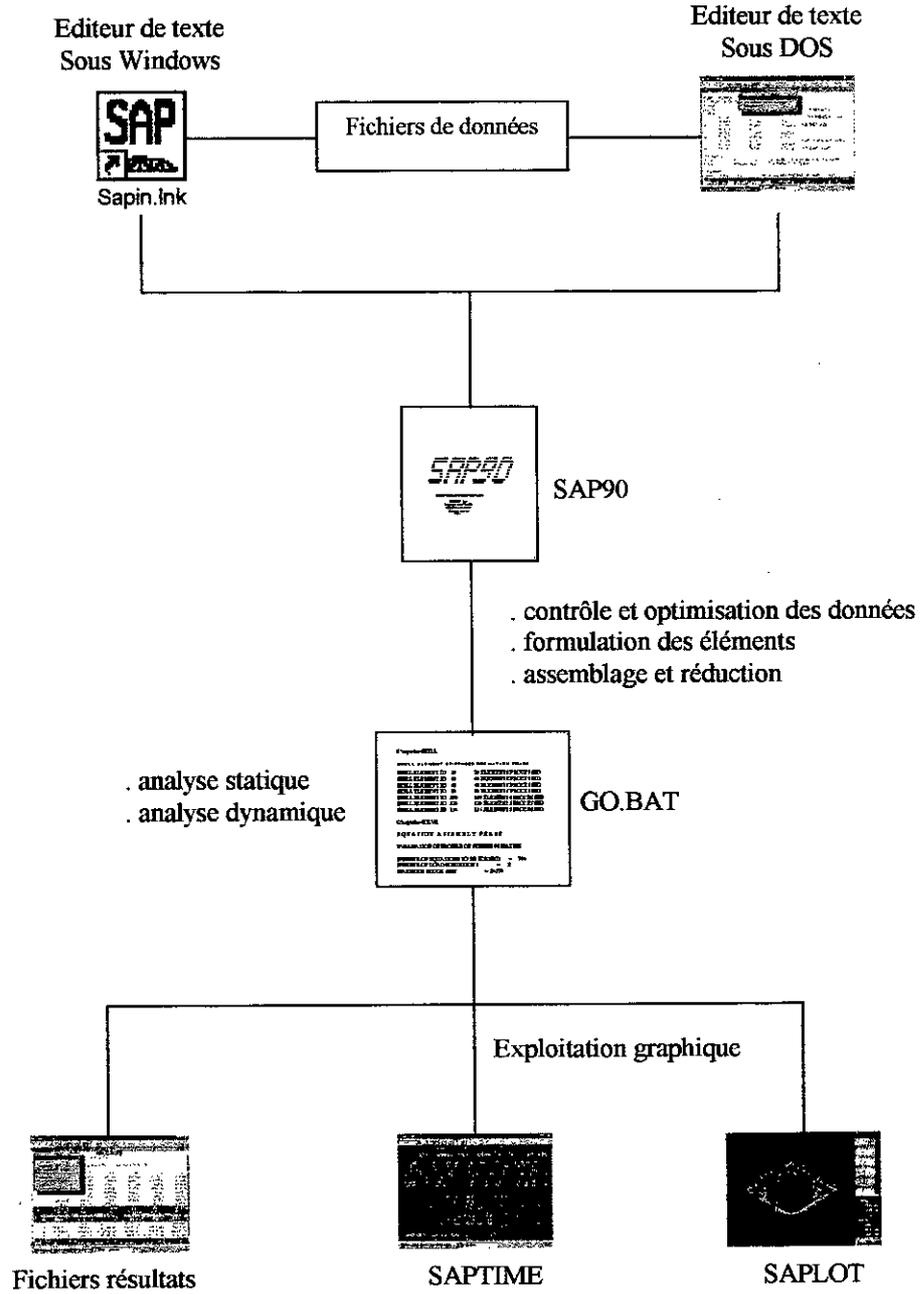


STRUCTURAL ANALYSIS PROGRAMS

VERSION 5.10

Copyright (C) 1978-1989  
EDWARD L. WILSON  
All rights reserved

### Modules de SAP90



## ETUDE DALLE DU REFRIGERANT AVEC OUVERTURE

SYSTEM

n=172 l=2

joints

1	x=0.	y=0.	
2	x=0.6	y=0.	
3	x=1.2	y=0.	
11	x=6.8	y=0.	
12	x=7.4	y=0.	
13	x=8.	y=0.	
14	x=0.	y=0.6	
15	x=0.6	y=0.6	
25	x=7.4	y=0.6	
26	x=8.	y=0.6	
27	x=0.	y=1.2	
28	x=0.6	y=1.2	
29	x=1.2	y=1.2	
37	x=6.8	y=1.2	q=3, 11, 29, 37, 1, 13
39	x=8.	y=1.2	
40	x=0.	y=1.9	
42	x=1.2	y=1.9	
79	x=6.8	y=6.1	
81	x=8.	y=6.1	q=37, 39, 79, 81, 1, 6
82	x=0.	y=6.8	
84	x=1.2	y=6.8	q=40, 42, 82, 84, 1, 6
92	x=6.8	y=6.8	
93	x=7.4	y=6.8	
94	x=8.	y=6.8	
95	x=0.	y=7.4	
96	x=0.6	y=7.4	
106	x=7.4	y=7.4	
107	x=8.	y=7.4	
108	x=0.	y=8.	
109	x=0.6	y=8.	
110	x=1.2	y=8.	
118	x=6.8	y=8.	q=84, 92, 110, 118, 1, 13
119	x=7.4	y=8.	
120	x=8.	y=8.	
121	x=4.7	y=1.3	
122	x=5.4	y=1.3	
123	x=5.4	y=1.55	
124	x=5.85	y=1.55	
125	x=6.1	y=1.55	
126	x=5.85	y=1.9	
127	x=6.1	y=1.9	
128	x=6.45	y=1.9	
129	x=6.1	y=2.15	
130	x=6.45	y=2.15	
131	x=6.45	y=2.6	
132	x=6.7	y=2.6	
133	x=6.7	y=3.3	
134	x=6.7	y=4.7	
135	x=6.7	y=5.4	
136	x=6.45	y=5.4	
137	x=6.45	y=5.85	
138	x=6.1	y=5.85	
139	x=6.45	y=6.1	
140	x=6.1	y=6.1	

```

141 x=5.85 y=6.1
142 x=6.1 y=6.45
143 x=5.85 y=6.45
144 x=5.4 y=6.45
145 x=5.4 y=6.7
146 x=4.7 y=6.7
147 x=3.3 y=6.7
148 x=2.6 y=6.7
149 x=2.6 y=6.45
150 x=2.15 y=6.45
151 x=1.9 y=6.45
152 x=2.15 y=6.1
153 x=1.9 y=6.1
154 x=1.55 y=6.1
155 x=1.9 y=5.85
156 x=1.55 y=5.85
157 x=1.55 y=5.4
158 x=1.3 y=5.4
159 x=1.3 y=4.7
160 x=1.3 y=3.3
161 x=1.3 y=2.6
162 x=1.55 y=2.6
163 x=1.55 y=2.15
164 x=1.9 y=2.15
165 x=1.55 y=1.9
166 x=1.9 y=1.9
167 x=2.15 y=1.9
168 x=1.9 y=1.55
169 x=2.15 y=1.55
170 x=2.6 y=1.55
171 x=2.6 y=1.3
172 x=3.3 y=1.3

```

## restraints

```

1      13      1      r=1,1,1,1,1,1
108    120     1      r=1,1,1,1,1,1
14     40     13     r=1,1,1,1,1,1
26     39     13     r=1,1,1,1,1,1
82     95     13     r=1,1,1,1,1,1
81    107     13     r=1,1,1,1,1,1
46     76      6     r=1,1,1,1,1,1
45     75      6     r=1,1,1,1,1,1

```

## potentiel

```

1      172     1      p=1.5,1.5

```

## shell

```

nm=1      z=-1      p=0,-1
1          e=3.2E+07  u=0.15      w=25
1          jq=1,2,14,15  m=1  etype=0  th=0.20  g=12,2
25         jq=27,28,40,41  m=1  etype=0  th=0.20  g=2,1
27         jq=40,41,46,47  m=1  etype=0  th=0.20  g=2,7
41         jq=37,38,43,44  m=1  etype=0  th=0.20  g=2,7
55         jq=79,80,92,93  m=1  etype=0  th=0.20  g=2,1
57         jq=29,30,42,166  m=1  etype=0  th=0.20  g=1,1
58         jq=36,37,127,43  m=1  etype=0  th=0.20  g=1,1
59         jq=78,153,84,85  m=1  etype=0  th=0.20  g=1,1
60         jq=140,79,91,92  m=1  etype=0  th=0.20  g=1,1
61         jq=82,83,95,96  m=1  etype=0  th=0.20  g=12,2
85         jq=34,35,121,122  m=1  etype=0  th=0.20  g=1,1

```

86	jq=35, 36, 123, 125	m=1	etype=0	th=0.20	g=1, 1
87	jq=124, 125, 126, 127	m=1	etype=0	th=0.20	g=1, 1
88	jq=127, 128, 129, 130	m=1	etype=0	th=0.20	g=1, 1
89	jq=128, 43, 131, 49	m=1	etype=0	th=0.20	g=1, 1
90	jq=132, 49, 133, 55	m=1	etype=0	th=0.20	g=1, 1
91	jq=134, 67, 135, 73	m=1	etype=0	th=0.20	g=1, 1
92	jq=136, 73, 139, 79	m=1	etype=0	th=0.20	g=1, 1
93	jq=138, 137, 140, 139	m=1	etype=0	th=0.20	g=1, 1
94	jq=141, 140, 143, 142	m=1	etype=0	th=0.20	g=1, 1
95	jq=144, 142, 90, 91	m=1	etype=0	th=0.20	g=1, 1
96	jq=146, 145, 89, 90	m=1	etype=0	th=0.20	g=1, 1
97	jq=148, 147, 86, 87	m=1	etype=0	th=0.20	g=1, 1
98	jq=151, 149, 85, 86	m=1	etype=0	th=0.20	g=1, 1
99	jq=153, 152, 151, 150	m=1	etype=0	th=0.20	g=1, 1
100	jq=156, 155, 154, 153	m=1	etype=0	th=0.20	g=1, 1
101	jq=72, 157, 78, 154	m=1	etype=0	th=0.20	g=1, 1
102	jq=66, 159, 72, 158	m=1	etype=0	th=0.20	g=1, 1
103	jq=48, 161, 54, 160	m=1	etype=0	th=0.20	g=1, 1
104	jq=42, 165, 48, 162	m=1	etype=0	th=0.20	g=1, 1
105	jq=165, 166, 163, 164	m=1	etype=0	th=0.20	g=1, 1
106	jq=168, 169, 166, 167	m=1	etype=0	th=0.20	g=1, 1
107	jq=30, 31, 168, 170	m=1	etype=0	th=0.20	g=1, 1
108	jq=31, 32, 171, 172	m=1	etype=0	th=0.20	g=1, 1
109	jq=32, 172, 33	m=1	etype=0	th=0.20	g=1, 1
110	jq=34, 121, 33	m=1	etype=0	th=0.20	g=1, 1
111	jq=121, 122, 123	m=1	etype=0	th=0.20	g=1, 1
112	jq=123, 124, 126	m=1	etype=0	th=0.20	g=1, 1
113	jq=126, 127, 129	m=1	etype=0	th=0.20	g=1, 1
114	jq=129, 130, 131	m=1	etype=0	th=0.20	g=1, 1
115	jq=131, 132, 133	m=1	etype=0	th=0.20	g=1, 1
116	jq=133, 55, 61	m=1	etype=0	th=0.20	g=1, 1
117	jq=61, 134, 67	m=1	etype=0	th=0.20	g=1, 1
118	jq=134, 136, 135	m=1	etype=0	th=0.20	g=1, 1
119	jq=136, 137, 138	m=1	etype=0	th=0.20	g=1, 1
120	jq=138, 140, 141	m=1	etype=0	th=0.20	g=1, 1
121	jq=141, 143, 144	m=1	etype=0	th=0.20	g=1, 1
122	jq=144, 145, 146	m=1	etype=0	th=0.20	g=1, 1
123	jq=146, 88, 89	m=1	etype=0	th=0.20	g=1, 1
124	jq=147, 87, 88	m=1	etype=0	th=0.20	g=1, 1
125	jq=149, 148, 147	m=1	etype=0	th=0.20	g=1, 1
126	jq=152, 150, 149	m=1	etype=0	th=0.20	g=1, 1
127	jq=155, 153, 152	m=1	etype=0	th=0.20	g=1, 1
128	jq=157, 156, 155	m=1	etype=0	th=0.20	g=1, 1
129	jq=159, 158, 157	m=1	etype=0	th=0.20	g=1, 1
130	jq=60, 66, 159	m=1	etype=0	th=0.20	g=1, 1
131	jq=54, 160, 60	m=1	etype=0	th=0.20	g=1, 1
132	jq=161, 162, 160	m=1	etype=0	th=0.20	g=1, 1
133	jq=163, 164, 162	m=1	etype=0	th=0.20	g=1, 1
134	jq=166, 167, 164	m=1	etype=0	th=0.20	g=1, 1
135	jq=169, 170, 167	m=1	etype=0	th=0.20	g=1, 1
136	jq=171, 172, 170	m=1	etype=0	th=0.20	g=1, 1

combo

1 c=1.35, 1.35  
2 c=1, 1

## ETUDE DES POUTRES CROISEES

system

n=25 l=3 v=5

joints

1	x=-4.	y=0.	14 14 15	m=1	nsl=0,0	lp=3,0
2	x=-3.	y=0.	15 15 16	m=1	nsl=0,0	lp=3,0
3	x=-2.	y=0.	16 16 17	m=1	nsl=0,0	lp=3,0
4	x=-1.	y=0.	17 18 19	m=1	nsl=0,0	lp=3,0
5	x=0.	y=0.	18 19 20	m=1	nsl=0,0	lp=3,0
6	x=1.	y=0.	19 20 21	m=1	nsl=0,0	lp=3,0
7	x=2.	y=0.	20 21 9	m=1	nsl=0,0	lp=3,0
8	x=3.	y=0.	21 9 22	m=1	nsl=0,0	lp=3,0
9	x=4.	y=0.	22 22 23	m=1	nsl=0,0	lp=3,0
10	x=0.	y=-4.	23 23 24	m=1	nsl=0,0	lp=3,0
11	x=0.	y=-3.	24 24 25	m=1	nsl=0,0	lp=3,0
12	x=0.	y=-2.				
13	x=0.	y=-1.	loads			
14	x=0.	y=1.	5	l=3	f=0,0,-35.06	
15	x=0.	y=2.				
16	x=0.	y=3.	combo			
17	x=0.	y=4.	1	c=1.35,1.5,1.5		
18	x=4.	y=-4.	2	c=1,1,1		
19	x=4.	y=-3.	3	c=1,0,0		
20	x=4.	y=-2.				
21	x=4.	y=-1.				
22	x=4.	y=1.				
23	x=4.	y=2.				
24	x=4.	y=3.				
25	x=4.	y=4.				

restraints

1			r=1,1,1,1,1,1
10	17	7	r=1,1,1,1,1,1
18	25	7	r=1,1,1,1,1,1
2	4	1	r=0,1,0,1,0,1
6	8	1	r=0,1,0,1,0,1
11	16	1	r=1,0,0,0,1,1
19	24	1	r=1,0,0,0,1,1
9			r=1,1,0,0,0,1
5			r=1,1,0,0,0,1

frame

nm=1	nl=1	z=-1		
1	sh=r	t=0.7,0.3	e=3.2e+07	w=5.25 m=0.525
1	p1d=0.5,5.625,0			
1	1 2	m=1	nsl=0,1	lp=2,0
2	2 3	m=1	nsl=0,0	lp=2,0
3	3 4	m=1	nsl=0,0	lp=2,0
4	4 5	m=1	nsl=0,0	lp=2,0
5	5 6	m=1	nsl=0,0	lp=2,0
6	6 7	m=1	nsl=0,0	lp=2,0
7	7 8	m=1	nsl=0,0	lp=2,0
8	8 9	m=1	nsl=0,0	lp=2,0
9	5 13	m=1	nsl=0,0	lp=3,0
10	13 12	m=1	nsl=0,0	lp=3,0
11	12 11	m=1	nsl=0,0	lp=3,0
12	11 10	m=1	nsl=0,0	lp=3,0
13	5 14	m=1	nsl=0,0	lp=3,0

## ETUDE DES POUTRES CROISEES

PROGRAM:SAP90/FILE:ptrcro.

## E I G E N   S Y S T E M   P A R A M E T E R S

NUMBER OF EQUATIONS	=	60
NUMBER OF MASSES	=	38
NUMBER OF VALUES TO BE EVALUATED	=	5
SIZE OF SUBSPACE	=	9

## E I G E N V A L U E S   A N D   F R E Q U E N C I E S

MODE NUMBER	EIGENVALUE (RAD/SEC)**2	CIRCULAR FREQ (RAD/SEC)	FREQUENCY (CYCLES/SEC)	PERIOD (SEC)
1	.340659E+05	.184569E+03	29.375135	.034042
2	.646503E+05	.254264E+03	40.467401	.024711
3	.350806E+06	.592289E+03	94.265725	.010608
4	.413358E+06	.642929E+03	102.325398	.009773
5	.430299E+06	.655972E+03	104.401148	.009578

## B A S E   F O R C E   R E A C T I O N   F A C T O R S

MODE #	PERIOD (sec)	X DIRECTION	Y DIRECTION	Z DIRECTION	X MOMENT	Y MOMENT	Z MOMENT
1	.034	.593E-07	.111E-06	.296E+01	.865E-07	-.531E+01	.296E-06
2	.025	.420E-06	.101E-06	.330E+00	.162E-05	.560E+01	-.222E-05
3	.011	.216E-04	.162E-03	.833E+00	-.113E-03	.186E+00	.363E-03
4	.010	.870E-05	.488E-05	-.441E-04	.320E+01	-.622E-05	.620E-05
5	.010-	.104E-05	.144E-04	.464E-05	.321E+01	.464E-04	.397E-04

## P A R T I C I P A T I N G   M A S S   -   (percent)

MODE	X-SUM	Y-SUM	Z-SUM
1	.000	.000	77.683
2	.000	.000	78.650
3	.000	.000	84.799
4	.000	.000	84.799
5	.000	.000	84.799

PROGRAM:SAP90/FILE:ptrcro.SOL

## M O D E S H A P E S

MODE SHAPE NUMBER 1 PERIOD = .034042 SECONDS

DISPLACEMENTS "U" AND ROTATIONS "R"

JOINT	U(X)	U(Y)	U(Z)	R(X)	R(Y)
1	.000000	.000000	.000000E-03	.000000	.000000
2	.000000	.000000	.045962E-03	.000000	-.073977
3	.000000	.000000	.144728E-03	.000000	-.0106871
4	.000000	.000000	.256966E-03	.000000	-.104898
5	.000000	.000000	.352813E-03	-.000000	-.081147
6	.000000	.000000	.433856E-03	.000000	-.063399
7	.000000	.000000	.477454E-03	.000000	-.018177
8	.000000	.000000	.470385E-03	.000000	.024821
9	.000000	.000000	.430412E-03	.000000	.034708
10	.000000	.000000	.000000E-03	.000000	.000000
11	.000000	.000000	.063709E-03	.096563	.000000
12	.000000	.000000	.187541E-03	.121994	.000000
13	.000000	.000000	.302755E-03	.084481	.000000
14	.000000	.000000	.302755E-03	-.084480	.000000
15	.000000	.000000	.187541E-03	-.121994	.000000
16	.000000	.000000	.063709E-03	-.096563	.000000
17	.000000	.000000	.000000E-03	.000000	.000000
18	.000000	.000000	.000000E-03	.000000	.000000
19	.000000	.000000	.077722E-03	.117802	.000000
20	.000000	.000000	.228789E-03	.148826	.000000
21	.000000	.000000	.369343E-03	.103061	.000000
22	.000000	.000000	.369343E-03	-.103061	.000000
23	.000000	.000000	.228789E-03	-.148826	.000000
24	.000000	.000000	.077722E-03	-.117802	.000000
25	.000000	.000000	.000000E-03	.000000	.000000

MODE SHAPE NUMBER 2 PERIOD = .024711 SECONDS

DISPLACEMENTS "U" AND ROTATIONS "R"

JOINT	U(X)	U(Y)	U(Z)	R(X)	R(Y)
1	.000000	.000000	.000000	.000000	.000000
2	.000000	.000000	.089469E-03	.000000	-.129788
3	.000000	.000000	.250853E-03	.000000	-.148495
4	.000000	.000000	.379387E-03	.000000	-.077167
5	.000000	.000000	.401177E-03	-.000001	.045218
6	.000000	.000000	.280041E-03	.000000	.180846
7	.000000	.000000	.043865E-03	.000000	.260702
8	.000000	.000000	-.235410E-03	.000000	.264757
9	.000000	.000000	-.480626E-03	.000001	.204855
10	.000000	.000000	.000000E-03	.000000	.000000
11	.000000	.000000	.078910E-03	.116537	.000000
12	.000000	.000000	.225763E-03	.139996	.000000
13	.000000	.000000	.353072E-03	.089216	.000000
14	.000000	.000000	.353069E-03	-.089216	.000000
15	.000000	.000000	.225764E-03	-.139993	.000000
16	.000000	.000000	.078913E-03	-.116537	.000000
17	.000000	.000000	.000000E-03	.000000	.000000
18	.000000	.000000	.000000E-03	.000000	.000000
19	.000000	.000000	-.094539E-03	-.139615	.000000

20	.000000	-.000000	-.270474E-03	-.167720	.000000
21	.000000	-.000000	-.422993E-03	-.106884	.000000
22	.000000	-.000000	-.422992E-03	.106884	.000000
23	.000000	-.000000	-.270474E-03	.167718	.000000
24	.000000	-.000000	-.094540E-03	.139616	.000000
25	.000000	.000000	.000000	.000000	.000000

MODE SHAPE NUMBER 3 PERIOD = .010608 SECONDS

DISPLACEMENTS "U" AND ROTATIONS "R"

JOINT	U(X)	U(Y)	U(Z)	R(X)	R(Y)
1	.000000	.000000	.000000	.000000	.000000
2	.000046	.000000	.269533E-03	.000000	-.299900
3	.000066	.000000	.562379E-03	.000000	-.123288
4	.000047	.000000	.500654E-03	.000000	.250109
5	.000000	.000000	.074702E-03	.000030	.463820
6	-.000034	.000000	-.487543E-03	.000000	.420634
7	-.000049	.000000	-.734648E-03	.000000	-.028987
8	-.000035	.000000	-.429822E-03	.000000	-.475388
9	.000000	.000000	.185145E-03	.000076	-.527265
10	.000000	.000000	.000000E-03	.000000	.000000
11	.000000	.000007	.037113E-03	.043881	.000000
12	.000000	.000010	.083103E-03	.028432	.000000
13	.000000	.000007	.092505E-03	-.005772	.000000
14	.000000	.000033	.092564E-03	.005757	.000000
15	.000000	.000046	.083075E-03	-.028507	.000000
16	.000000	.000032	.037034E-03	-.043863	.000000
17	.000000	.000000	.000000E-03	.000000	.000000
18	.000000	.000000	.000000E-03	.000000	.000000
19	.000000	.000042	.091770E-03	.108663	.000000
20	.000000	.000059	.205804E-03	.070599	.000000
21	.000000	.000042	.229297E-03	-.014222	.000000
22	.000000	.000009	.229445E-03	.014235	.000000
23	.000000	.000012	.205832E-03	-.070714	.000000
24	.000000	.000009	.091708E-03	-.108674	.000000
25	.000000	.000000	.000000E-03	.000000	.000000

PROGRAM:SAP90/FILE:ptrcro.F3F

FRAME ELEMENT FORCES					
ELT	LOAD	AXIAL	DIST	1-2 PLANE	
ID	COMB	FORCE	ENDI		
1 -----					
1	.00		.0	-49.06	73.46
			.5	-37.08	49.82
			1.0	-33.53	32.16
2	.00		.0	-34.74	52.05
			.5	-26.49	35.33
			1.0	-23.87	22.74
3	.00		.0	-20.36	30.74
			1.0	-15.11	13.00
2 -----					
1	.00		.0	-33.53	32.16
			1.0	-26.45	2.17
2	.00		.0	-23.87	22.74
			1.0	-18.62	1.50
3	.00		.0	-15.11	13.00
			1.0	-9.86	.52
3 -----					
1	.00		.0	-26.45	2.17
			1.0	-19.36	20.73
2	.00		.0	-18.62	1.50
			1.0	-13.37	14.49
3	.00		.0	-9.86	.52
			1.0	-4.61	6.71
12 -----					
1	.00		.0	43.81	35.51
			1.0	50.89	82.86
2	.00		.0	31.27	25.12
			1.0	36.52	59.01
3	.00		.0	20.61	14.49
			1.0	25.86	37.73
13 -----					
1	.00		.0	-22.46	63.78
			1.0	-29.55	37.78
2	.00		.0	-15.46	44.90
			1.0	-20.71	26.81
3	.00		.0	-4.86	23.73
			1.0	-10.11	16.24

16 -----				
1	.00			
		.0	-43.72	35.48
		1.0	-50.81	82.75
2	.00			
		.0	-31.21	25.10
		1.0	-36.46	58.94
3	.00			
		.0	-20.61	14.49
		1.0	-25.86	37.73
17 -----				
1	.00			
		.0	40.18	61.47
		1.0	33.10	24.83
2	.00			
		.0	29.48	44.97
		1.0	24.23	18.11
3	.00			
		.0	26.96	39.92
		1.0	21.71	15.58
18 -----				
1	.00			
		.0	33.10	24.83
		1.0	26.01	4.73
2	.00			
		.0	24.23	18.11
		1.0	18.98	3.50
3	.00			
		.0	21.71	15.58
		1.0	16.46	3.50
21 -----				
1	.00			
		.0	-11.83	42.57
		1.0	-18.92	27.19
2	.00			
		.0	-8.48	30.97
		1.0	-13.73	19.86
3	.00			
		.0	-5.96	25.92
		1.0	-11.21	17.33
24 -----				
1	.00			
		.0	-33.10	24.83
		1.0	-40.18	61.47
2	.00			
		.0	-24.23	18.11
		1.0	-29.48	44.97
3	.00			
		.0	-21.71	15.58
		1.0	-26.96	39.92



Figure 1 : Vue d'ensemble

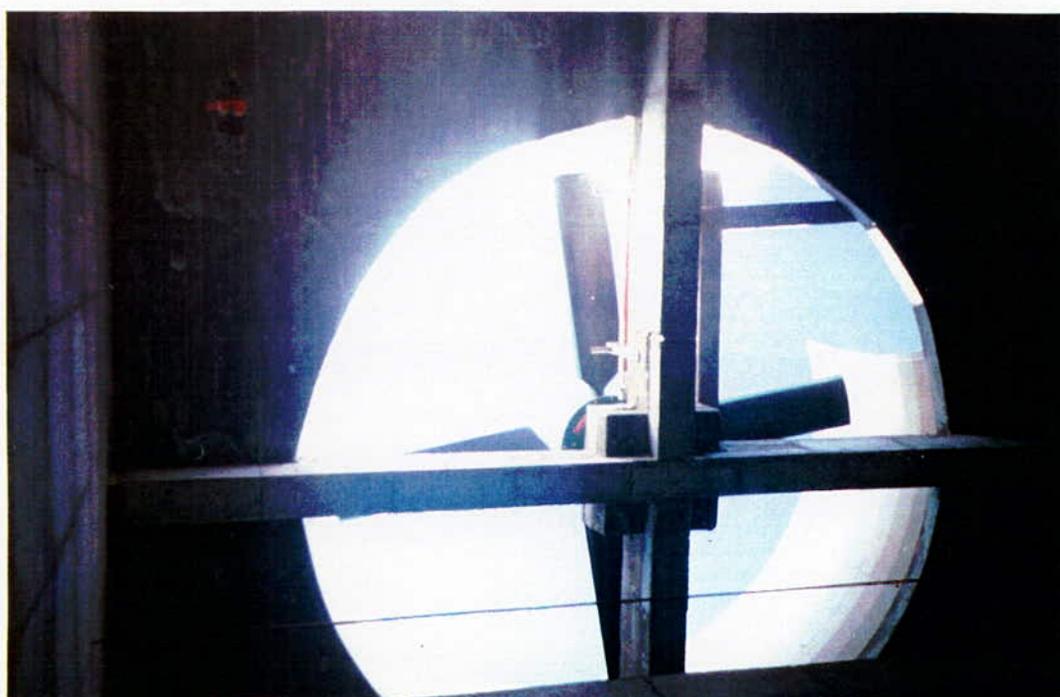


Figure 2 : Poutres croisées supportant l'hélice



Figure 3 : Surface d'échange (lattes en bois).



Figure 4 : Panneaux séparateurs de gouttelettes.

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

## ملخص :

يهدف هذا العمل إلى دراسة سكونية وشاملة لبرج تبريد هوائي بالخرسانة المسلحة، ذوا نظام سحب ميكانيكي، وهذا لتبريد المياه الجوفية عن عمق يزيد على 2500 متر، ذات درجة حرارة مئوية 55° في منطقة جامعة بولاية الوادي (الجنوب الشرقي)، وحفظها إلى ما يقارب 20° لاستعمالها في مجال الري. لقد أنجزت دراسة هذا المشروع وفقا لقانون الخرسانة المسلحة في الحالات الخدية "BAEL83" كما تمت حساب القوى الداخلية في مختلف عناصر الهيكل باستعمال برنامج SAP90، المبني على طريقة العناصر المنتهية وهذا لمعرفة صمودها تحت مختلف الحملات الخارجية. القارئ الكريم، عبر هذا العمل، يمكنه أن يرمى دراسة تحليلية مفصلة حول صمود كل أجزاء المنشأ وكيفية تسليحها.

---

## RESUME :

Ce travail consiste en l'étude d'un réfrigérant atmosphérique en béton armé, à ventilateur aspirant de forme prismatique régulière. Le calcul des efforts internes dans les différents éléments de la construction est effectué en utilisant le logiciel de calcul des structures SAP90 basé sur la méthode des éléments finis.

Cette étude est réalisée conformément aux règlements en vigueur donnés par les BAEL83.

---

## ABSTRACT:

**This work consists in the survey of an atmospheric refrigerator to suction fan of oblong geometric shape. The count of efforts on the different parts of the construction is done while using the software of structure SAP90 count based on the method of elements finished.**

**This survey is achieved consistently to regulations in force given by the BAEL83.**