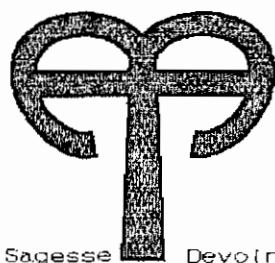


REPUBLIQUE DU SENEGAL

UNIVERSITE CHEIKH ANTA DIOP

ECOLE POLYTECHNIQUE DE THIES



Gm. 0151

DEPARTEMENT DE GENIE ELECTROMECHANIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES

en vue de l'obtention du diplôme d'Ingénieur de Conception

Titre: CONCEPTION ET REALISATION D'UNE ANTENNE PARABOLIQUE
POUR STATION TERRIENNE DE RECEPTION PAR SATELLITE
(Phase II)

Auteurs : Christian Jésus Bayodé FAYOMI
Isaac TAPE
Directeur : Adama D. DIARRA Ing, M.Sc.A
Co-directeur : Maurice DUVAL Ing, PhD
Date : Juillet 1993

A ma Famille

A la mémoire de Nestor FAYOMI

A tous ceux qui me sont Chers

A la mémoire de Ma Mère

A Ma Famille

A Mes Amis

Isaac TAPE

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier tous ceux qui nous ont, de près ou de loin, apporté leur contribution au cours du projet, plus particulièrement:

M. Adama D. DIARRA, en sa double qualité de directeur de projet et représentant délégué de la Compagnie AFSATEL-SYSTEMS, pour sa contribution technique et les renseignements et documents qu'il nous a fournis tout au long de la réalisation de l'ouvrage,

M. Maurice DUVAL, co-directeur, pour son apport technique polyvalent tant au niveau de la réalisation des dessins qu'au niveau des procédés de fabrication,

Le personnel des bibliothèques des Ecoles Polytechniques

- de Thiès et spécialement Mme Philomène R. FAYE

- de Montréal et de Zurich,

Mme Cathérine CAMUS du Service Documentation de la Revue des Télécommunications ALCATEL pour les renseignements,

Mme Anne-Marie SARR, pour la dactylographie du manuscrit,

M. Thomas AQUIN, M. Roger FAYE, M. Ferdinand SENOU pour les renseignements qu'ils ont bien voulu nous apporter,

Les élèves-ingénieurs Clarence MESSIE, Abdou Poulho SOW et Siaka SADIO pour ne citer que ceux-là,

Les Techniciens de l'Ecole Polytechnique de Thiès,

Le personnel de l'imprimerie de l'Ecole Polytechnique de Thiès.

Que tous trouvent ici l'expression de notre profonde gratitude.

AVANT-PROPOS

La conception et la réalisation d'une antenne parabolique, tant dans son approche théorique que pratique, aurait pu se faire aussi bien par un étudiant du Génie Civil que par un autre du Génie Electromécanique puisse qu'il ne s'agit en fait que d'un élément structural baignant dans un environnement (champ) électromagnétique à sous-bassement optique.

Sans réduire l'ensemble de la technique aux deux Génies ci-dessus nommés, nous pouvons néanmoins dire que ce sujet répond donc particulièrement à la formation Polytechnicienne et prouve en même temps la nécessaire ouverture d'esprit dont doit, plus que jamais, faire preuve l'Ingénieur d'aujourd'hui.

SOMMAIRE

CONCEPTION ET REALISATION D'UNE ANTENNE PARABOLIQUE POUR STATION TERRIENNE DE RECEPTION PAR SATELLITE

Le but de notre travail fut de concevoir et de construire une antenne parabolique à monture équatorial d'un diamètre de 5m à partir de matériaux immédiatement disponibles sur le marché Sénégalais.

La parabole est orientée vers les différents satellites géostationnaires par un vérin (ne supportant aucun effort de cisaillement ou de flexion) de 6.672 KN.

Notre hypothèse principale de travail a été que la structure devait supporter un vent de 140 Km/h horizontalement à la surface de la terre [12], [26].

La contrainte de design a été que les éléments de la structure devaient être modulaires.

Pour nos calculs mécaniques nous avons utilisé le code Canadien de la Construction métallique.

Les résultats sont consignés d'une part, dans l'étude économique sous forme de liste d'achat et d'autre part, dans les schémas de montage.

TABLE DES MATIERES

	Pages
Remerciements.....	i
Avant-propos.....	ii
Sommaire.....	iii
Table des matières.....	iv
Liste des annexes.....	vii
Liste des figures.....	viii
Liste des tableaux.....	xi
Listes des dessins.....	xii
Chapitre 1 INTRODUCTION.....	1

Première Partie

THEORIE DE LA TELECOMMUNICATION PAR SATELLITE

Chapitre 2	APPROCHE THEORIQUE.....	3
2.1	Ondes électromagnétiques planes.....	4
2.2	Le stigmatisme rigoureux.....	6
2.3	Expression analytique de l'équation - $QI + QA_i = 0$	7

Chapitre 3	STATIONS TERRIENNES DE RECEPTION	
	PAR SATELLITE	9
3.1	Organisation	9
3.2	Réception.....	12
3.3	Antennes paraboliques.....	14

Chapitre 4	EVALUATION DES STATIONS DE RECEPTION DE	
	SATELLITES DE TELEVISION.....	19
4.1	Bilan de la liaison.....	22
4.2	Facteur de qualité d'une station :	
	Choix du diamètre d'antenne.....	4

Deuxième Partie

LA PARABOLE

Chapitre 5	PARAMETRES GEOMETRIQUES	
	D'UNE ANTENNE PARABOLIQUE.....	36
5.1	Coordonnées du centre de gravité	
	de la parabole.....	37
5.2	Profondeur de la parabole.....	40
5.3	Longueur des lames.....	41
5.4	Surface du réflecteur.....	42
5.5	Angle d'ouverture de la parabole.....	43
5.6	Valeurs de quelques paramètres	
	adimensionnels utiles dans	
	le dimensionnement des antennes.....	44

Chapitre 6	REALISATION DE LA PARABOLE:	
	ANALYSE ET APPROCHE	
	MODULAIRE DE DESIGN.....	47
6.1	Critères de conception.....	48
6.2	Réalisation du gabarit.....	49
6.3	Réalisation du réflecteur.....	53
6.4	Structure arrière du réflecteur.....	57
6.5	Fixation du Cornet.....	60
6.6	Résultats des différentes études dans le cas du prototype de cinq mètres (5m).....	64

Troisième Partie

LE SUPPORT

Chapitre 7	ETUDE ANALYTIQUE DU SUPPORT	65
7.1	Les paramètres de pointage.....	65
7.2	Montage de principe.....	69
7.3	Utilisation du vérin.....	71
7.4	Choix des principaux éléments.....	77
7.5	Récapitulatif des dimensions	89
	CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS.....	90
	ANNEXES.....	92
	BIBLIOGRAPHIE.....	134

LISTE DES ANNEXES

	Pages
ANNEXE A: METHODE D'ETUDE DE LA STRUCTURE	92
ANNEXE B: ETUDE MECANIQUE DE LA STRUCTURE ARRIERE DU REFLECTEUR, CALCUL DES BOULONS ET DE LA STRUCTURE DE SUPPORT DU CORNET.	93
ANNEXE C: ETUDE DE CAS DE LA PARABOLE DE CINQ METRES (5m): EVALUATION DE LA STATION DE RECEPTION	128
ANNEXE D: EVALUATION DU COUT DE L'ANTENNE	132

LISTE DES FIGURES

Pages

Première Partie

THEORIE DE LA TELECOMMUNICATION PAR SATELLITE

Figure 2.1	illustration du chemin optique du rayon d'incidence	6
Figure 3.1	Représentation schématique d'une station individuelle de réception de satellite de télévision	11
Figure 3.2	Trois cas d'éclairement d'une parabole par un même cornet	16
Figure 3.3	Différents types d'antenne paraboliques	18
Figure 4.1	Représentation schématique d'une liaison par satellite de télévision	21
Figure 4.2	Représentation schématique d'une installation d'antenne	30
Figure 4.3	Bruit reçu par l'antenne en fonction de son élévation	33

Deuxième Partie

LA PARABOLE

Figure 5.1	Géométrie et paramètres d'une parabole rapportée à un système d'axe	36
Figure 5.2	Variation de la position x du centre de gravité en fonction de f/D	38
Figure 5.3	Variation de la position z du centre de gravité en fonction de f/D	39
Figure 5.4	Variation de la profondeur p en fonction de f/D	40
Figure 5.5	Variation de la longueur des membrures L en fonction de f/D	41
Figure 5.6	Variation de la surface s du réflecteur en fonction de f/D	42
Figure 5.6	Relation entre l'angle d'ouverture et le rapport f/D	43
Figure 5.7	Variation de f/D en fonction de l'angle d'ouverture	44

Figure 6.1	illustration de la méthode du parallélogramme	49
Figure 6.2	Calcul du profit du gabarit (1 ^{er} cas)	51
Figure 6.3	Calcul du profit du gabarit (2 ^{ème} cas)	52
Figure 6.4	Réalisation d'une antenne à partir de lame	55
Figure 6.5	Utilisation d'une presse pour la réalisation par emboutissage d'une parabole	56
Figure 6.6	Relation entre la hauteur de l'ombre et la distance de la source à l'obstacle	61
Figure 6.7	Relation entre la profondeur p et la largeur de l'ombre portée sur la surface parabolique	62
Troisième Partie LE SUPPORT		
Figure 7.1	Position relative entre lieu A de réception et le lieu S d'émission du satellite	65
Figure 7.2	Angle s entre l'axe équatorial et le rayon incident	67
Figure 7.3	Angle a entre le plan de la parabole et l'axe équatorial	68
Figure 7.4	Montage de principe	69
Figure 7.5	Illustration de la variation de l'angle entre le plan de la parabole et l'axe équatorial	71
Figure 7.6	Illustration de l'utilisation du vérin	72
Figure 5.7	Distance entre le point de fixation du vérin et l'axe équatorial	73
Figure 7.8	Longueur maximale nécessaire du vérin en fonction du bras de levier	74

Figure 7.9	Surface projetée de la parabole pour une force de déséquilibre maximale par le vent	75
Figure 7.10	Effort soumis au vérin	77
Figure 7.11	Moment admissible dans des profilés ronds	79
Figure 7.12	Schéma d'illustration du calcul de déplacement	80
Figure 7.13	Coupe du support principal (le quadrupède)	82
Figure 7.14	Variation comparée entre le moment appliqué au support principal et le moment admissible	83
Figure 7.15	Trace de la partie inférieure de l'étai sur la plaque support	86

LISTE DE TABLEAUX

Première Partie	THEORIE DE LA TELECOMMUNICATION PAR SATELLITE
-----------------	--

Tableau 4.1	Gain d'une antenne en fonction du diamètre et de l'efficacité	35
-------------	--	----

Troisième Partie	LA PARABOLE
------------------	-------------

Tableau 5.1	Paramètres de design des paraboles	45
-------------	------------------------------------	----

Troisième Partie	LE SUPPORT
------------------	------------

Tableau 7.1	Résumé des calculs de dimensionnement	89
-------------	---------------------------------------	----

ANNEXES

Tableau B.1.1.1	Charges de sollicitation de la structure	95
Tableau D.1.1	Frais d'achat de matériau de construction (réflecteur et différents éléments structuraux)	132
Tableau D.1.2	Coût des matières premières du support	133

LISTE DES DESSINS

PLAN N° 001	Configuration de la structure arrières du réflecteur
PLAN N° 002	Structure de la base
PLAN N° 003	Structure arrière Structure de la base support du cornet
PLAN N° 004	Dessin d'ensemble Parabole-support
PLAN N° 005	Dessins de définitions des éléments du support
PLAN N° 006	Dessins de définition des éléments du support

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

Pour diverses raisons, la télévision est devenue, et certainement plus encore pour demain, un élément essentiel de la vie quotidienne. On s'y informe de façon différente et souvent préférable, mais la télévision est surtout devenue un objet de distraction quasi irremplaçable.

Mais, les scènes de distraction, pour continuer à l'être, se doivent d'être les plus diversifiées possibles. Aussi un grand pas a-t-il été fait vers cet idéal lorsqu'en Octobre 1945 Arthur Clarke, jeune Expert Britannique en radioélectricité, publia un article dans lequel il émettait l'idée de combiner la technique des fusées et celle des micro-ondes pour mettre en orbite géostationnaire autour de la terre des satellites artificiels qui serviraient de relais pour des transmissions émanant de la terre.

Le plus intéressant dans l'idée de Sir Clarke est qu'un seul satellite ainsi lancé permet de couvrir environ le tiers du globe terrestre. C'est ainsi qu'il nous est possible de recevoir des images de CNN depuis les USA ou de TV5 depuis l'Europe.

L'outil principal pour la réception de ces images est l'antenne parabolique.

Etant donnés une source réelle et un point image réel, la parabole est le seul élément géométrique capable de réaliser le stigmatisme rigoureux si l'on considère la présence des ondes planes au voisinage du point de réception, supposables en vertu

des équations d'électromagnétisme de MAXWELL établies au 19^e siècle et exigées en raison du principe fondamental d'optique géométrique de FERMAT énoncé au 17^e siècle, pour permettre d'avoir une image correcte, même avec un signal de faible amplitude. Son pouvoir de concentration (Gain) croît avec le carré de son ouverture et ce sont les travaux effectués par notre prédécesseur [6] qui nous ont permis d'opter dès le départ pour une ouverture de 5m.

En fait, ce projet nous a été suggéré par la compagnie AFSATEL-SYSTEMS qui projette de se spécialiser dans la fabrication d'antenne parabolique à partir de matériaux disponibles sur le marché local. L'objectif de cette compagnie est de vulgariser l'implantation de station individuelle de réception. Il s'agira surtout de concevoir un modèle modulaire avec une monture de type équatorial.

Nous avons subdivisé notre rapport en trois principales parties:

1. THEORIE DE TELECOMMUNICATION PAR SATELLITE

2. LA PARABOLE

Il y est calculé les paramètres géométriques (centre de gravité, surface, etc...) et les principaux éléments de réalisation (gabarit, dimensionnement des éléments de la structure de base etc...)

3. LE SUPPORT

Nous y avons également les calculs géométriques, les calculs mécaniques et les étapes de la réalisation pratique.

4. CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Première
Partie

THEORIE DE LA
TELECOMMUNICATION
PAR SATELLITE

CHAPITRE 2

APPROCHE THEORIQUE

Les différents champs en Physique ont ceci de commun qu'ils ont tous été mis en évidence par les forces qu'ils engendraient.

Pour certains, sur toute sorte de masse; pour d'autres, sur toutes sortes de charges électriques.

Mais, par exemple, alors que la force gravitationnelle et la force électrique peuvent être statiques, car dépendant exclusivement des distances entre les objets en interaction, l'interaction magnétique, quant à elle, dépend également de la vitesse de la charge, et est même nulle quand cette dernière le devient. Considérant aussi que les champs magnétiques, eux-mêmes, pouvaient naître du fait des charges en mouvements, Ampère en est arrivé à la conclusion ou, si vous voulez, à l'hypothèse que les phénomènes magnétiques étaient le fait exclusif de charges en mouvement. Et comme les charges qui créent les champs magnétiques se déplacent, on peut dire d'après la loi de Biot et Savart, que le champ magnétique créé par une charge en un point de l'espace dépend donc nécessairement du temps et il est utile de comprendre ici qu'on parle bien d'une charge. Or justement la variation de cette propriété physique dans la temps se traduit par une propagation à travers l'espace environnant. On parle alors d'onde électromagnétique dont le comportement est régit par les équations de Maxwell.

2.1. ONDES ELECTROMAGNETIQUES PLANES

Rappelons les équations de Maxwell; Soit E le champ électrique, B le champ magnétique:

$$1. \nabla \cdot \vec{E} = \frac{\partial E_x}{\partial x} + \frac{\partial E_y}{\partial y} + \frac{\partial E_z}{\partial z} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (2.1)$$

ρ la densité ponctuelle de charge

ϵ_0 la permittivité du vide

$$2. \nabla \cdot \vec{B} = \frac{\partial B_x}{\partial x} + \frac{\partial B_y}{\partial y} + \frac{\partial B_z}{\partial z} = 0 \quad (2.2)$$

$$3. \nabla \times \vec{E} = \left(\frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} \right) \vec{i} + \left(\frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x} \right) \vec{j} + \left(\frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} \right) \vec{k} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.3)$$

$$4. \nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (2.4)$$

μ_0 est la perméabilité magnétique du vide

$\vec{J}$ la densité de courant

Et voyons s'il existe une solution particulière sous la forme d'un couple (E,B) avec E suivant l'axe de y et B suivant l'axe des z et se propageant dans le vide.

On établit alors que, dans ce cas de figure, nous avons les relations suivantes:

Pour B

$$\frac{\partial B}{\partial y} = 0 \quad (2.5)$$

$$\frac{\partial B}{\partial x} = -\epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial E}{\partial t} \quad (2.6)$$

Pour E

$$\frac{\partial E}{\partial z}=0 \quad (2.7)$$

$$\frac{\partial E}{\partial x}=-\frac{\partial B}{\partial t} \quad (2.8)$$

Conclusion : Il importe donc de noter que si le couple (E,B) existe, alors les valeurs de E et B dépendent exclusivement de x i.e sont constantes dans tout plan perpendiculaire à x et bien entendu, ce, à un instant donné. Et comme les axes ont été choisis arbitrairement on peut donc espérer dans tous les sens l'existence d'un tel couple électromagnétique. En dérivant les équations 2.3 et 2.4 on arrive à:

$$\frac{\partial^2 E}{\partial x^2}=\epsilon_0\mu_0\frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \quad (2.9)$$

et

$$\frac{\partial^2 B}{\partial x^2}=\epsilon_0\mu_0\frac{\partial^2 B}{\partial t^2} \quad (2.10)$$

Ce qui signifie, d'après l'équation générale des ondes, que cette solution particulière existe mathématiquement et se propage suivant x à la vitesse de la lumière d'après les équations ci-dessus. Cette vitesse est:

$$c=\sqrt{\frac{1}{\epsilon_0\mu_0}} \quad (2.11)$$

Quand en pratique nous orientons l'ouverture de notre parabole vers le satellite c'est dans l'espoir (confirmé par l'expérience) de recevoir cette onde plane unidirectionnelle ou

toute autre solution qui s'en approche asymptotiquement.

Le pouvoir réfléchissant de la parabole concentre l'information qui est sous forme de champ magnétique (mais identifiable à la lumière) dans le cornet. Le flux à travers le cornet qui en découle donne naissance à une tension plus ou moins importante selon l'amplitude et donc l'énergie que transporte l'onde.

2.2. LE STIGMATISME RIGoureux

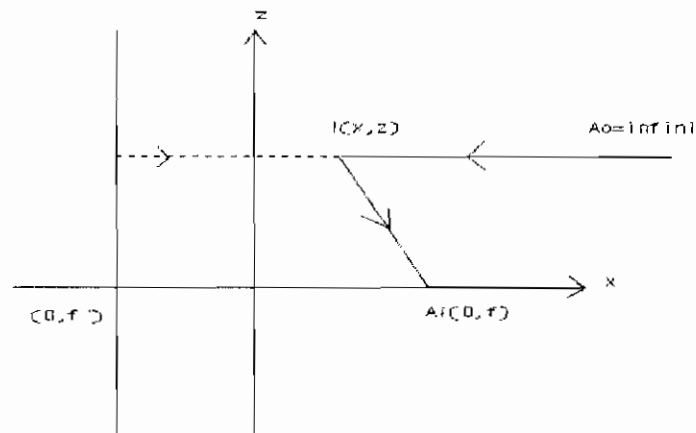


fig 2.1: illustration du chemin optique du rayon d'incidence

Notons A_0 et A_i les points objets et image et I un point de la surface de stigmatisme rigoureux. Le chemin optique entre A_0 et A_i est une constante d'après le principe de Fermat. En notant $L(A_0, A_i)$ ce chemin optique on a :

$$L(A_0, A_i) = n(A_0I + A_iI) = \text{cte}$$

où AB est compté positivement dans le sens réel du déplacement du rayon lumineux et négativement dans le sens virtuel. (on assimile l'onde électromagnétique au rayon lumineux).

Comme, aussi bien le point objet (le satellite) que le point image (le cornet) baigne dans le même milieu i.e le vide on a donc: $A_0I + A_iI = \text{cte}$. Mais, comme nous nous intéressons au couple (E,B) qui se comporte comme passant d'un plan à un autre qui lui est parallèle, on peut évaluer le chemin optique à partir d'un plan donné, sigma. Soit Q un point de ce plan qu'on prendra virtuel i.e tel que les rayons semblent seulement en provenir et qui permette d'avoir: $-QI + IA_i = 0$

2.3.EXPRESSION ANALYTIQUE DE L'EQUATION $-QI + IA_i = 0$

On suppose que A_i est le point de coordonnées $(0, f)$ et que les rayons viennent du plan $x=f'$. Et soit (x, z) les coordonnées de I, un point de la surface de stigmatisme rigoureux. On a donc

$$IA_i^2 = (f-z)^2 + x^2 \quad (2.12)$$

Comme $IA_i = QI$ quel que soit x on a pour $x=0$

$$(f-z(0))^2 = (z(0)-f')^2 \quad (2.13)$$

donc

$$f-z(0) = f'-z(0) \quad (2.14)$$

ou

$$z(0) = \frac{f+f'}{2} \quad (2.15)$$

On peut d'emblée prendre $z(0) = 0$.

La première relation nous donne $f=f'$ et donc que les rayons viennent du plan du cornet et la seconde nous dit que le plan

dont semblent provenir les rayons est symétrique au plan du cornet par rapport l'origine des axes. Donc on a $f=-f'$. Les deux plans ainsi mis en évidence sont appelés les plan focaux.

En faisant $QI^2=IA_1^2$ on obtient finalement

$$x^2 = 4fz \quad (2.16)$$

qui est l'expression analytique de la surface de stigmatisme rigoureux cherchée.

L'antenne parabolique, dont le principe de fonctionnement est basé sur celui de la parabole, fait partie d'un ensemble complexe connu sous le nom de station de réception ou d'émission. Comment est organisée une station terrienne de réception de satellite de télévision et quels sont les paramètres qui permettent de la caractériser ? C'est l'objectif visé par les paragraphes qui suivent.

CHAPITRE 3

STATIONS TERRIENNES DE RECEPTION PAR SATELLITE

Dans ce chapitre nous traiterons des propriétés et caractéristiques des stations terriennes de réception par satellite ainsi que de leur organisation.

3.1. ORGANISATION D'UNE STATION TERRIENNE DE RECEPTION

Le schéma synoptique de la station est représenté à la figure 3.1. On appelle outdoor unit, l'ensemble - externe - constitué par le réflecteur parabolique, les diverses pièces mécaniques assurant la fixation et l'orientation et le LNB (convertisseur-amplificateur faible bruit). L'indoor unit ou démodulateur est l'appareil situé à l'intérieur de l'habitation. Les signaux émis par le satellite sont reçus par l'antenne et transmis au LNB .

Le LNB comprend un oscillateur local de 10 GHz et un mélangeur. Après ce premier changement de fréquence, on récupère tous les signaux émis dans la bande 950 MHz-1750 MHz. Les signaux sont finalement amplifiés avant d'être transmis à l'indoor unit.

Le câble de liaison du LNB au récepteur a deux rôles distincts: de l'intérieur vers l'extérieur, il assure l'alimentation du LNB par une tension comprise entre 15 et 24 V; de l'extérieur vers l'intérieur, la transmission des signaux.

Dans le récepteur, on opère un deuxième changement de fréquence. La fréquence de ce deuxième oscillateur local est variable et c'est ce qui permet la sélection du canal à recevoir. Le signal, à la deuxième fréquence intermédiaire, est filtré et amplifié avant la démodulation finale. Après un traitement supplémentaire, on dispose d'un signal vidéo-composite codé PAL ou SECAM ou encore NTSC et du signal codé. La couleur ne pourra être restituée qu'à la seule condition que le téléviseur soit capable d'interpréter correctement un signal vidéo-composite codé PAL ou SECAM ou NTSC.

En bref, toute station terrestre de réception par satellite se compose de deux parties : la première, externe et solidement fixée, pointée vers un satellite particulier, la deuxième interne est assimilable à un tuner sur lequel on sélectionne le signal à recevoir [21].

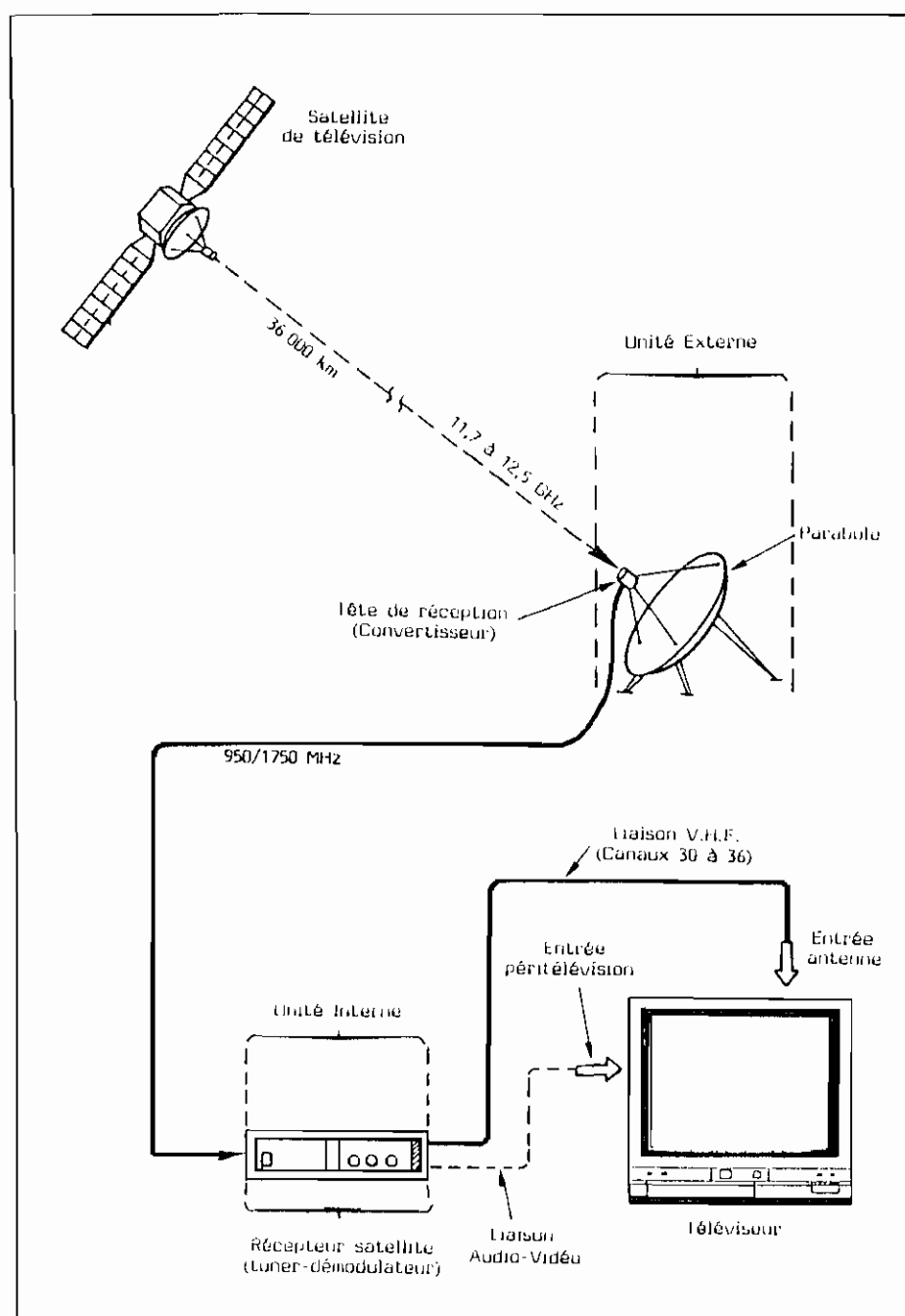


Figure 3.1 : Représentation schématique d'une station individuelle de réception de satellite de télévision

3.2. RECEPTION

3.2.1. Facteur de mérite du système de réception

On caractérise souvent la performance d'une station de réception par son facteur de qualité ou de mérite G/T exprimé en dB, c'est-à-dire :

$$\left(\frac{G}{T}\right) \text{ dB} = 10 \cdot \log\left(\frac{G}{T}\right) = G \text{ (dB)} - 10 \cdot \log T \quad (3.1)$$

Ce facteur, comme on le verra plus tard, est souvent déterminé à la suite d'une étude complète du bilan de la liaison satellite-station de réception [14],[17],[18]. Il permet de calculer le gain G d'une antenne, donc son diamètre, connaissant sa température de bruit T .

3.2.2. Température de bruit

Les perturbations qui limitent les performances d'un système de communication sont de deux types:

- le bruit électrique,
- la bande de fréquences permises au signal transmis.

La température de bruit s'est révélé au cours des expérimentations comme un excellent moyen pour caractériser le bruit des antennes et des récepteurs. On peut la définir comme le rapport $P/(k \cdot B)$ de la puissance de bruit captée sur la bande micro-onde B ou ΔF .

$$T \text{ (}^\circ K\text{)} = \frac{P}{k \cdot \Delta F} \quad (3.2)$$

3.2.3. Gain d'antenne

Le gain est une grandeur qui traduit comment l'énergie micro-onde reçue est concentrée au foyer [14]. Il dépend de trois grandeurs principales à savoir:

- la surface S d'ouverture du réflecteur, donc du diamètre d'antenne;
- la longueur d'onde de l'onde incidente, donc de la fréquence;
- l'efficacité du réflecteur qui dépend de la qualité du réflecteur.

Dans la direction de l'axe de la parabole, le gain G est donné par:

$$G = \frac{4 \cdot \pi \cdot \eta \cdot S}{\lambda^2} \quad (3.3)$$

Or la surface d'ouverture de la parabole est donnée par:

$$S = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad (3.4)$$

Par conséquent, on obtient :

$$G = \eta \cdot \left(\frac{\pi \cdot D}{\lambda} \right)^2 \quad (3.5)$$

Pour les réflecteurs paraboliques, on admet en général une valeur de η variant de 0.5 jusqu'à 0.6.

En pratique l'efficacité η d'une antenne parabolique dépend de plusieurs facteurs parmi lesquels on peut citer:

- la précision de la surface du réflecteur,
- le coefficient de réflexion de cette surface,
- les réflexions et absorptions parasites dues aux obstacles (cornet et son support) situés dans l'ouverture de la parabole,

- le phénomène de débordement dû à une illumination incorrecte du réflecteur par la source (cornet) [14].

On admet de forfaitairement une valeur $n = 0.55$ dans la plupart des réalisations [6]. En tenant compte de la relation entre la longueur d'onde et la fréquence, on obtient :

$$G(dB) = 20.4 + 10 \cdot \log \eta + 20 \cdot \log (F \cdot D) \quad (3.6)$$

où F est exprimée en GHz et D en mètre (m).

Le gain augmente donc avec la fréquence et le diamètre . On voit donc l'intérêt porté aux paraboles de grand diamètre . Il faut atteindre les grandes diamètres pour avoir un gain intéressant aux fréquences basses tandis que, si celles-ci croissent suffisamment ($F \geq 12$ GHz) on peut se contenter d'une parabole de plus petit diamètre [10].

3.3. ANTENNES PARABOLIQUES

3.3.1. Source primaire au foyer

Dans une antenne parabolique la source primaire (feed en anglais) est constituée par un cornet (horn en anglais) dont les propriétés doivent être les suivantes:

- il doit collecter les micro-ondes concentrées au foyer du réflecteur,
- il doit détecter un minimum de bruit et de signaux parasites,
- il ne doit pas ajouter au signal reçu de bruit propre,
- il doit permettre de détecter les signaux avec la bonne polarisation (linéaire ou circulaire) et éliminer les autres.

3.3.1.1. Diagramme de rayonnement et rapport f/D

Un cornet parfaitement adapté doit collecter les micro-ondes issues du réflecteur et rejeter au maximum celles émises par d'autres sources. Autrement dit le cornet doit éclairer ou "voir" uniquement toute la surface du réflecteur (figure 3.2). S'il n'éclaire qu'une partie de la surface l'énergie réfléchie n'est pas collectée; par contre, l'antenne capte moins de bruit terrestre : les lobes parasites sont plus faibles. S'il éclaire plus que la surface du réflecteur, le bruit terrestre capté augmente; les lobes parasites sont plus importants. C'est le phénomène de débordement. Dans le cas d'un éclairage correct, le gain de l'antenne est maximum et les lobes parasites sont réduits.

Dans la pratique, on construit des réflecteurs avec des rapports f/D compris entre 0.3 et 0.6 environ. On comprend donc pourquoi un cornet réalisé pour être adapté à un réflecteur donné, c'est-à-dire avec un certain f/D , peut donner des résultats non satisfaisants avec d'autres réflecteurs ayant des f/D différents. Cependant, à l'heure actuelle, les cornets sont construits de manière à donner une adaptation moyenne avec des réflecteurs ayant différents f/D [14].

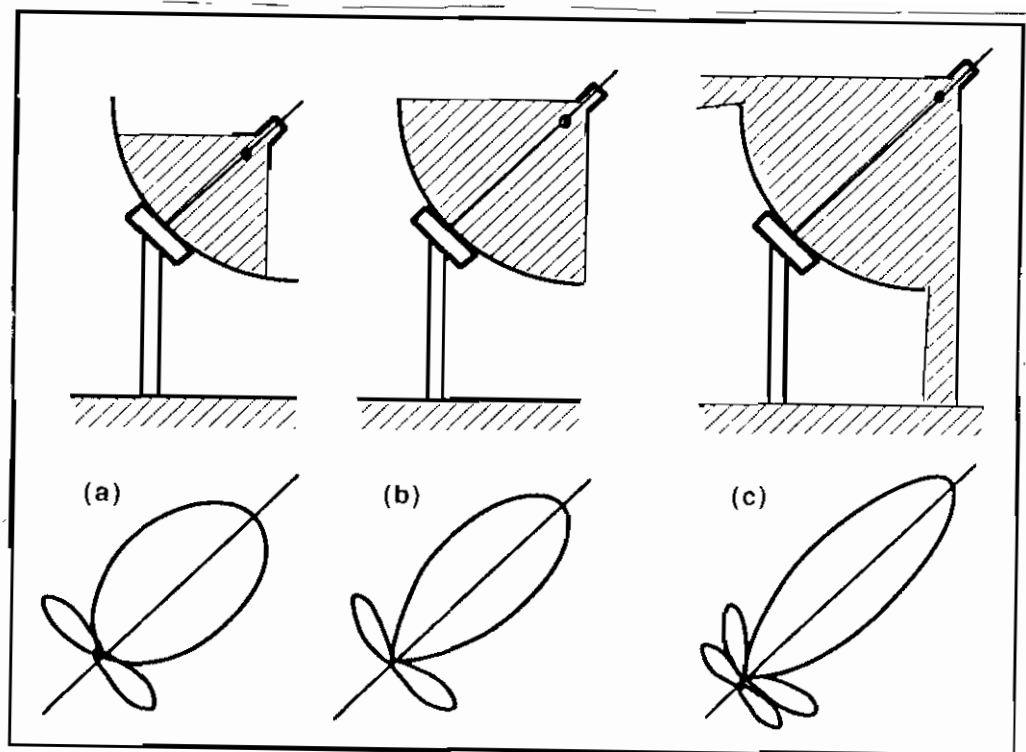


Figure 3.2 : Trois cas d'éclairement d'une parabole par un même cornet (a) sous-éclairement (b) éclairement direct (c) sur-éclairement

3.3.2. Divers types d'antennes

3.3.2.1 La parabole classique

Généralement, la plus connue et la plus courante, elle se présente sous la forme de <<couvercle à poubelle inversée >> de différentes dimensions, pouvant atteindre des dizaines de mètre pour des installations professionnelles internationales.

Quoique bon marché à la production, elle reste un produit cher comparativement aux autres types d'antennes de réception plus récente et plus performante.

3.3.2.2 La parabole <<Cassegrain>>

C'est une extrapolation du modèle antérieur, mais qui a son LNB positionné dans la cuvette au centre. Sa réception se faisant au

travers d'un petit miroir situé en face de la parabole. Ce système évite effectivement les nuisances dues aux intempéries, mais reste très encombrant pour le transport et l'installation. De plus ,il demande un pointage très précis vers le satellite car il reçoit facilement des interférences des autres.

L'antenne Cassegrain de réalisation délicate est relativement chère à construire et est surtout destinée aux professionnelles telles que les Télécommunications utilisant de très grandes installations entre 5 et 30 m de diamètres.

3.3.2.3 La parabole <<Off-set>>

C'est le type d'antenne le plus actualisé et le plus sophistiqué du marché mondial. Tous les inconvénients des systèmes précédents sont effacés. Sa forme ovale ou elliptique sur sa partie haute lui donne le surnom << d'oreille de lapin >>. Pourtant vue du satellite elle forme un rond parfait, il en résulte une maximale au rayonnement du faisceau, sans zone d'ombre.

L'antenne offset a donc une bonne efficacité, mais sa construction est plus délicate et donc un prix de revient plus important que l'antenne classique. Elle nécessite dans la réalisation d'un cornet spécialement adapté.

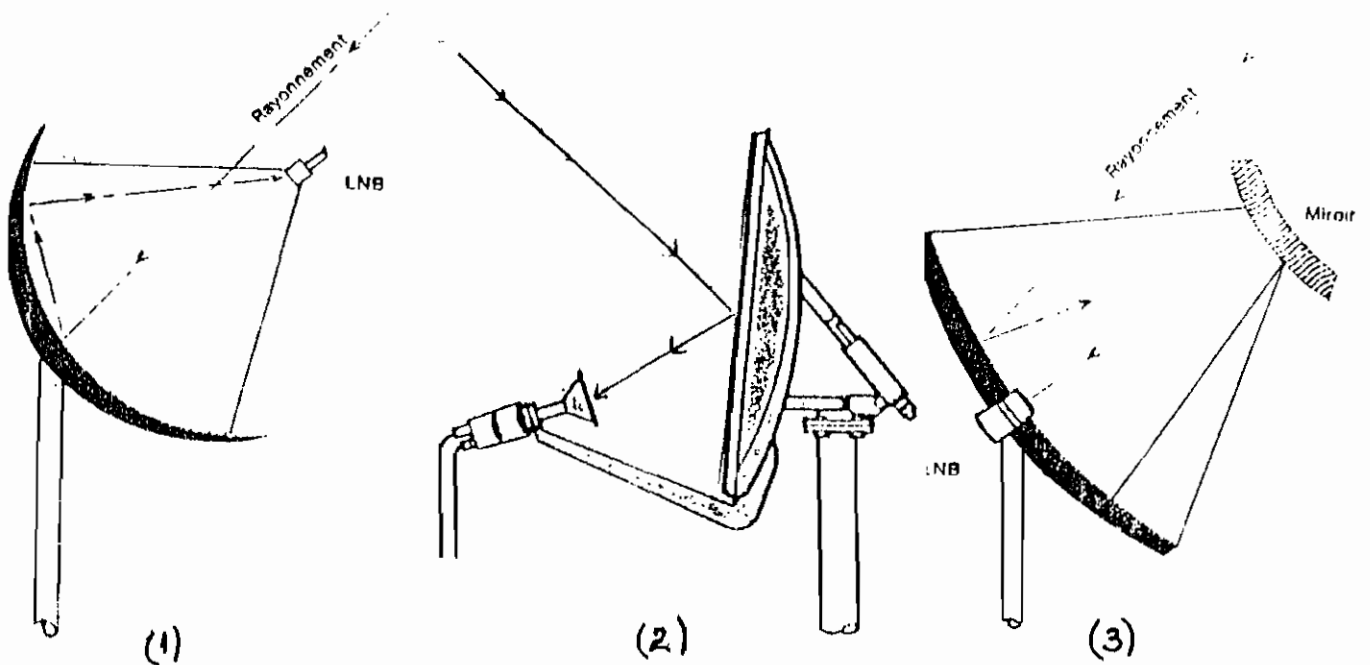


Figure 3.3 : (1) Parabole classique ronde
 (2) Parabole OFFSET
 (3) Parabole Cassegrain

Voilà donc l'essentiel concernant la composition et le fonctionnement des stations de réception par satellite. Dans le domaine grand public de la réception individuelle et collective, c'est surtout l'antenne classique ronde et l'antenne à structure décalée qui sont les plus utilisées.

Les prochaines rubriques nous fourniront plus d'éclaircissement sur les divers paramètres utiles pour l'évaluation des stations terriennes.

CHAPITRE 4

EVALUATION DES STATIONS DE RECEPTION DE SATELLITES DE TELEVISION

Un système de transmission d'informations, et en particulier de télévision par satellite (figure 4.1) [5],[14] comprend les éléments suivants:

- la **station terrestre d'émission**: centre où sont élaborés les signaux à transmettre.

Ces signaux sont transmis par câble, fibre optique ou relais hertzien à la station d'émission proprement dite ou liaison montante;

- la **liaison montante** constituée de l'émetteur. Dans l'émetteur, un signal micro-onde est modulé par l'intermédiaire du signal d'information. Le signal ainsi modulé est envoyé à l'antenne terrestre qui le rayonne en direction de l'antenne réceptrice du satellite géostationnaire.

- le **satellite géostationnaire** joue le rôle de relais du signal micro-onde. Le faisceau micro-onde capté par l'antenne de réception du satellite géostationnaire ayant une puissance extrêmement faible inférieure au microwatt, il est alors amplifié de plusieurs milliers de fois, puis sa fréquence est changée et il est réémis en direction de la terre. La fréquence des signaux reçus se situe entre 14 et 20 GHz ; elle se situe entre 10.95 et 12.75 GHz pour les signaux réémis (pour éviter les interférences);

- la **liaison descendante**: elle est surtout due au rayonnement de

la puissance du satellite vers la surface terrestre. Le niveau de puissance en un point est mesuré en terme de PIRE en dB (Puissance Isotrope Rayonnée Equivalente) par rapport au Watt; - enfin la station terrestre de réception.

Nous étudierons dans les lignes à suivre, les différents facteurs pouvant agir sur la transmission et comment on peut les quantifier.

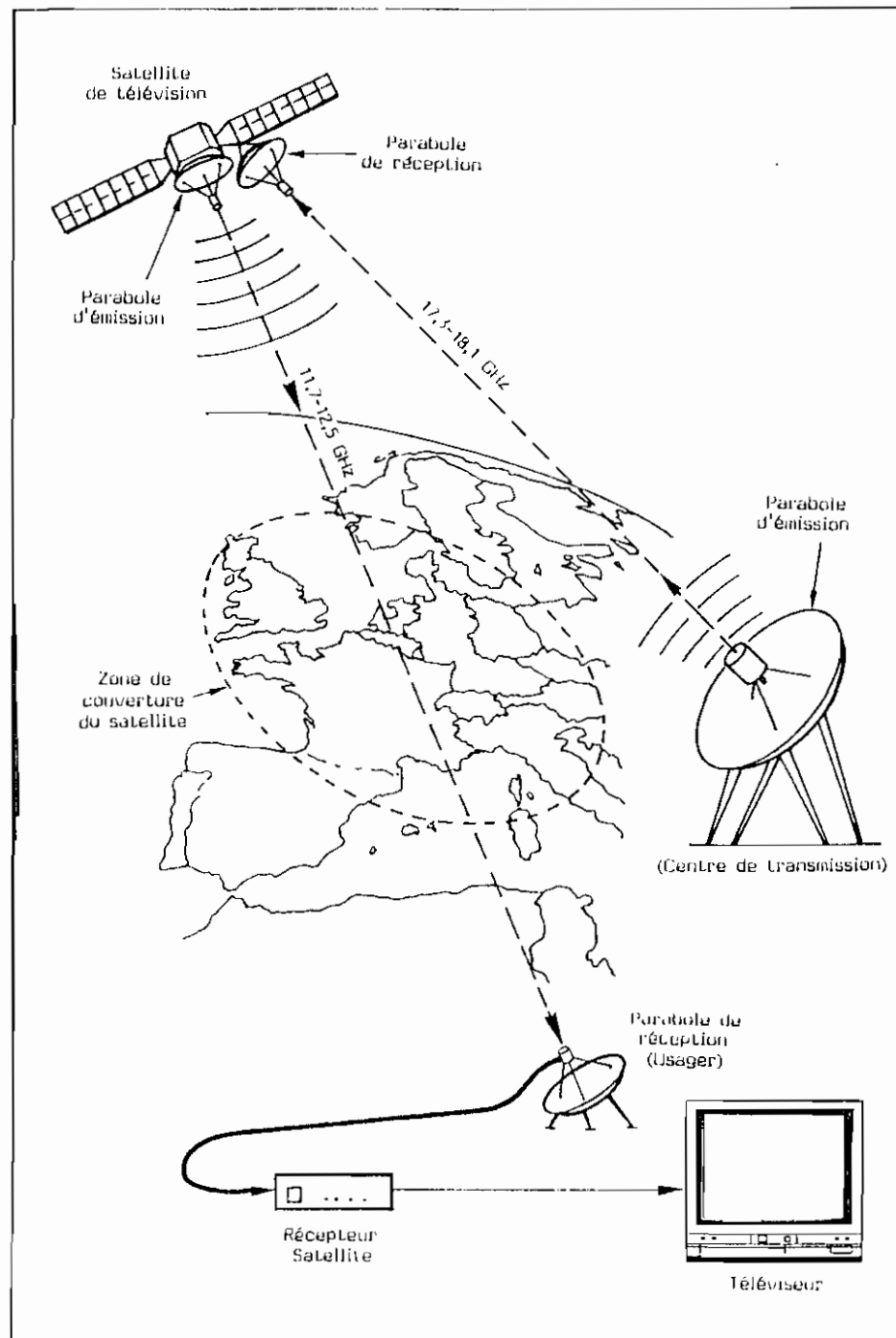


Figure 4.1 : Représentation schématique d'une liaison par satellite de télévision

4.1. BILAN DE LA LIAISON

Le choix du diamètre de l'antenne parabolique de la station de réception ainsi que celui du LNB est lié à la qualité de la liaison satellite-station de réception. Il va dépendre de la puissance d'émission du satellite, de l'affaiblissement standard et momentané (pluies, orages, ...) au cours de la propagation du signal micro-onde, des erreurs de pointage et des déformations de l'antenne de réception, des erreurs de polarisation dues aux obstacles environnant le site de réception. Tous ces facteurs limitatifs peuvent être exprimés sous forme d'une équation qui caractérise le bilan de la liaison [13],[14].

4.1.1. Equation des télécommunications

4.1.1.1 Relation fondamentale

Considérons une liaison idéale, c'est-à-dire sans perte entre l'antenne d'émission du satellite et l'antenne de réception.

Le gain de l'antenne de réception G_R , la distance satellite-station de réception d et la PIRE du satellite nous conduisent à la puissance disponible à l'entrée du récepteur. Si l'émetteur E était équipé d'une antenne isotrope (rayonnement identique dans toutes les directions), le flux de puissance P_E sortant d'une sphère de centre E et de rayon d , serait uniformément réparti à la surface de cette sphère.

Par unité de surface, ce flux de puissance serait:

$$\Phi = \frac{P_E}{4 \cdot \pi \cdot d^2} \quad (4.1)$$

Comme l'antenne de l'émetteur présente un gain G_E , la densité de flux de puissance dans cette direction est donc:

$$P_{ES} = \frac{P_E \cdot G_E}{4 \cdot \pi \cdot d^2} \quad (4.2)$$

Le produit $P_E \cdot G_E$ est la Puissance Isotrope Rayonnée Equivalente (PIRE). L'antenne de réception, placée à une distance d du satellite, a une surface effective S_{ER} et prélève la puissance P_R . Cette puissance reçue s'exprime par la relation:

$$P_R = \frac{P_E \cdot G_E}{4 \cdot \pi \cdot d^2} \cdot S_{ER} \quad (4.3)$$

Le gain de l'antenne à réflecteur parabolique et sa surface équivalente S_{ER} étant liés par la relation:

$$G_R = \frac{4 \cdot \pi \cdot S_{ER}}{\lambda^2} , \quad (4.4)$$

on en déduit:

$$\frac{P_R}{P_E} = G_E \cdot G_R \cdot \left(\frac{\lambda}{4 \cdot \pi \cdot d} \right)^2 \quad (4.5)$$

L'affaiblissement en puissance correspondant à cette atténuation est l'inverse du rapport précédent. Il s'exprime sous forme logarithmique par:

$$a_i (dB) = 10 \cdot \log \left[\left(\frac{4 \cdot \pi \cdot d}{\lambda} \right)^2 \cdot \frac{1}{G_E \cdot G_R} \right] \quad (4.6)$$

ou encore, plus simplement:

$$a_i (dB) = 22 + 20 \cdot \log \left(\frac{d}{\lambda} \right) - G_E - G_R \quad (4.7)$$

On constate que lorsque les gains d'antenne sont fixés, l'affaiblissement varie comme $(22 + 20 \cdot \log(d/\lambda))$ dB qui est l'affaiblissement en espace libre entre deux antennes isotropes.

Il ne faut pas en tirer la conclusion hâtive sur l'inconvénient des fréquences élevées car si l'augmentation de fréquence entraîne une augmentation de l'affaiblissement de propagation, elle entraîne aussi une augmentation du gain des antennes d'émission et de réception (voir relation (3.6)).

4.1.1.2 Cas réel- Pertes diverses

L'affaiblissement exprimé par la relation précédente, ne tient pas compte des pertes dues à la propagation et aux défauts de la station de réception que nous allons analyser maintenant.

Pour tenir compte des pertes réelles, on introduit un terme correctif A_r dans la relation; ce qui permet d'écrire :

$$a_r \text{ (dB)} = 10 \cdot \log \left[\left(\frac{4\pi \cdot d}{\lambda} \right)^2 \cdot \frac{A_r}{G_R \cdot G_E} \right] \quad (4.8)$$

Le coefficient global A_r [14] contient:

- les pertes dues à la propagation dans l'ionosphère et l'atmosphère;
- les pertes dues aux erreurs de pointage de l'antenne de réception;
- les pertes dues à la polarisation;
- les pertes dues aux obstacles environnant la station;
- les pertes dues aux désadaptations diverses à l'intérieur de la station.

La puissance disponible à l'entrée du récepteur s'exprime finalement par la relation:

$$P_R = P_E \cdot \frac{G_E \cdot G_R}{A_r} \cdot \left(\frac{\lambda}{4 \cdot \pi \cdot d} \right)^2 \quad (4.9)$$

On peut à partir de cette expression, établir la relation qui donne le rapport Signal sur Bruit, c'est-à-dire le rapport de la puissance S du signal reçue dans la bande de fréquence B=DF donnée (bande passante du récepteur), sur la puissance de bruit N (Noise). En se rappelant que la puissance de bruit est donnée par le théorème de Nyquist [22]: $N = k \cdot T \cdot B$, on exprime le rapport en dB par :

$$\frac{S}{N} = 10 \cdot \log \left[P_E \cdot \frac{G_E \cdot G_R}{k \cdot T \cdot B \cdot A_r} \cdot \left(\frac{\lambda}{4 \cdot \pi \cdot d} \right)^2 \right] \quad (4.10)$$

Dans le cas où la puissance reçue est celle d'une porteuse pure, c'est-à-dire non modulée, que l'on désigne par la lettre C (Carrier en anglais), on remplace S par C dans la relation précédente [14]. On obtient alors la relation :

$$\frac{C}{N} (dB) = 10 \cdot \log(P_E \cdot G_E) + 10 \cdot \log(G_R) - 20 \cdot \log\left(\frac{4 \cdot \pi \cdot d}{\lambda}\right) - 10 \cdot \log(A_r) - 10 \cdot \log(k \cdot T \cdot B) \quad (4.11)$$

où les termes successifs du membre de droite représentent:

- la **PIRE** du satellite;
- le **gain** de l'antenne parabolique de réception;
- l'**affaiblissement en espace libre** en fonction de la distance et de la longueur d'onde;
- l'**affaiblissement dû à la propagation** et autres causes;
- la **puissance de bruit totale**, c'est-à-dire de l'antenne, du LNB et d'autres composantes du récepteur.

On peut mettre la relation précédente sous forme plus simple qui sert pratiquement à estimer la qualité de la liaison, c'est-

à-dire de l'image de réception de télévision au niveau du récepteur :

$$\frac{C}{N} (dB) = E + G - A - 10 \cdot \log T - 10 \cdot \log B - 10 \cdot \log k \quad (4.12)$$

- E : PIRE du satellite en dBW;
G : gain de l'antenne parabolique de réception en dB;
A : atténuation globale en dB;
T : température de bruit de l'antenne et du LNB;
B : largeur de bande FI du récepteur ;
avec $10 \cdot \log k = - 228.6 \text{ dB}$.

En modulation de fréquence, le bruit se manifeste par l'effet de capture qui conduit à une rapide dégradation du signal à la démodulation. Il est généralement admis que la valeur minimale de C/N est de l'ordre de 8 dB mais il est déconseillé de ne pas descendre en dessous de 12 dB [17], [18]. Le rapport signal sur bruit pour le signal d'image démodulé est donné par :

$$\left(\frac{S}{B}\right) = \left(\frac{C}{N}\right) + 29.9 \text{ en dB} \quad (4.13)$$

Une très bonne qualité avec est obtenue avec des rapports S/B supérieurs à 40 dB [18].

4.1.2. Estimation des différents paramètres influençant le bilan de la liaison

4.1.2.1 PIRE ou Empreinte E du satellite

La PIRE ou Puissance Isotrope Rayonnée Equivalente, souvent employée dans les notes comme un nom commun d'où pire s'exprime en dBW. La pire est fournie par des organismes de diffusion

nationales ou internationales comme TDF, EUTELSAT, la SES, etc... Elle est généralement précisée schématiquement sur des cartes géographiques, sur des tracés dits iso-pire(s). Les différentes zones délimitées peuvent présenter sur le terrain écart avec celles prévues théoriquement [18].

C'est le cas particulièrement dans les sites excentrés du point de visée du satellite, d'où une première contrainte pouvant influencer le résultat recherché. En général la couverture pratique est meilleure que la couverture théorique définie en laboratoire avec le diagramme de rayonnement de l'antenne d'émission. Celle-ci peut-être attribué à plusieurs origines, comme la meilleure stabilité du satellite qui permet d'exploiter d'une façon optimum les zones moyennes et de surcroît excentrées, des lobes secondaires tout à fait exploitables.

4.1.2.2 Facteur de bruit de la tête hyperfréquence

Le facteur de bruit F d'un amplificateur-convertisseur faible bruit LNB peut s'exprimer en fonction de la température de bruit en Kelvin ($^{\circ}\text{K}$) par:

$$F \text{ (dB)} = 10 \cdot \log\left(1 + \frac{T}{290}\right) \quad (4.14)$$

Nous avons retenu la meilleure tête d'hyperfréquence disponible actuellement sur le marché dont le facteur de bruit (F) est proche de 0.8 ($T_b = 58.7^{\circ}\text{K}$). Mais certains constructeurs prévoient un F de 0.7 voire 0.6 dB dans les prochaines années. Le fait de pouvoir passer, par exemple d'un facteur de bruit F de 1.2 dB à 0.6 dB soit une diminution de moitié, laisse prévoir une amélioration du rapport C/N de 3 dB, ce qui reste fort

intéressant dans les sites dits difficiles. Il sera donc possible de réduire le diamètre des antennes. Nous rappelons, une fois de plus, que le facteur de bruit du LNB est un paramètre primordial pour une bonne réception, d'où l'intérêt à vérifier si sa valeur est suffisamment faible suivant le diamètre d'antenne utilisé.

4.1.2.3 Largeur de bande B du récepteur

Elle est fixée par convention à 27 MHz et dite large bande lorsqu'elle est complétée, suivant le syntoniseur, par une seconde bande FI dite étroite, généralement de 16 MHz [18]. Dans la suite du texte nous retenons la bande nominale de 27 MHz.

Dans certains sites éloignés du point de visée du satellite (cas des pays sub-sahariens) où la pire est généralement faible, il peut être exceptionnellement utilisée la bande étroite permettant un gain de 2.5 dB C/N (voir relation(4.12)).

4.1.2.4 Atténuation globale ou Affaiblissement global

Il comprend les affaiblissements en espace libre, atmosphériques et celui dû aux précipitations.

4.1.2.4.1 Affaiblissement en espace libre A_1

De l'équation 4.11, on remarque que l'affaiblissement en espace libre A_1 est donné en fonction de la longueur d'onde du signal par la relation ci-après:

$$A_1 (dB) = 20 \cdot \log\left(\frac{4\pi \cdot d}{\lambda}\right) \quad (4.15)$$

Exprimée en fonction de la longueur de la fréquence on obtient:

$$A_1 \text{ (dB)} = 32.44 + 20 \cdot \log(F \cdot d) \quad (4.16)$$

Deux paramètres F et d interviennent dans le calcul de A_1 . On montre aisément que dans la bande de 12 GHz $A_1 = 205.07$

4.1.2.4.2 Affaiblissement atmosphérique A_2 et affaiblissement dû à la pluie A_3

Les expériences effectuées ont montrées que $A_2 = 0.3$ dB et qu'en cas de précipitations la qualité de l'image se trouve améliorée (à cause de la réduction de la température de bruit du système), avec un gain de 1.2 dB C/N. Autrement dire alors que $A_3 = -1.2$ dB [17], [18].

A toutes ces pertes s'ajoutent:

- les pertes de dépointage (lors de l'installation): données par $0.5 + 0.8 D^2$ dB pour les antennes de diamètre D inférieur ou égal à 1 m. Au delà les pertes sont estimées forfaitairement à 1.3
- les pertes de vieillissement et de dépolarisation: elles sont de l'ordre de 0.5 dB;
- les pertes de couplage: elles excèdent rarement la valeur de 0.5 dB.

La somme des pertes diverses dues aux erreurs de pointage, à l'écart de polarisation et autres : $A_{\text{polar}} + A_{\text{couplage}} + A_{\text{atmosphère}}$ peut donc être évaluée à quelques dB. Il semble raisonnable de choisir une valeur comprise entre 3 et 6 dB (par ciel sans précipitations) [21]. Les autres paramètres intervenant dans le bilan seront analysés dans les lignes qui suivent.

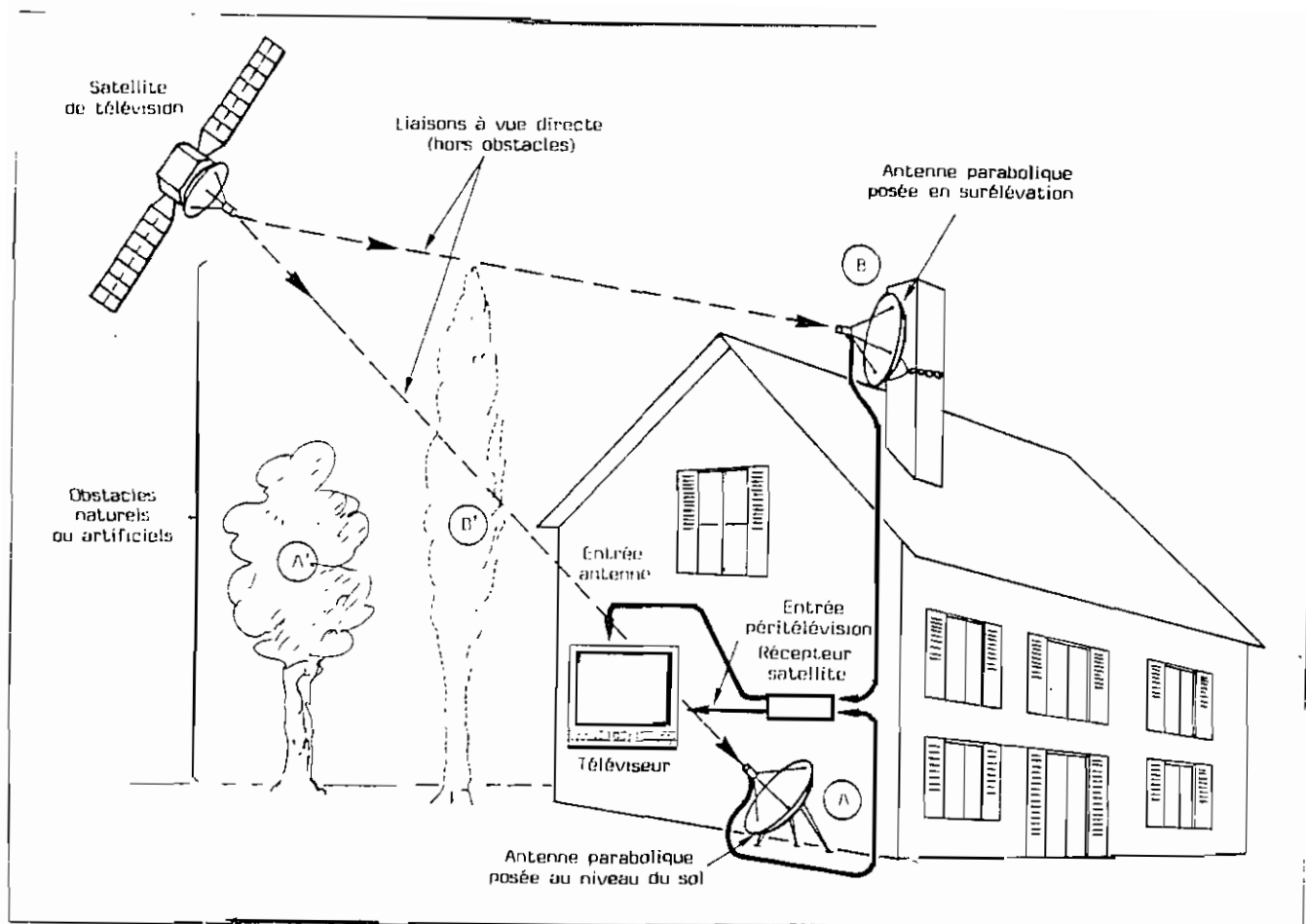


Figure 4.2 : Représentation schématique d'une installation d'antenne

4.1.2.5 Température de bruit

4.1.2.5.1 Température de bruit T_{LNB} de l'amplificateur-convertisseur

Le bruit provenant de l'antenne et de l'entrée du récepteur limite la qualité de l'image. En l'absence de brouillage par d'autres émissions, le bruit est le facteur déterminant de la sensibilité de l'amplificateur-convertisseur [14]. Ce dernier vu de son entrée est caractérisé par son facteur de bruit F . Comme nous l'avons déjà vu, le facteur de bruit F peut-être exprimé sous forme de température en degré Kelvin $^{\circ}K$. la relation suivante:

$$T (^{\circ}K) = 290 \cdot (-1 + 10^{\frac{F}{10}}) \quad (4.17)$$

permet de passer du facteur de bruit F (dB) exprimée en décibels au facteur de bruit exprimé en degrés Kelvin K ou température de bruit de l'amplificateur-convertisseur.

Comment se définit F dans la pratique ?

A l'entrée du récepteur (entendez par là, collectionneur d'onde ou amplificateur-convertisseur) on connecte un générateur constitué par une résistance R_0 qui produit un rayonnement thermique du fait de sa température T_0 . On considère alors une température normale ambiante généralement prise à 290 ou 293 °K. A la sortie d'un amplificateur de gain en puissance G et dans une bande de fréquence Δf_0 , la puissance de bruit produite par la seule résistance R_0 a pour valeur :

$$W_{Bo} = k \cdot T_0 \cdot \Delta f_0 \cdot G \quad (4.18)$$

En réalité, les circuits d'entrée de l'amplificateur comporte des sources de bruits propres et la puissance de bruit mesurée est W_B qui est supérieure à W_{Bo} .

Le rapport $F = W_B / W_{Bo}$ représente le facteur de bruit du récepteur. Tout se passe comme si la résistance R_0 du générateur considéré comme une seule source de bruit était portée à une température $t_0 + T_0$ telle que:

$$W_B = k \cdot \Delta f_0 \cdot G \cdot (t_0 + T_0) \quad (4.19)$$

L'accroissement fictif de température t_0 est dit température de bruit du récepteur [21]. On a finalement $F = 1 + t_0 / T_0$
En pratique $T_0 = 290$ °K et t_0 est connue sous l'appellation T_{LNB}

ou T_{LNC} .

4.1.2.5.2 Température de bruit T_A de l'antenne

Le bruit d'une antenne caractérise la quantité de signaux parasites que le réflecteur capte [14]. Une bonne antenne doit donc avoir une température de bruit faible, c'est-à-dire capter le minimum de bruit. Si l'antenne était de grand diamètre, elle aura une largeur de faisceau ($B^\circ = 21/(F.D)$ [21]) petite, elle captera du bruit thermique émis par le sol via ses lobes parasites.

D'autre part la température de bruit d'une antenne décroît si elle est pointée vers le ciel, car elle capte moins de bruit thermique rayonnée par le sol. Par contre, si à la limite on dirige directement l'antenne vers le sol, le signal capté correspond au bruit émise par le sol qui est en moyenne $\theta=17^\circ\text{C}$ soit à la température absolue $T_A=290^\circ\text{K}$. Il faut cependant garder à l'esprit que T_A dépend de plusieurs paramètres parmi lesquels on peut citer:

- les phénomènes atmosphériques;
- la hauteur du réflecteur par rapport au sol;
- le coefficient de réflexion R du sol;
- la bande de fréquence et l'angle d'élévation etc...

L'effet combiné de ces différents paramètres nous permettent de quantifier la température de bruit résultant de l'antenne.

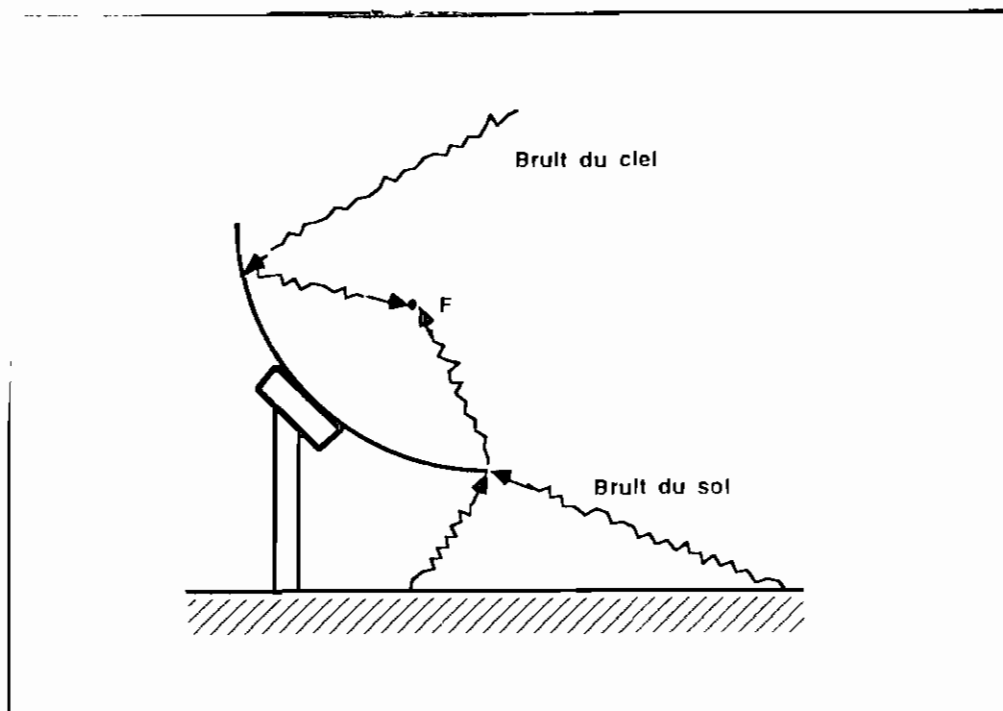


Figure 4.3 : Suivant son élévation l'antenne reçoit directement le bruit du ciel et indirectement par diffraction le bruit terrestre

4.1.2.5.3 Température globale de bruit T ramenée à l'entrée du récepteur ou syntoniseur

A l'entrée du syntoniseur tout se passe comme si le système réflecteur-LNB avait une température de bruit égale à:

$$T = T_A + T_{LNB} \quad (4.20)$$

où T_A et T_{LNB} sont comme définis précédemment.

4.2. FACTEUR DE QUALITE D'UNE STATION : CHOIX DU DIAMETRE D'ANTENNE

Le facteur de qualité caractérise souvent les performances des stations de réception. Il est exprimé en dB par la relation 3.1 déjà connue: $(G/T) \text{ dB} = 10 \cdot \log(G/T)$.

A partir de l'équation 4.12, exprimant le bilan de la liaison on obtient la formule utilisée pour l'évaluation des stations de réception:

$$\left(\frac{G}{T}\right) \text{ dB} = \frac{C}{N} - E + A + 10 \cdot \log B + 10 \cdot \log k \quad (4.21)$$

Cette expression permet de calculer le gain G d'une antenne parabolique si l'on connaît T et par conséquent de choisir le diamètre du réflecteur parabolique.

Ce choix suit une procédure assez simple. En fonction de la pire E des satellites dont on veut recevoir les émissions (voir les courbes iso-pires), on se fixe une qualité d'image, autrement dit, on choisit une valeur de C/N . On choisit ensuite la meilleure valeur du facteur de bruit du LNB disponible sur le marché, ce qui nous permet de déterminer T donc la valeur en dB du gain G de l'antenne. On en déduit ensuite aisément le diamètre D du réflecteur, une fois qu'on s'est fixé une efficacité lors de la fabrication. Nous donnons à titre indicatif les valeurs de G dans la bande de 12 GHz, pour différents diamètres d'antenne, et cela en fonction de l'efficacité du réflecteur.

Diamètres D (m)	Efficacités			
	0.65	0.6	0.55	0.5
0.5	34.09	33.74	33.37	32.95
1	40.11	39.77	39.39	38.97
1.2	41.70	41.35	40.97	40.56
1.5	43.63	43.29	42.91	42.50
1.8	45.22	44.87	44.49	44.08
2	46.13	45.79	45.41	44.99
2.4	47.72	47.37	46.99	46.58
3	49.66	49.31	48.93	48.52
3.1	49.94	49.59	49.21	48.80
3.8	51.71	51.36	50.98	50.57
4.5	53.18	52.83	52.45	52.04
4.8	53.74	53.39	53.01	52.60
5	54.09	53.74	53.37	52.95
6	55.68	55.33	54.95	54.54

**Tableau 4.1 : Gain d'antenne en fonction du diamètre
pour différentes valeurs de l'efficacité**

Deuxième
Partie

LA PARABOLE

CHAPITRE 5

PARAMETRES GEOMETRIQUES D'UNE ANTENNE PARABOLIQUE

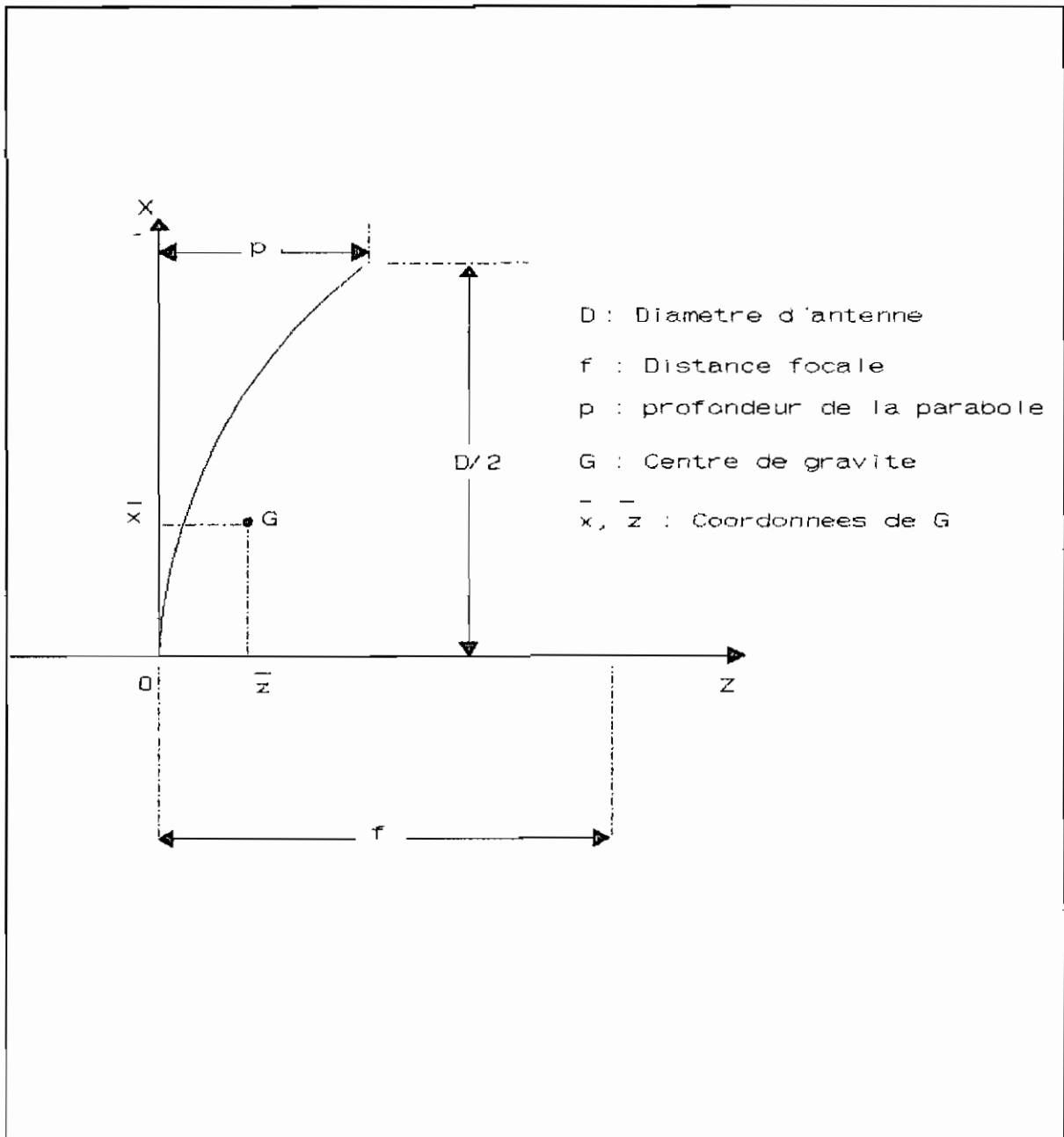


Figure 5.1 : Géométrie et paramètres d'une parabole rapportée au système d'axes (OX, OZ)

La fabrication d'une parabole demande une qualification professionnelle certaine car, il faut obéir à des lois mathématiques précises, penser avec le jugement d'un opticien, travailler avec le talent d'un chaudronnier et mettre au point avec les connaissances d'un bon spécialiste de l'électronique de haute fréquence.

Il n'est donc pas vain de tenter l'expérience d'une réalisation qui, faite selon les règles dictées, captera les satellites avec un rendement acceptable.

Toutefois, nous ne pensons pas raisonnable de vouloir bricoler un convertisseur, car il exige un matériel sélectionné, une maîtrise parfaite et les possibilités d'un spécialiste des hyperfréquences, notamment en ce qui concerne l'arsenal de mesure nécessaire pour la mise au point de ce délicat accessoire.

Dans ce chapitre, nous définirons les paramètres adimensionnels indispensables à toutes réalisations d'antenne.

5.1. COORDONNEES $\bar{x}$ ET $\bar{z}$ DU CENTRE DE GRAVITE DE LA PARABOLE

5.1.1 Position $\bar{x}$ du centre de gravité

La position x du centre de gravité d'une courbe plane d'équation $z(x) = f(x)$ est donnée [4] par la relation (5.1) ci-dessous, relation dans laquelle $z(x) = x^2/(4 \cdot f)$ (désigne l'équation de la parabole et L la longueur d'une branche de celle-ci).

$$\bar{x} = \frac{1}{L} \cdot \int_0^{\frac{D}{2}} x \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{dz}{dx}\right)^2} \cdot dx \quad (5.1)$$

Par intégration par parties on obtient la relation (5.2) donnant le rapport x/D en fonction du coefficient f/D ,

caractéristique du cornet et du réflecteur.

On pose $A(c) = 4 \cdot c$ et $x(c) = \bar{x}/D$ avec $c = f/D$

$$x(c) = \frac{1}{3} \cdot \frac{\frac{(1+A(c)^2)^{\frac{3}{2}}}{A(c)} - A(c)^2}{\frac{\sqrt{1+A(c)^2}}{A(c)} + A(c) \cdot \operatorname{argsh} \frac{1}{A(c)}} \quad (5.2)$$

La variation de $x(c)$ en fonction de c est illustrée sur la figure ci-après.

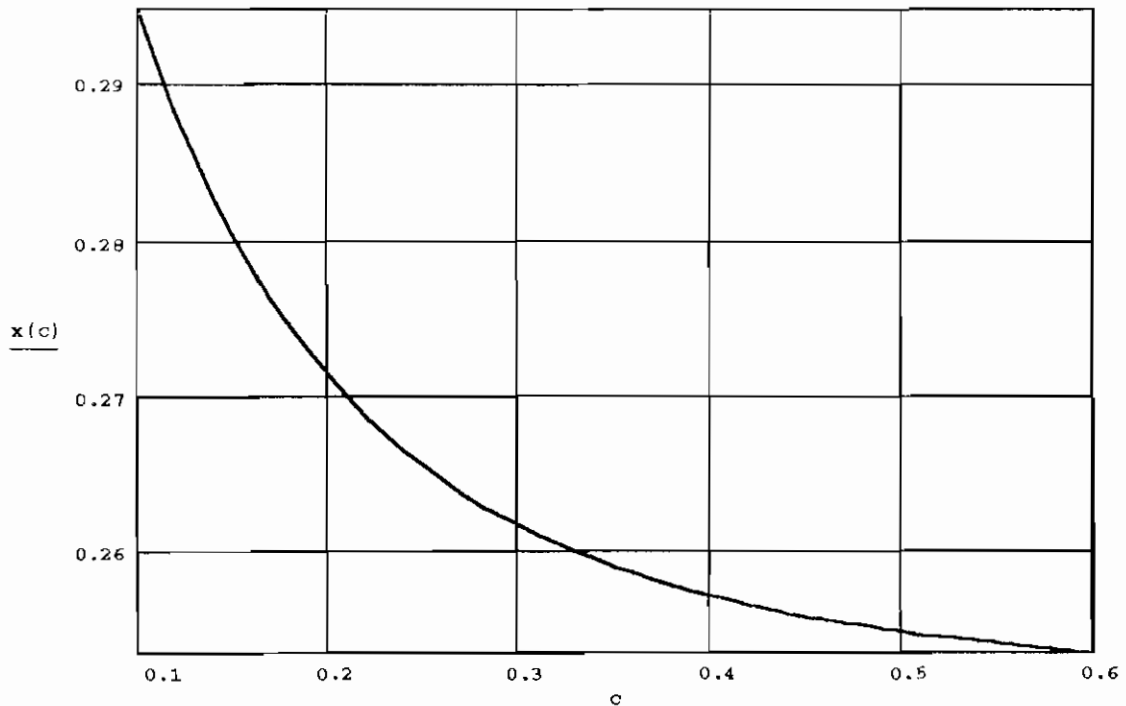


Figure 5.2 : Variation de la position $\bar{x}$ du centre de gravité en fonction de f/D

Dans le cas particulier où $f/D = 0.3$ (Design du prototype de 5 m) on obtient $x(0.3) = 0.262$

5.1.2. Position $\bar{z}$ du centre de gravité du réflecteur

La relation ci-après

$$\bar{z} = \frac{1}{L} \int_0^{\frac{D}{2}} z \sqrt{1 + \left(\frac{dz}{dx}\right)^2} dx \quad (5.3)$$

donne la position $\bar{z}$ du centroïde du réflecteur parabolique. Après intégration par parties et arrangement de l'équation on obtient la formule:

$$z(c) = \frac{1}{16} \cdot \frac{\frac{2 \cdot (1+A(c)^2)^{\frac{3}{2}}}{A(c)^2} - \sqrt{1+A(c)^2} - A(c) \cdot \operatorname{argsh} \frac{1}{A(c)}}{\frac{\sqrt{1+A(c)^2}}{A(c)} + A(c) \cdot \operatorname{argsh} \frac{1}{A(c)}} \quad (5.4)$$

dans laquelle $z(c) = \bar{z}/D$.

La variation de $z(c)$ est illustrée ci-après.

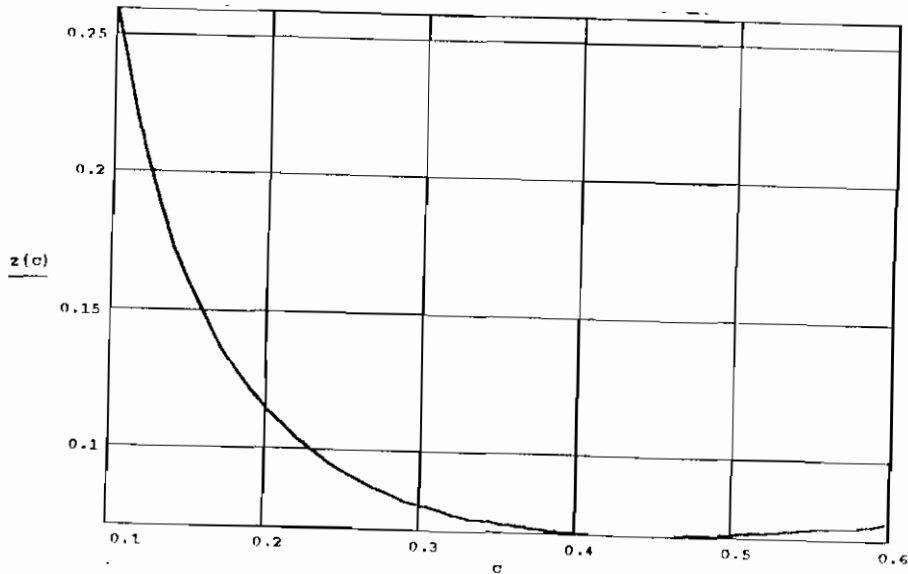


Figure 5.3 : Variation de $\bar{z}$ en fonction de f/D

Dans le cas de notre design où pour $f/D = 0.3$ on obtient $z(0.3) = 0.08$.

5.2. PROFONDEUR DE LA PARABOLE

La profondeur p de la paraboloïde s'obtient en calculant l'ordonnée du point d'abscisse $x = D/2$ de la courbe caractéristique de la parabole (soit $z(x) = x^2/(4 \cdot f)$). On obtient alors :

$$p(c) = \frac{p}{D} = \frac{1}{16 \cdot c} \quad (5.5)$$

La variation de $p(c)$ en fonction de c est montrée ci-après.

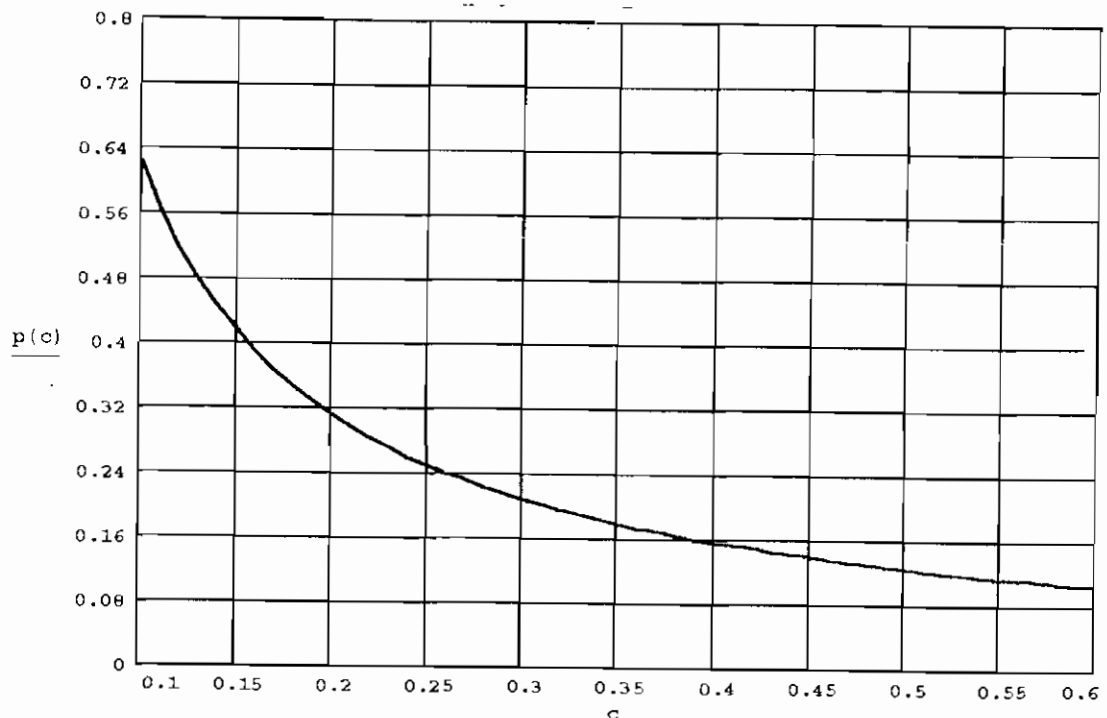


Figure 5.4 : Variation de p en fonction de f/D

Pour une antenne de diamètre 5m on obtient une profondeur $p = 1.04 \text{ m}$.

5.3. LONGUEUR DES LAMES

La longueur L d'une branche de la parabole est donnée [4] par la relation intégrale ci-dessous :

$$L = \int_0^{\frac{D}{2}} \sqrt{1 + \left(\frac{dz}{dx}\right)^2} \cdot dx \quad (5.6)$$

Après arrangement on obtient le paramètre adimensionnel L/D , rapport de la demi-longueur de la parabole par le diamètre de celle-ci. On pose $L(c) = L/D$.

$$L(c) = 0.25 \cdot \left[\frac{\sqrt{1+A(c)^2}}{A(c)} + A(c) \cdot \operatorname{argsh} \frac{1}{A(c)} \right] \quad (5.7)$$

La variation de $L(c)$ en fonction de f/D est montrée ci-dessous.

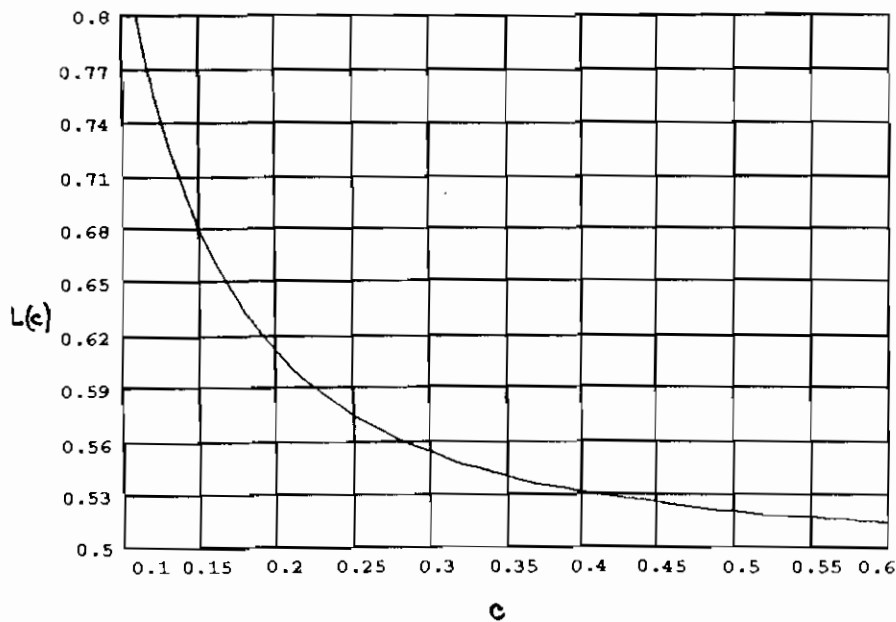


Figure 5.5 : Variation de L en fonction de f/D

Dans notre cas de design on obtient $L(0.3) = 0.553$.

5.4. SURFACE DU REFLECTEUR

Le théorème de Pappus-Guldinus [2] a été utilisé dans cette partie du problème. Il stipule que la surface engendrée par la rotation d'une courbe plane autour d'un axe ne la traversant pas est égale au produit de la distance parcourue par le centre de gravité $\bar{x}$ de la courbe par sa longueur. Il se résume par la relation

$$S=2\cdot\pi\cdot L\cdot\bar{x} \quad (5.8)$$

On obtient :

$$s(c)=\frac{\pi}{6}\cdot\left[\frac{(1+A(c)^2)^{\frac{3}{2}}}{A(c)}-A(c)^2\right] \quad (5.9)$$

dans laquelle $s(c)=S/D^2$.

La variation de s en fonction de c est montrée ci-dessous.

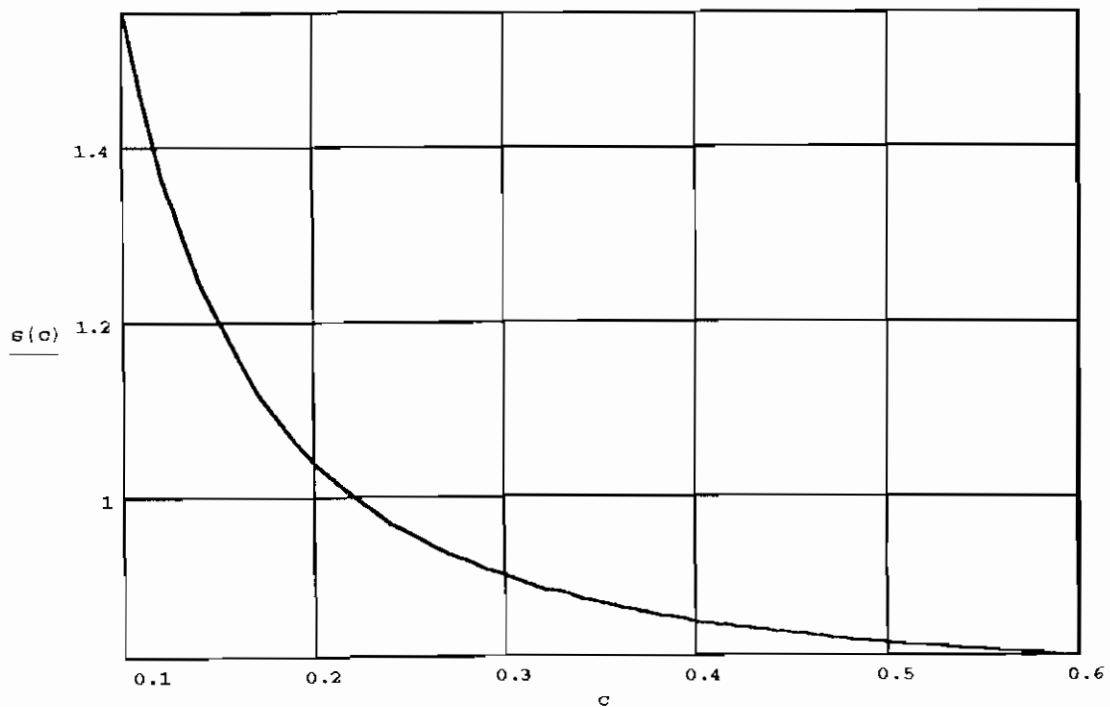


Figure 5.6 : Variation de s en fonction de f/D

Dans notre design où $f/D=0.3$ on obtient $s(0.3) = 0.91$

l'équation ci-dessous :

$$\frac{f}{D} = \frac{1}{4} \cdot \frac{1}{\tan(\frac{\phi}{2})} \quad (5.12)$$

La variation de f/D en fonction de ϕ est illustrée ci-dessous.

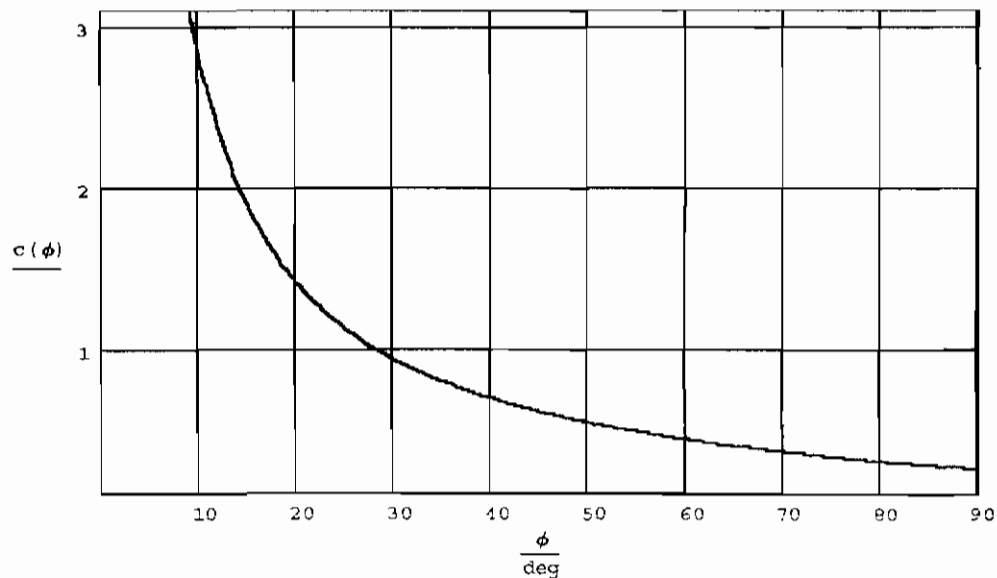


Figure 5.7 : Variation de f/D en fonction de ϕ

5.6. VALEURS DE QUELQUES PARAMETRES ADIMENSIONNELS UTILES DANS LE DIMENSIONNEMENT

Pour déterminer les caractéristiques physiques et géométriques indispensables dans le dimensionnement des antennes les coefficients données ci-après s'avèrent d'une importance capitale. Ils sont calculées à partir des relations (5.2), (5.4), (5.5), (5.7) et (5.9) puis permettent de trouver la

longueur des lames, la surface du réflecteur, etc. Ils sont donnés pour les valeurs courantes de f/D .

f/D	s/D^2	x/D	z/D	p/D	L/D
0.30	0.909	0.262	0.08	0.208	0.553
0.31	0.902	0.261	0.078	0.202	0.550
0.32	0.895	0.26	0.077	0.195	0.547
0.33	0.889	0.26	0.076	0.189	0.544
0.34	0.884	0.259	0.075	0.184	0.542
0.35	0.878	0.259	0.074	0.179	0.540
0.36	0.874	0.259	0.073	0.174	0.538
0.37	0.869	0.258	0.072	0.169	0.536
0.38	0.865	0.258	0.072	0.164	0.534
0.39	0.861	0.257	0.071	0.160	0.532
0.40	0.858	0.257	0.071	0.156	0.531
0.41	0.854	0.257	0.071	0.152	0.529
0.42	0.851	0.257	0.071	0.149	0.528
0.43	0.848	0.256	0.071	0.145	0.527
0.44	0.846	0.256	0.071	0.142	0.526
0.45	0.843	0.256	0.071	0.139	0.525
0.46	0.841	0.256	0.071	0.136	0.524
0.47	0.839	0.255	0.071	0.133	0.523
0.48	0.836	0.255	0.071	0.130	0.522
0.49	0.834	0.255	0.072	0.128	0.521
0.50	0.833	0.255	0.072	0.125	0.520

Tableau 5.1 : Coefficients de design des paraboles

Pour des valeurs ne figurant pas dans le tableau 5.1, il est possible d'effectuer des interpolations . Les coefficients obtenus sont à 0.05 % différents de ceux donnés par les relations

précédentes.

Quels sont les critères fondamentaux à considérer dans le design d'une antenne parabolique et quelle est l'approche de conception utilisée dans le cas du prototype d'antenne de cinq mètres (5 m) de notre projet ? La réponse à toutes ces questions est donnée dans le chapitre suivant.

CHAPITRE 6

REALISATION DE LA PARABOLE : ANALYSE ET APPROCHE MODULAIRE DE DESIGN

Il s'agit ici de trouver une approche de construction de l'antenne de manière à ce que celle-ci soit uniquement constituée d'éléments d'assemblage. Vu la complexité du problème nous allons chercher pour chacun des éléments constitutifs de l'antenne la meilleure manière de les réaliser de façon modulaire. La solution finale présentée sera donc uniquement un agencement optimal des solutions optimales de conception de composant. C'est donc une approche de conception dynamique.

Voyons tout d'abord la composition globale de la structure à concevoir. L'antenne parabolique est constituée :

- d'un réflecteur parabolique réfléchissant le signal micro-onde,
- d'une structure appelée structure arrière du réflecteur supportant le réflecteur et les éléments auxiliaires,
- de la structure de support du cornet.

Nous allons donc essayer de trouver les solutions pour le design de chaque élément ?

Il est primordial de définir tout d'abord les critères géométriques et mécaniques de conception avant de décrire les solutions adoptées.

6.1. CRITERES DE CONCEPTION

6.1.1. Effets de l'environnement

L'antenne peut travailler dans n'importe quelle position par un vent constant soufflant jusqu'à 72km/h (vitesse moyenne du vent dans la sous-région); elle peut supporter sans un vent pouvant atteindre une vitesse constante de 140 km/h.

6.1.2. Distance focale

Lorsque les configurations de la source primaire et du réflecteur sont connus ainsi que le diamètre de l'antenne, le rapport f/D est établi. Plus la distance focale est longue plus le réflecteur est plat; inversement, une distance focale courte se traduit par un réflecteur profond. Le rapport f/D varie de 0.50 pour un réflecteur peu profond à 0.25 pour un réflecteur profond. Le réflecteur peu profond est plus facile à fabriquer avec précision et les déflexions enregistrées lorsqu'il est pointé vers l'horizon sont moins importantes; de même, il est plus léger et moins coûteux qu'un réflecteur profond, vu que ce dernier doit avoir une structure arrière plus rigide. En revanche, les performances d'un réflecteur plus profond sont meilleures, compte tenu de la configuration des lobes secondaires d'antenne [16]. Pour le prototype de 5m de Polytechnique, on a choisi un compromis de 0.30 pour le rapport f/D [6].

6.1.3. Précision d'usinage

Si les panneaux du réflecteur présentent des erreurs de surface, il en résulte une perte de gain [16]. Les sources d'erreurs sont les suivantes :

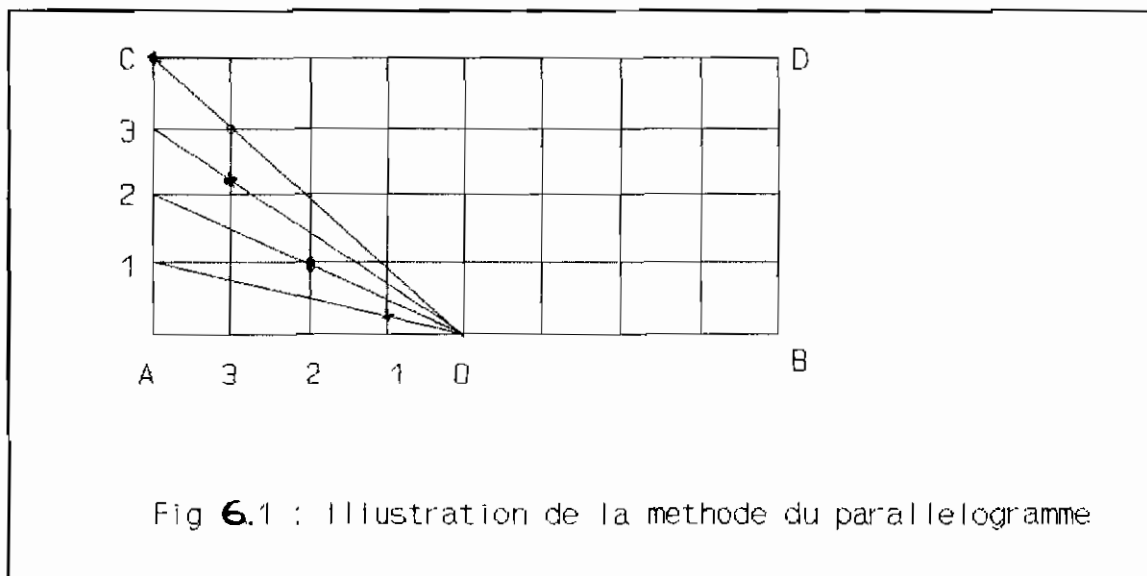
- Déviation dues à la gravité, au vent, aux écarts de températures,
- Tolérances d'ajustage et de fabrication des lames principales.

6.2. REALISATION DU GABARIT

C'est l'étape préliminaire à toute réalisation du réflecteur parabolique. Les approches, utilisées dans la réalisation du gabarit de traçage sont décrites ci-après.

6.2.1. Méthode du parallélogramme

Après avoir choisi le coefficient de design f/D et une fois fixé le diamètre de l'antenne, on détermine la profondeur p de la parabole. On construit ensuite le parallélogramme $ABDC$ comme illustré ci-dessous tel que $AC = p$ et $AB = D$.



Du point O, centre de AB, on mène une ligne d'axe perpendiculaire à AB. On subdivise AC en parties égales et AO en un même nombre de parties égales. Il ne faut surtout pas oublier

d'identifier chaque subdivision, selon l'illustration.

On mène ensuite une droite du point O au point l sur AC. Du point l sur OA, on trace une parallèle à l'axe. Le point de rencontre de cette dernière avec la ligne Ol est l'un des points de la parabole. La procédure est alors répétée pour la détermination des autres points [26].

Cette méthode est surtout utilisée pour le design du gabarit de traçage d'antenne dont le diamètre n'excède pas 2.40 m. Pour des diamètres plus grands la procédure devient fastidieuse.

La courbe précédemment obtenue peut-être reproduite sur un contre-plaqué ou une feuille de tôle. Elle servira lors de la mise en forme des lames.

6.2.2. Méthodes mathématiques

A partir de l'équation de la parabole, plusieurs transformations peuvent être effectuées.

Etant donné D et f/D , on peut définir la profondeur p, la distance focale f etc...

Il existe trois cas dans l'utilisation des formules mathématiques.

6.2.2.1. Premier cas

Nous savons que $z(x) = 1/(4.f) * x^2$.

Sur le contre plaqué servant à l'assemblage de tous les éléments de l'antenne, on construit point par point la courbe z pour x allant de 0 à D/2. On obtient le gabarit désiré [10].

6.2.2.2. Deuxième cas

On évalue l'écart h du point vis à vis du plan de l'ouverture; la variable x variant de 0 à $D/2$.

$$h = p - \frac{x^2}{4 \cdot f} \quad (6.1)$$

On obtient une série de point, que l'on peut relier pour avoir le gabarit [10].

Cette méthode est illustrée sur la figure ci-après. Pour l'illustration, nous avons choisi un point quelconque de la courbe.

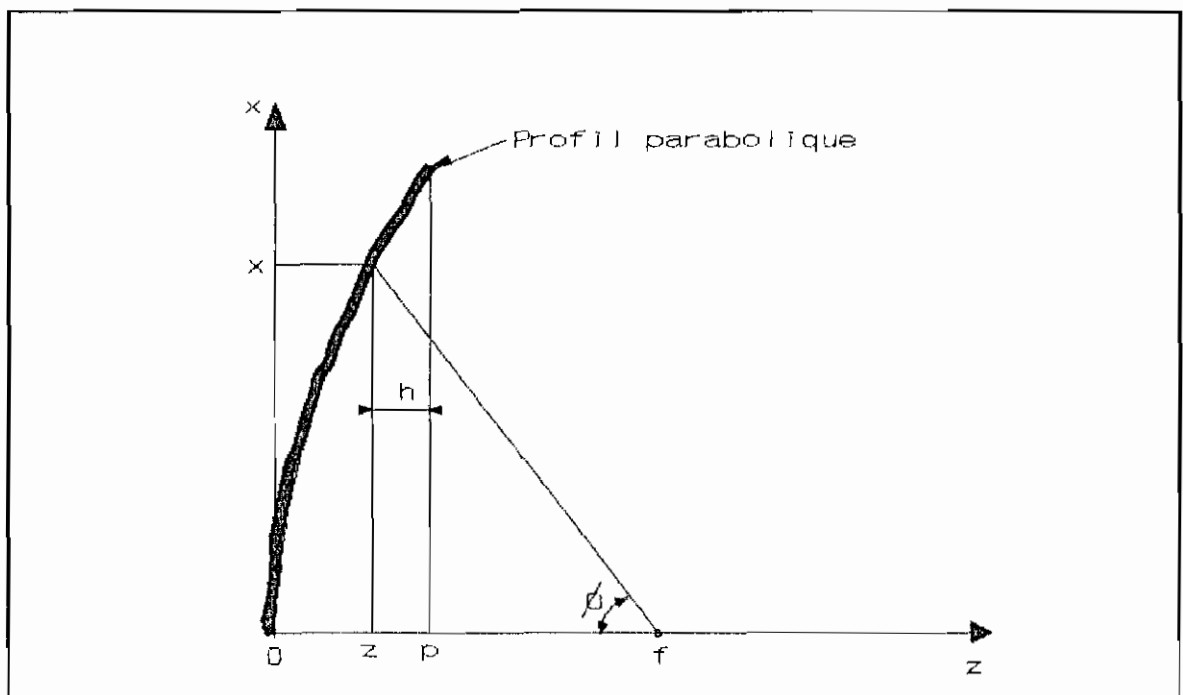


Figure 6.2 : Calcul du profil du gabarit (deuxième cas)

6.2.2.3. Troisième cas

La troisième méthode mathématique utilisée dans la réalisation du gabarit est le calcul de la longueur du vecteur p qui part du foyer pour aller à la parabole sous un angle ϕ [10].

6.2.2.3.1. Détermination de ϕ

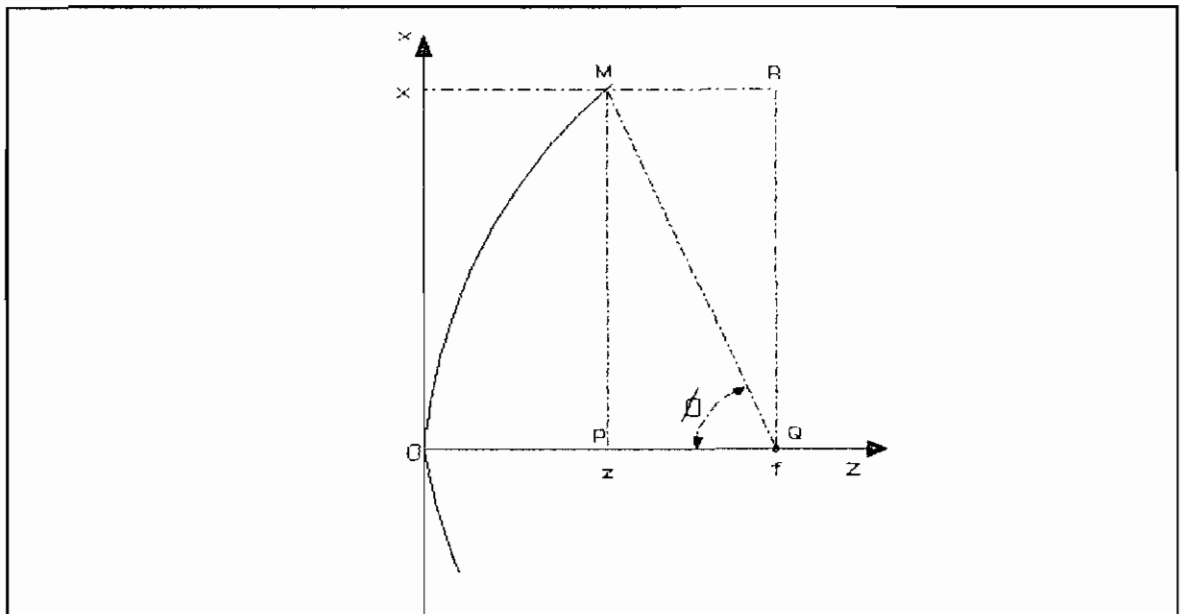


Figure 6.3 : Calcul du profil du gabarit (Troisième cas)

$$QM + MR = 2 \cdot f \quad (6.2)$$

Or

$$QM = \frac{x}{\sin \phi} \quad (6.3)$$

De même

$$MR = QM \cos \phi = \frac{x}{\tan \phi} \quad (6.4)$$

En remplaçant QM et MR dans (6.2) ,il en résulte que:

$$\frac{1+\cos\phi}{\sin\phi} \cdot x = 2 \cdot f \quad (6.5)$$

Par conséquent on a :

$$x = 2 \cdot f \cdot \tan \frac{\phi}{2} \quad (6.6)$$

On en déduit alors que :

$$\rho = OM = \frac{x}{\sin\phi} = \frac{2 \cdot f \cdot \tan \frac{\phi}{2}}{\sin\phi} \quad (6.7)$$

D'où

$$\rho = \frac{2 \cdot f}{1+\cos\phi} \quad (6.8)$$

Dans toutes les méthodes précédentes, il y a toujours des erreurs de positionnement des points. Ces erreurs ne sont pas critiques tant qu'elles n'excèdent pas 1/16^{ième} de la longueur d'onde du signal à recevoir par le réflecteur [14]. Les imprécisions les plus critiques se retrouvent le plus souvent sur les bords du réflecteur, là où, précisément se produisent les phénomènes de dispersion.

6.3. REALISATION DU REFLECTEUR

Cet élément focalise l'énergie micro-onde en son foyer. Il peut être réalisé soit :

- en métaux déployé ,
- par assemblage de secteurs plans;
- de plusieurs tranches de feuilles d'aluminium embouties ou moulées.

Dans tous les cas la surface du réflecteur doit être le plus

prêt possible de la forme parabolique idéale. En général il est communément accepté des écarts ou irrégularités de surface compris entre $1/32^{\text{ième}}$ et $1/16^{\text{ième}}$ de la longueur d'onde du signal [14].

6.3.1. Réalisation à partir du métal déployé

C'est le procédé, le plus couramment utilisé dans la commercialisation des réflecteurs. Il existe cependant des critères très stricts à respecter pour que le réflecteur puisse fonctionner correctement. Cette condition est liée au maillage du métal qui ne doit pas excéder $1/16^{\text{ième}}$ de la longueur d'onde du signal à transmettre pour un bon fonctionnement en bande Ku. C'est surtout pour cette raison qu'on utilise ces types d'antenne en bande C [14].

6.3.2. Reconstitution à partir de secteurs plans

On remarque que le fond d'une parabole est assez plat pour qu'il soit remplacé par une plaque de tôle arrondie sur laquelle on peut riveter ou souder des lames creuses ou pleines. Les sections sont choisies en conséquences. Les lames doivent posséder le profil parabolique. Coudés en bout, les rayons de la roue obtenue seront fixés dans un encerclage qui maintient les lames cambrées selon le profil. Si l'on craint un fléchissement du cerclage, on peut ajouter des tringles.

Enfin, pour masquer le vide reparté entre les lames, on tapisse le fond d'un grillage très fin conducteur ou d'une toile tissée avec des fils de cuivre que l'on soude électriquement en un certains points aux lames. L'alliage de laiton convient

également. Il est sûr que les secteurs-plans n'épousent pas exactement la forme parabolique et qu'il serait plutôt souhaitable de performer la toile au moyen d'une presse de contour adéquat. Pour éviter la grossièreté du contour on peut multiplier le nombre de lames, mais alors, le rivetage devient difficile sur la plaque circulaire centrale. Les rayons disposés tous les 30° constituent un bon compromis, car, plus le nombre de lames est élevé plus le rivetage à la plaque devient délicate. La transparence au vent, est un atout majeur dans le calcul des sections des lames. On laissera un trou central pour la fixation du mât du cornet [10].

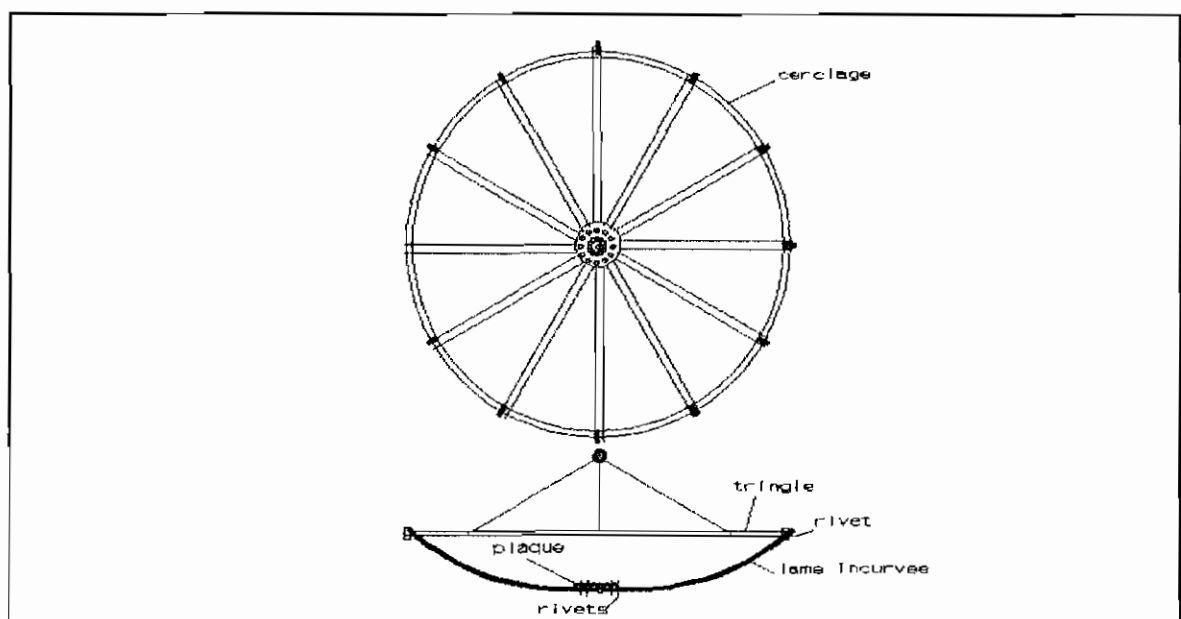


Figure 6.4 : Réalisation d'une parabole à partir de lames

6.3.3. Emboutissage

On emboutie une plaque d'aluminium dans la gorge au profil parabolique. L'emboutissage permet des fantaisies en ce qui concerne la forme et les finitions. Notamment, pour donner de la

raideur au contour de la parabole, on pratiquera un rebord avec ou sans méplat. L'intérieur de la parabole sera ensuite peint d'une couche métallique protectrice. Cette méthode présente un grand inconvénient pour les gros diamètres d'antenne, car elle exige de grosses presses, ce qui augmente l'investissement initial. Néanmoins elle pourra être utilisée, car le coût de l'installation pourra être reparté sur plusieurs réalisations. Dans ce cas pour faciliter le transport, on découpera la parabole en 12, 20 ou 24 tranches qu'on associera au montage par visserie. Plus le nombre de tranche est élevé, plus l'efficacité de l'antenne est affectée. Il faut donc faire un compromis sur ce point [10].

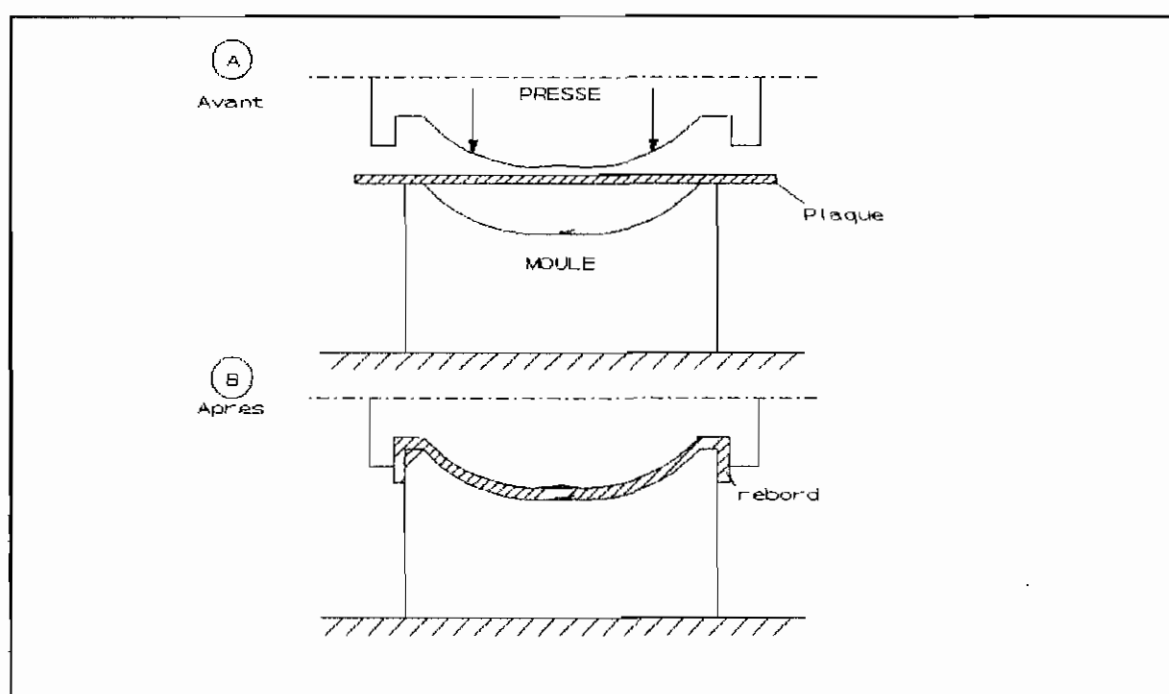


Figure 6.5 : Utilisation d'une presse pour réaliser par emboutissage une parabole

Dans le cadre de la réalisation du prototype de cinq (5) mètres (m) de Polytechnique, le coût et la facilité de réalisation, nous oblige à adopter un réflecteur en métal déployé [6].

6.4. STRUCTURE ARRIERE DU REFLECTEUR

L'objectif principal est de construire une structure rigide dont la surface intérieure épouse de près la forme parabolique. Il s'agit d'assembler des lames incurvées selon un profil qui suit l'équation de la parabole. Les lames au nombre de 20 seront disposées selon un décalage angulaire de 18° . L'extrémité de l'une sera reliée à celle de l'autre à l'aide de profilé dont la forme permettra de retenir les grilles . Ces profilés maintiendront les membrures cambrées. Pour rigidifier la structure des rangées de tubes seront disposées entre les membrures de façon à former des cerceaux (deux dans le cas du prototype de 5m). Les sections des éléments seront choisis de manière à supporter les contraintes et les déformations engendrées par le vent et les autres agents atmosphériques.

6.4.1. Choix du matériaux de construction

Dans le but de réaliser le design au poids minimum, on préférera l'aluminium à l'acier dont la masse volumique est la plus élevée (7800kg/m^3). Mais la non disponibilité de celui-ci sur le marché nous oblige à utiliser de l'acier. Plus tard quand la société va commencer le démarrage de ces activités des modifications seront apportées au design dans le but d'utiliser l'aluminium

6.4.2. Section et forme des lames

Les lames supérieures et inférieures doivent être soit des tubes ou des profilés d'aluminium ou d'acier. Les tubes carrés conviennent le mieux vu la facilité qu'ils offrent pour la fixation du réflecteur et la rapidité lors de l'assemblage. Le choix de leur épaisseur doit tenir compte du rayon minimal de courbure pour lequel il n'y a pas apparition de fissures lors de la mise en forme.

Ce rayon est donné par :

$$\frac{R_m}{e} = \frac{1}{[(A-4)/(100-z)] \cdot [(A-4)/(100-z) + 2]} \quad (6.9)$$

R_m : rayon minimal de pliage,

e : épaisseur du profilé,

A : allongement en pourcentage,

z : coefficient de striction.

Le rayon de courbure pour une courbe plane définies par $z=f(x)$ est donné [4] par la relation :

$$R = [1 + (\frac{dz}{dx})^2]^{\frac{3}{2}} / \frac{d^2z}{dx^2} \quad (6.10)$$

Pour $x^2=4 \cdot f \cdot z$ on a :

$$R = 2 \cdot f \cdot [1 + (\frac{x}{2 \cdot f})^2]^{\frac{3}{2}} \quad (6.11)$$

On en déduit alors les rayons minima R_{min} et maxima R_{max} de courbure respectivement pour $x=0$ et $x = D/2$ dans (6.11) :

$$R_{min} = 2 \cdot f \quad (6.12)$$

$$R_{\max} = 2 \cdot f \cdot [1 + (0.25 \cdot \frac{D}{f})^2]^{\frac{3}{2}} \quad (6.13)$$

Le critère de choix de l'épaisseur des tubes carrés selon le rayon minimal pour éviter la fissuration n'est cependant pas primordial. On remarquera que ces rayons ne sont jamais atteints dans les réalisations courantes. L'épaisseur et par conséquent la section des membrures ou des lames est choisie en fonction des niveaux de contraintes admissibles. La configuration obtenue est montrée sur le plan N°001. Cet agencement définitif est obtenu après une étude de la structure en ferme rigide.

6.4.3. Mode d'assemblage des lames à la structure de base et choix des éléments de contreventements

Pour rigidifier la structure on assemblera comme précédemment spécifié toutes les lames supérieures par l'intermédiaire de cerceaux disposés le long de celles-ci à des distances dépendant du diamètre de l'antenne à concevoir. Pour l'application que nous ferons, les distances choisies sont de 1 et 1.75 m de l'axe de la parabole.

De plus les cerceaux doivent avoir le profil parabolique, surtout pour permettre au réflecteur d'épouser complètement la forme parabolique. Ils seront donc ceintrés selon deux rayons (rayon du cercle et rayon de courbure de la parabololoïde au point considéré). Les facilités de réalisation nous oblige à choisir ces éléments en tubes ronds. Chacun d'entre eux est constitué d'éléments d'assemblage c'est-à-dire qu'un cerceau s'obtient par adjonction de petits éléments de forme circulaire reliés aux lames supérieures par des goussets d'attache et de longueur

fonction de l'écart angulaire entre deux lames consécutives. Dans notre cas cet écart est de 18° et la longueur des éléments est facilement déterminée.

Les lames supérieures de chaque ferme seront collectées à une plaque circulaire d'aluminium ou d'acier par l'intermédiaire de boulons. Quant aux lames inférieures elles seront fixées à une plaque carrée. Le schéma adopté pour le prototype de 5m est montré au plan N°002.

6.4.4. Construction de la ferme

Notre soucis constant est de réaliser la ferme de façon modulaire, mais trop d'éléments d'assemblages risque d'augmenter le temps et le coût de la construction. C'est pour cette raison que nous avons décidé de préassembler certains éléments au niveau de l'entreprise sous forme de ferme rigide. Toutes les membrures doivent être soudés entre elles et aux lames. Cette solution est la plus économique après comparaison entre les coûts qu'engendreront les assemblages par boulons et par rivets.

6.5. FIXATION DU CORNET

Le cornet dans le cas général de conception d'antenne est fixé à un tripode en acier. Ce mode de fixation limite les possibilités d'ajustement de la distance focale en cas de perturbation et engendre des zones d'ombre [13]. C'est pour palier à tout ceci que nous proposons de fixer le cornet à un élément en forme de col de cygne avec possibilité de d'ajustement par coulisseau.

Essayons d'expliquer brièvement les raisons du choix de cette

forme.

Considérons une source ponctuelle située à la distance l d'un obstacle de diamètre d . La largeur de l'ombre h_0 portée à une distance L de la source est donnée par :

$$h_0 = \frac{L}{l} \cdot d \quad (6.14)$$

(Application du théorème des triangles semblables aux triangles SOA et SBC voir figure ci-dessous.)

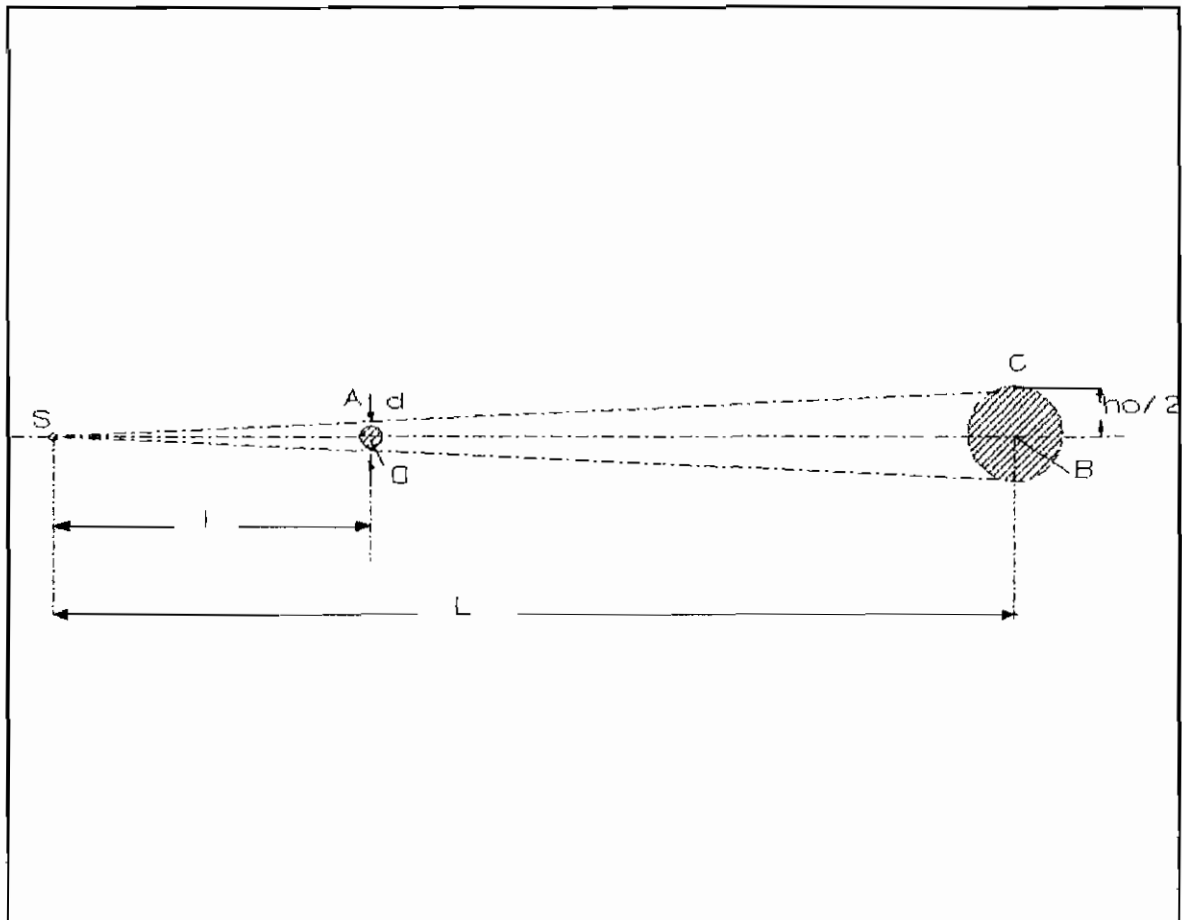


Figure 6.6 : Relation entre hauteur de l'ombre et la distance de la source à l'obstacle

Faisons l'hypothèse que le cornet est suspendu à une forme circulaire de rayon R et évaluons la largeur de l'ombre engendrée par celle-ci lorsque le cornet émet un signal micro-onde. la figure ci-dessous nous explique brièvement le phénomène.

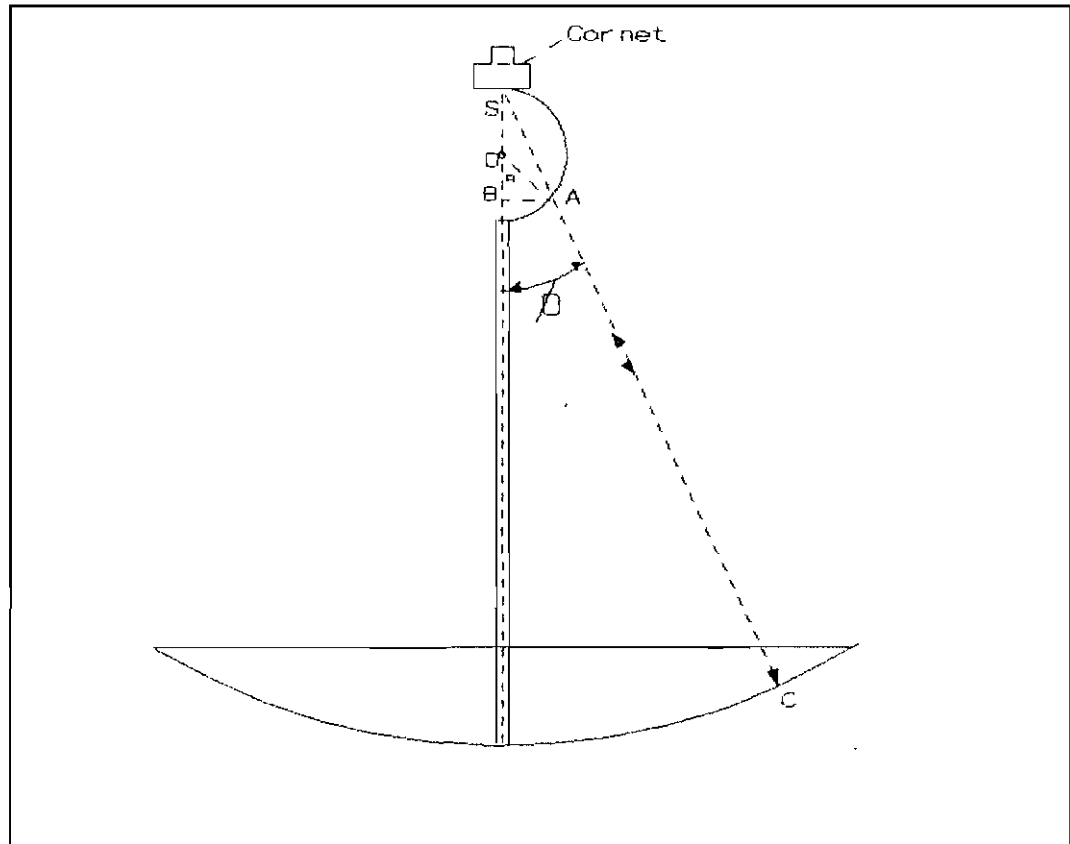


Figure 6.7 : Relation entre ϕ et largeur de l'ombre portée sur la surface parabolique

Calcul de SA

$$SA^2 = SB^2 + AB^2 = (R + R \cdot \cos \phi)^2 + (R \cdot \sin \phi)^2 \quad (6.15)$$

donc

$$SA = R\sqrt{2 \cdot (1 + \cos\phi)} \quad (6.16)$$

Calcul de SC

On montre aisément (voir §6.2.2.3.1) que

$$SC = \frac{2 \cdot f}{1 + \cos\phi} \quad (6.17)$$

où

$$0 < \phi < \phi_0/2$$

avec ϕ_0 , demi- angle d' ouverture maximale de la parabole

Calcul de la largeur de l'ombre portée en C

En désignant par d l'épaisseur de la forme circulaire on obtient:

$$h_o = \frac{SC}{SA} \cdot d \quad (6.18)$$

$$h_o = \frac{2 \cdot f}{1 + \cos\phi} \cdot \frac{1}{R\sqrt{2 \cdot (1 + \cos\phi)}} \cdot d \quad (6.19)$$

Par conséquent on a:

$$\frac{h_o}{d} = \frac{\sqrt{2} \cdot f}{R} \cdot \frac{1}{(1 + \cos\phi)^{3/2}} \quad (6.20)$$

Inversement tous les signaux réfléchis par la section rectangulaire de largeur h_0 et de largeur $2 \cdot L$ (L longueur de la membrure principale) ne sont pas captés par le cornet. On remarque donc que h_0/d dépend de trois paramètres :

- la distance focale f de la parabole connue et fixée,
- l'angle ϕ variable, limitée par le demi-angle d'ouverture ϕ_0

de la parabole,

- enfin du rayon R de l'élément de fixation.

C'est donc sur R que nous pouvons agir pour modifier la valeur de h_0/d . Pour $R=+\infty$ autrement dit si nous choisissons des éléments rectilignes pour fixer le cornet au lieu de tubes circulaires, on obtiendra une ombre portée théoriquement nulle. C'est ce qui justifie la forme choisie.

6.6. RESULTATS DES DIFFERENTES ETUDES DANS LE CAS DU PROTOTYPE DE CINQ METRES (5 m)

Les calculs de la longueur totale de matériaux indispensables pour la construction de l'antenne (il s'agit essentiellement de calcul géométriques) ainsi que les calculs mécanique de la structure sont (Méthodes de calcul décrites à l'annexe A) donnent les résultats généraux ci-après:

Tube carré type n°1 : longueur: 204 m 20·20·1.2

Tube carré type n°2 : longueur: 42 m 16·16·1.5

Surface du métal déployé : 25 m²

Tube rond type n°1 (en Alu) : longueur 16 m 16·20

Tube rond type n°2 (en Alu) : longueur 20 m 14·16

Tube d'aluminium : 32* 38

**Troisième
Partie**

LE SUPPORT

CHAPITRE 7

ETUDE ANALYTIQUE DES PARAMETRES DU SUPPORT

7.1. LES PARAMETRES DE POINTAGE

Soit la représentation spatiale ci-dessus de la position relative du point A de réception terrestre par rapport au lieu S d'émission du satellite.

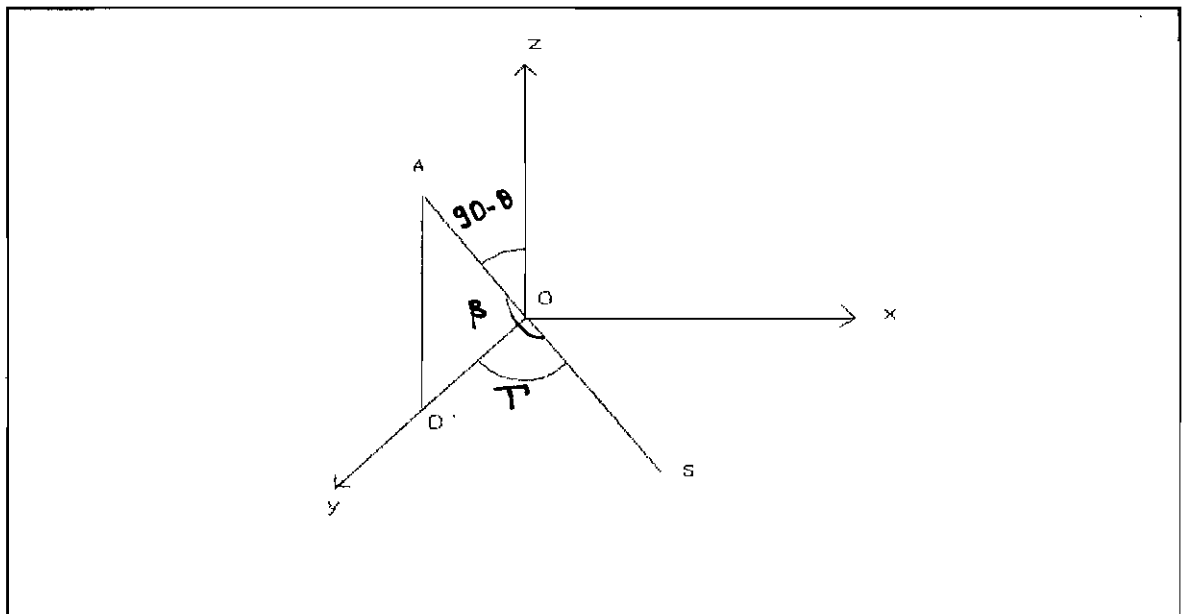


Figure 7.1: Position relative entre le lieu A de réception et le lieu S d'émission du satellite.

O représente le centre de la terre

A représente un lieu quelconque à la surface de la terre

OA est donc le rayon de la terre et vaut 6378.16 km

S représente un satellite géostationnaire quelconque

OS vaut 42164.2 km

O' est la projection orthogonale de A sur l'axe Oy. OO'est donc

parallèle à l'axe de rotation de la terre. On l'appelle l'axe équatorial au point A.

Γ l'angle γOS qui est la différence de longitude entre A et S
 θ la latitude du lieu A.

Une relation fondamentale de la trigonométrie sphérique nous donne

$$\cos \beta = \cos \theta \cos \Gamma \quad (7.1)$$

Ce qui donne donc

$$AS(\theta, \Gamma) = \sqrt{OA^2 + OS^2 - 2 \cdot OA \cdot OS \cdot \cos(\theta) \cdot \cos(\Gamma)} \quad (7.2)$$

La direction AS est appelée la mire de la parabole

$$OO'(\theta) = OA \cdot \cos \theta \quad (7.3)$$

$$(7.4)$$

$$AO'(\theta) = OA \cdot \sin \theta \quad (7.5)$$

On peut donc calculer l'angle s sous lequel un rayon (l'onde électromagnétique) intercepte l'axe équatorial AO'

7.1.1 L'angle s entre l'axe équatorial et le rayon d'incidence

$$s(\theta, \Gamma) = \arccos \frac{AO'(\theta)^2 + AS(\theta, \Gamma)^2 - OS(\theta, \Gamma)^2}{2 \cdot AO'(\theta) \cdot AS(\theta, \Gamma)} \quad (7.6)$$

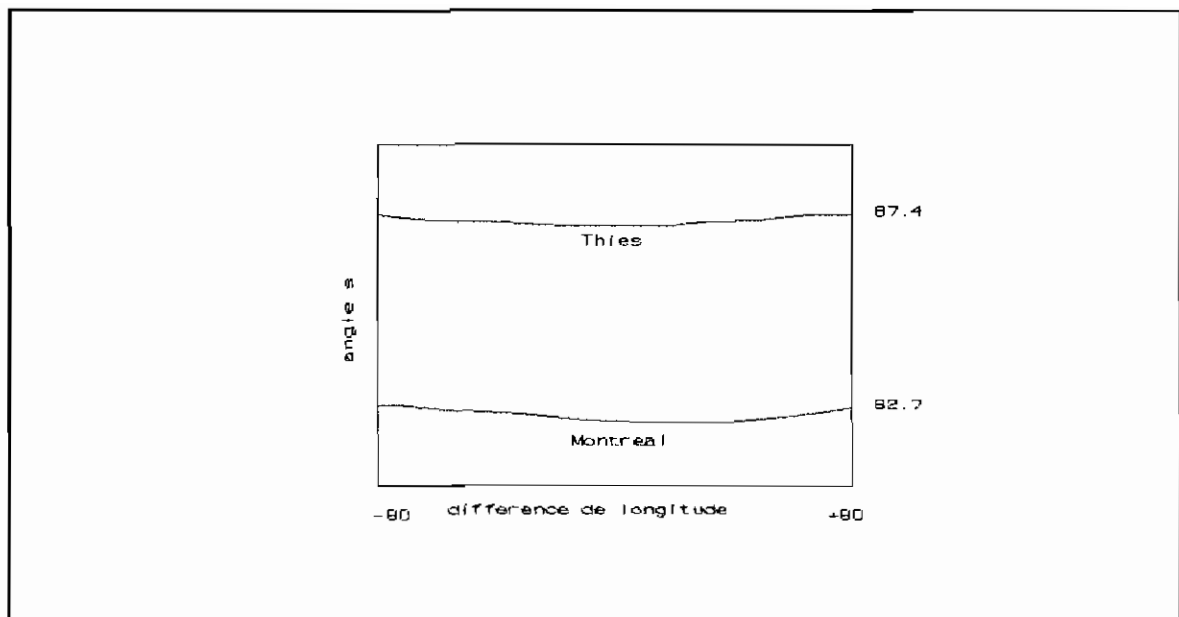


Figure 7.2: Angle s entre l'axe équatorial et le rayon incident

7.1.2 Orientation α du plan de la parabole relativement à l'axe équatorial AO' .

Le plan de la parabole doit être perpendiculaire à la mire i.e doit être intercepté à 90° . On inclinera donc ce dernier par rapport à l'axe équatorial d'un angle α tel que

$$\alpha(\theta, \gamma) = 90 - s(\theta, \gamma) \quad (7.7)$$

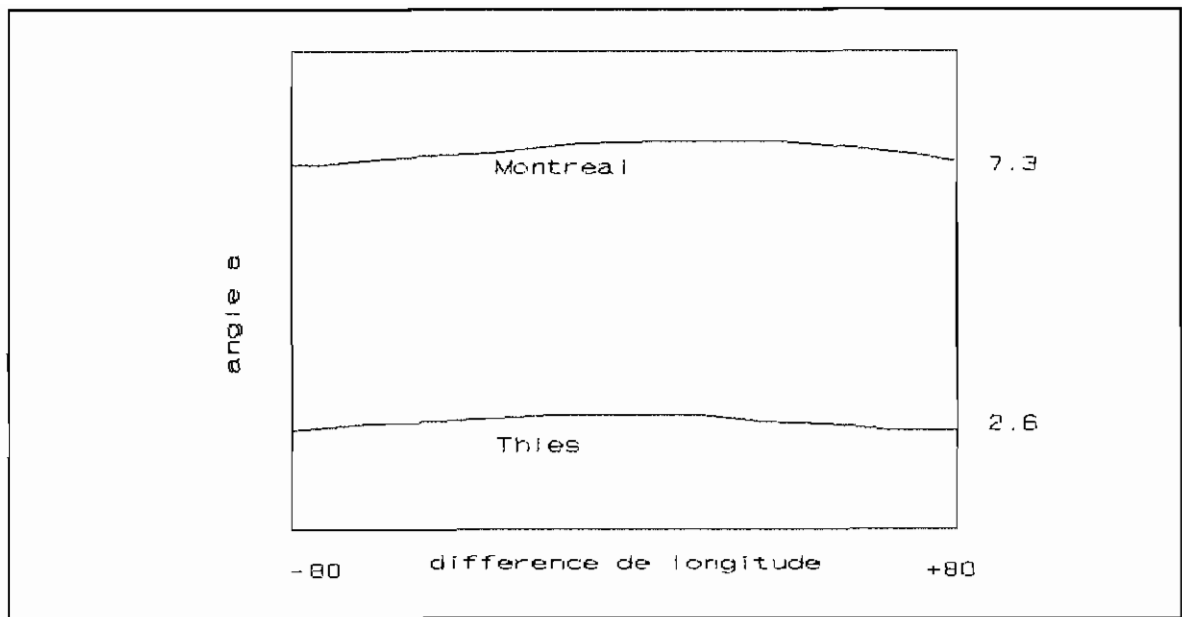


Figure 7.3: Angle a entre le plan de la parabole et l'axe équatorial

7.1.3 Compensation de la variation de a

Il s'agit de fixer une valeur de a qui permette le minimum d'erreur de pointage sur chaque satellite. On fixera donc différentes valeurs de a et on cherchera l'erreur de pointage due au fait que le cercle géostationnaire ne coïncidera pas avec la trace de la mire sur le plan équatorial qui est également un cercle.

7.2 MONTAGE DE PRINCIPE

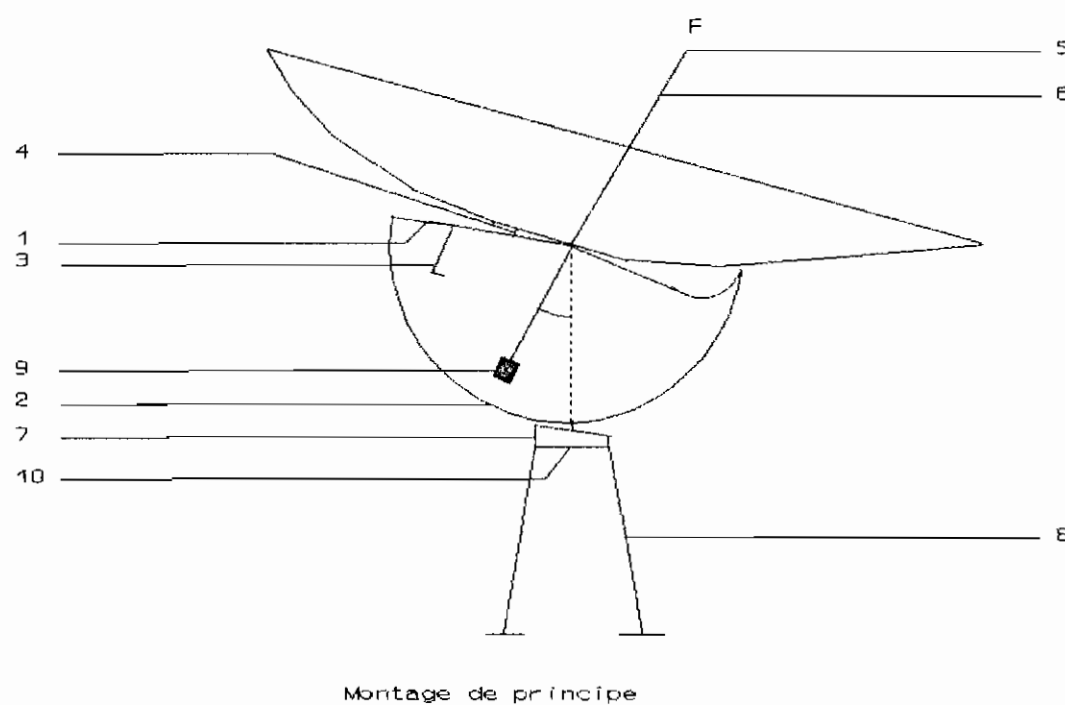


Figure 7.4: Montage de principe

Légende du schéma synoptique du support

- 1.L'axe équatorial
- 2.Cercle-support de positionnement de l'axe équatorial
- 3.Bras de levier pour le positionnement de la parabole en rotation autour de l'axe équatorial
- 4.Ensemble vis-écrous pour le réglage de l'inclinaison de la parabole par rapport à l'axe équatorial.
- 5.Le point focal ou le lieu du cornet
- 6.Direction de la mire
- 7.Plaque supérieure liée au cercle-support par un étau tenant le cercle-support (2) de l'axe équatorial et orientable par vis-écrous par rapport à la plaque inférieure 10.
- 8.L'un d'entre les 4 profilés en L qui forment le quadripède
- 9.Contre-poids
- 10.Plateau qui réunit les 4 profilés en L

7.2.1 Parcours p de la vis le long de l'axe équatorial

La parabole est munie, sur son cercle de base, d'un ensemble vis-double écrous lui permettant de se positionner convenablement par rapport à l'axe équatorial. La figure ci-dessous en donne le principe de positionnement.

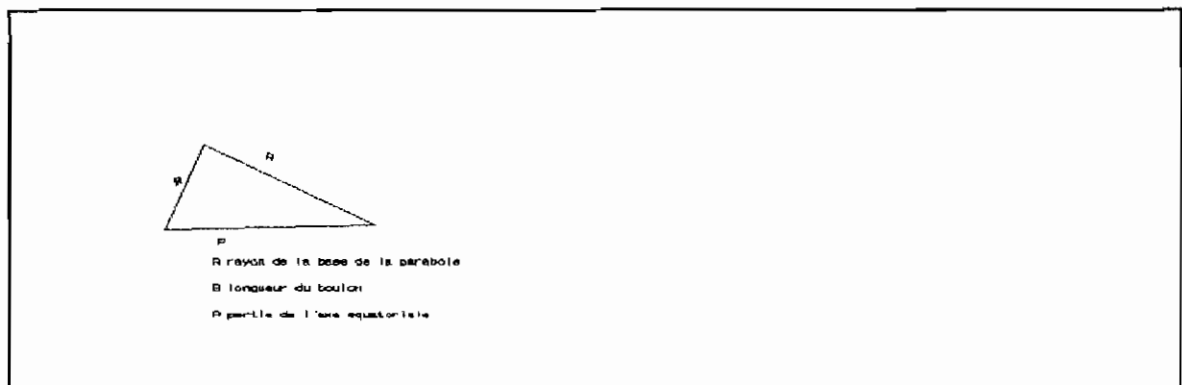


Figure 7.5: illustration de la variation de l'angle entre le plan de la parabole et l'axe équatorial

Nous avons donc:

$$p = \frac{R}{\cos 10^\circ} - R = 0.0154R \quad (7.8)$$

où R est la distance entre l'axe de rotation et la vis.

p la longueur minimale du trou oblong sur l'axe équatorial.

Si on prend R = 1m on a p=1.5cm

Longueur B de la vis

$$B > R \tan 10^\circ = 17 \text{ cm}$$

7.3 UTILISATION DU VERIN DE 1500lb (6.672 kN)

Ce vérin doit être doublement "rotulé" puisqu'il ne doit être soumis ni à des contraintes de cisaillement, ni à des contraintes de flexion.

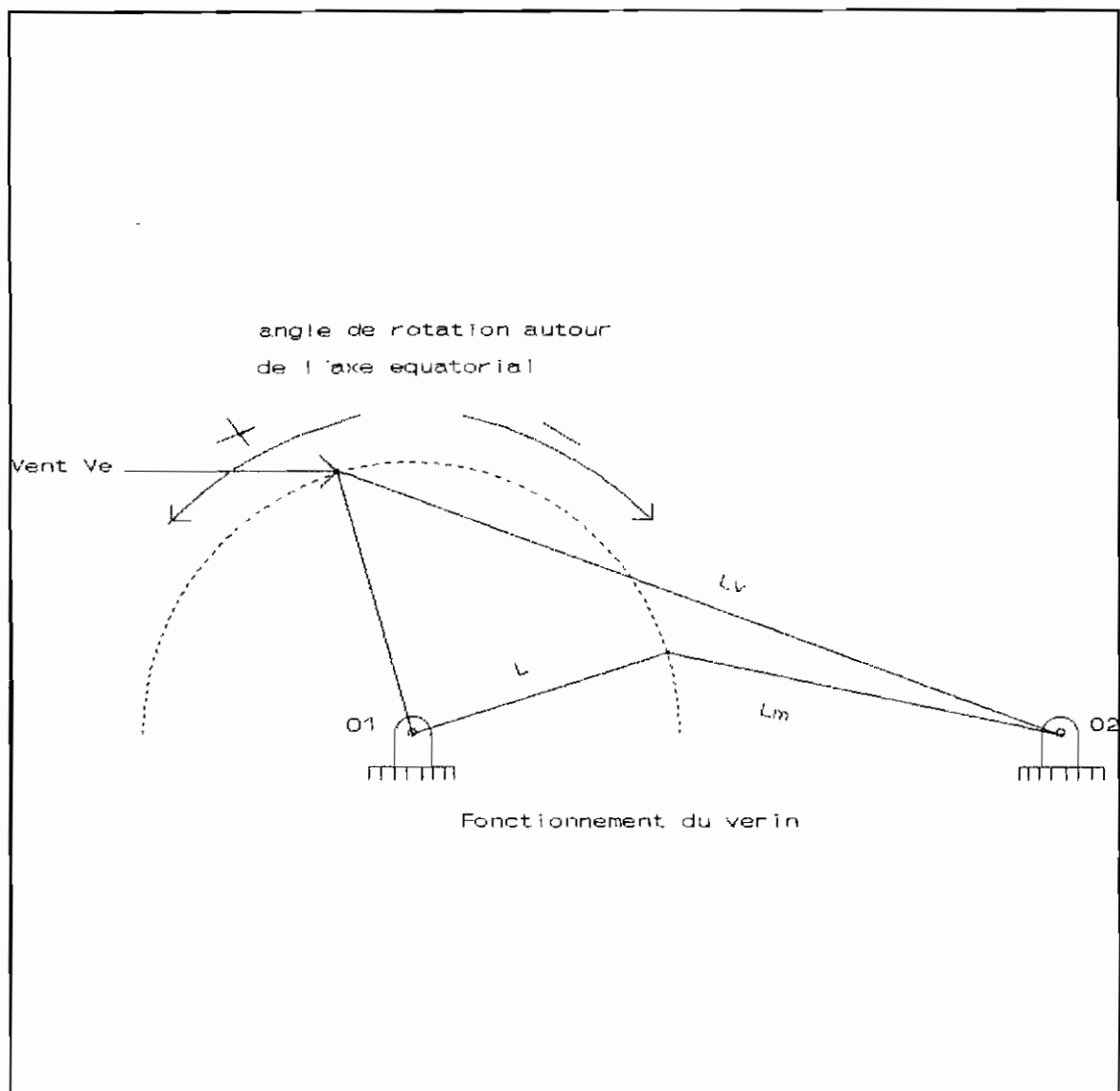


Figure 7.6: Illustration de l'utilisation du vérin

Légende

L_m : Longueur minimale du vérin

L_v : Longueur du vérin à

L : Longueur du bras de levier

V_e : Indique la direction du vent

O_1O_2 : Distance entre l'axe équatorial et le point d'attache du vérin

7.3.1 Calcul géométrique du vérin

Pour éviter des blocages nous ferons en sorte qu'en fin de course on ait l'angle de rotation autour de l'axe équatorial

$$\Gamma_0 = -80^\circ.$$

L'équation générale du mouvement est donnée par

$$\sigma^2 + L^2 - 2\sigma L \cos(90 + \Gamma_0) = L_v^2 \quad (7.9)$$

$$\sigma = O_1 O_2$$

Pour $\Gamma_0 = -80^\circ$ on a $L_v = L_m = 0.9\text{m}$ donc

$$\sigma^2 + L^2 - 2\sigma L \cos 10 = L_m^2 \quad (7.10)$$

La racine du discriminant δ est donc

$$\delta = \sqrt{(L \cos 10)^2 - (L^2 - L_m^2)} \quad (7.11)$$

d'où

$$\sigma = L \cos 10 + \delta \quad (7.12)$$

On a alors:

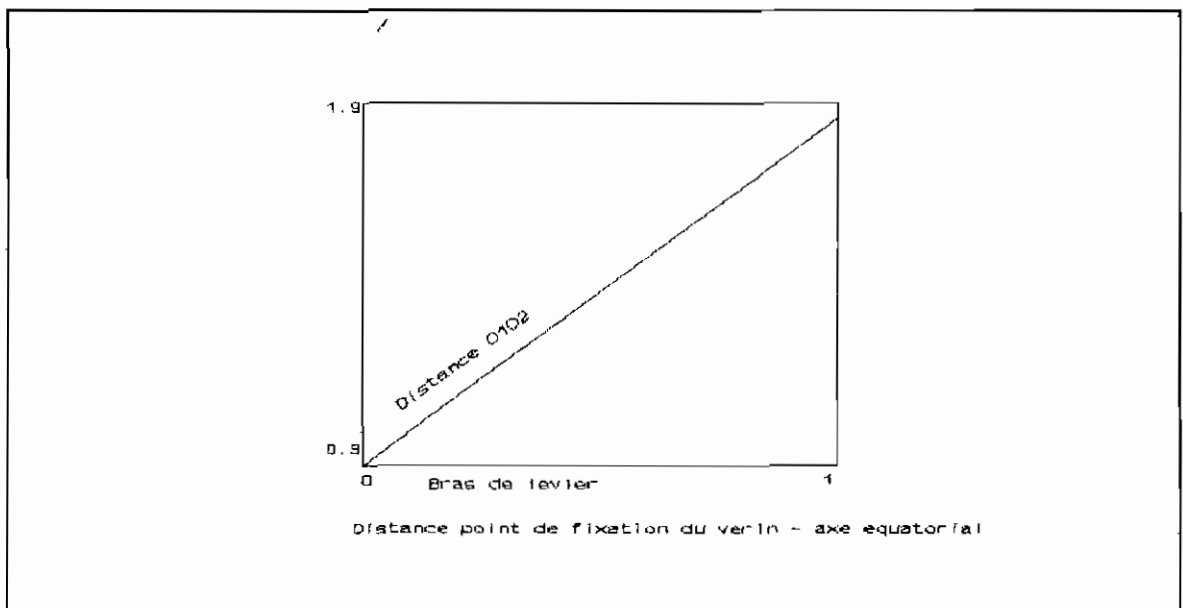


Figure 7.7: Distance entre le point de fixation du vérin et l'axe équatorial

Une fois σ trouvée on a

$$L_v(L, \Gamma_0) = \sqrt{\sigma^2 + L^2 - 2 \cdot \sigma \cdot L \cdot \cos(90 + \Gamma_0)} \quad (7.13)$$

Et nous jouerons sur la valeur de L de façon à obtenir après une rotation de 80° $L_v = L_{\max}$. En nous basant sur le graphique suivant qui donne la longueur du vérin à 80° pour différentes valeurs de L , on se rend compte qu'il est plus raisonnable de prendre $L = 0.4\text{m}$.

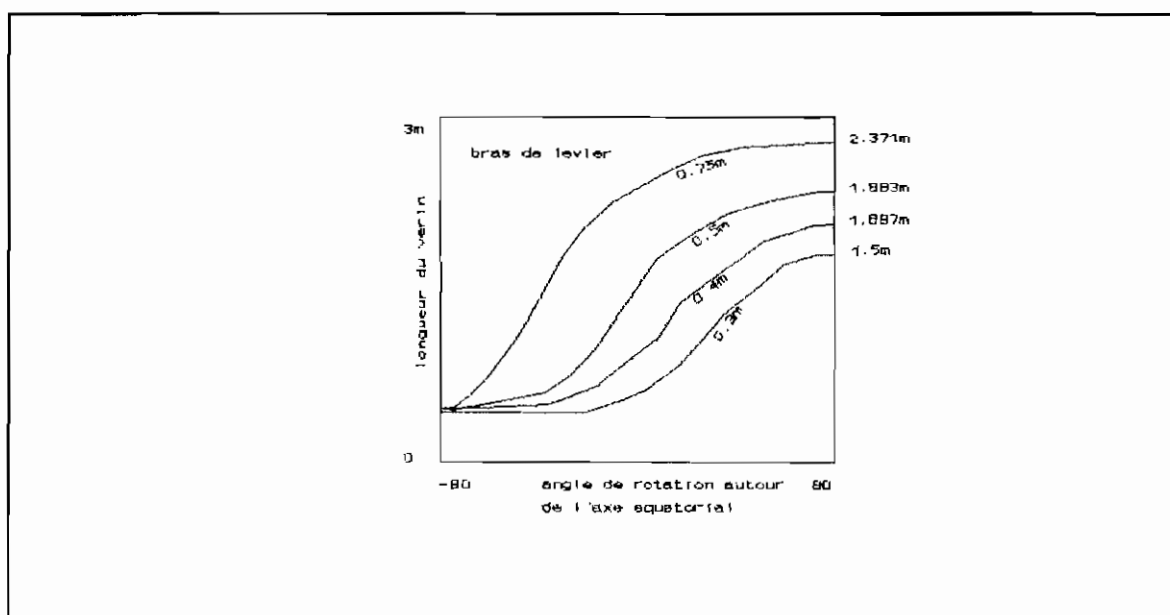


Figure 7.8: Longueur maximale nécessaire du vérin en fonction du bras de levier

7.3.2 Calcul mécanique du vérin

Comme la parabole a un contre poids, le vérin n'aura à supporter que le déséquilibre créé par le vent. Et on imagine aisément que la plus grande force de déséquilibre est obtenue quand le vent frappe un seul coté de la parabole. En ce moment la surface S présentée est comme suit:

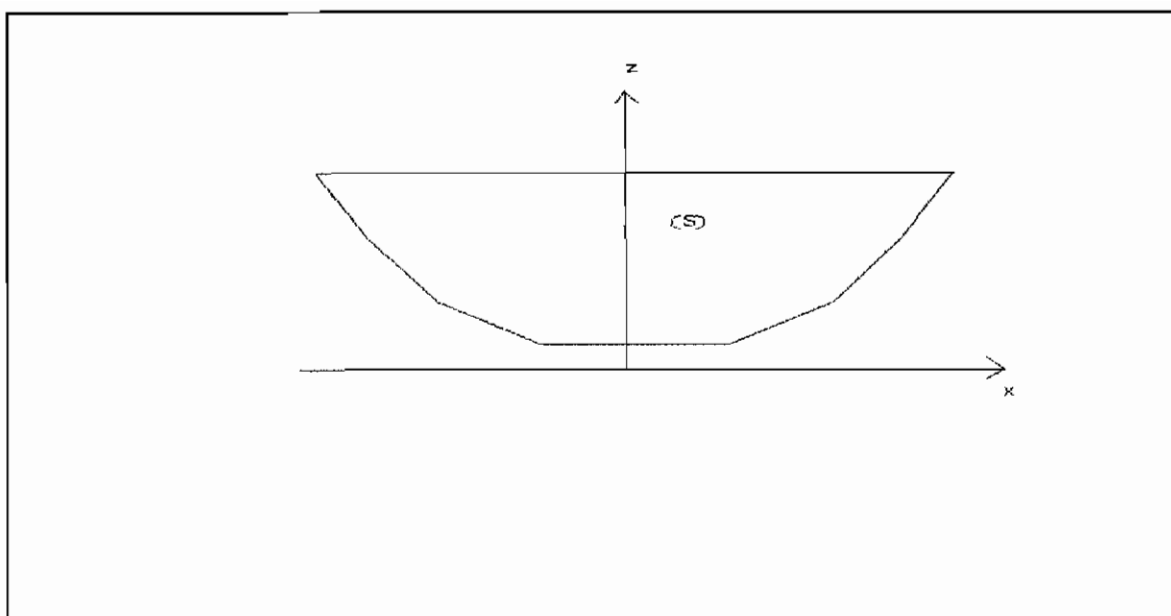


Figure 7.9: Surface projetée de la parabole pour une force de déséquilibre maximale.

$$S = p \cdot D - 2 \cdot \int_0^{\frac{D}{2}} \frac{1}{4 \cdot f} x^2 dx \quad (7.14)$$

avec

$$p = \frac{1}{4 \cdot f} \cdot \frac{D^2}{4} \quad (7.15)$$

On obtient alors

$$\frac{S}{D^2} = \frac{1}{24} \frac{1}{\frac{f}{D}} \quad (7.16)$$

et la force résultante maximale pondérée pour un vent de 140km/h est:

$$V_{ef} = 50 \cdot 10^{-6} \cdot 140^2 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot 5^2 \cdot 0.5 = 2.55 kN \quad (7.17)$$

obtenue quand le plan de la parabole est parallèle au sol, donc au vent.

Soit μ l'angle entre le vérin et le bras de levier. On a

$$\mu = \arccos \frac{L^2 + L_v^2 - \lambda^2}{2 \cdot L_v \cdot L} \quad (7.18)$$

En considérant la composante du vent perpendiculaire au bras de levier, nous obtenons l'effort qui crée le couple que doit vaincre le vérin étant donné que le bras de levier est perpendiculaire, à tout instant, au plan de la parabole. En effet, la composante du vent créant le moment étant parallèle au plan de la parabole, cette composante est donc perpendiculaire au bras de levier. Or la figure ci-dessus montre que si on appelle V_e la vitesse du vent supposée horizontale à la surface de la terre et V_v sa composante perpendiculaire au bras de levier, nous avons:

$$V_v = 2,55 \cdot (\sin(\Gamma_0 + 90)) ^2 \quad (7.19)$$

Donc l'effort V développé par le vérin est

$$V = \frac{2,55 \cdot (\sin(\Gamma_0 + 90))^2 \cdot 0,4}{L \cdot \sin \mu} \quad (7.20)$$

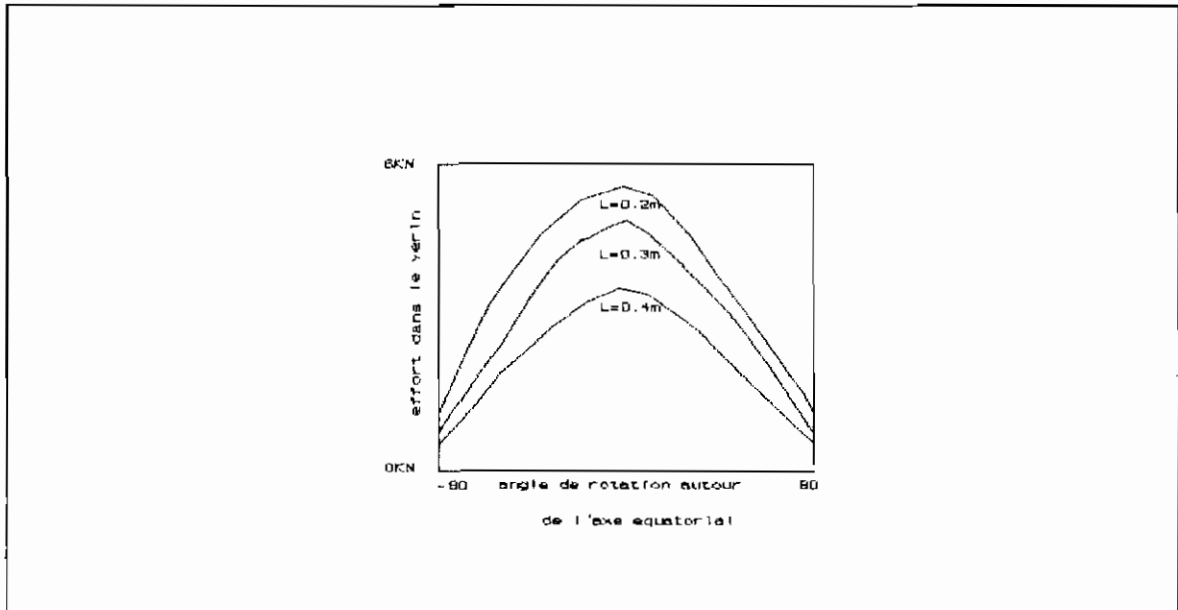


Figure 7.10: Effort soumis au vérin

7.4 CHOIX DES PRINCIPAUX ELEMENTS

7.4.1 Le support de l'axe équatorial

Nous calculerons cet élément sur la base de la flexion et de la torsion. Nous considérerons un vent de 140 km/h avec l'intérieur de la parabole toute ouverte à ce vent. La force pondérée créée par ce vent est:

$$V_{e2} = 50 \times 10^{-6} \times 140^2 \times \frac{\pi}{4} \times 5^2 \times 0.5 \times 1.5 = 14.43 \text{ kN} \quad (7.21)$$

et se répartie également aux points R_1 et R_2 . Vers des latitudes élevées le moment créé est

$$M = \frac{14.43}{2} \cdot R_1 R_2 \quad (7.22)$$

avec $R_1 R_2 = 2.7\text{m}$ on a $M = 19.48\text{kN.m}$

Si on se propose d'adopter un profilé rond de diamètre extérieur D_e et de diamètre intérieur D_i on a

Le moment d'inertie axial

$$I_{xx} = \frac{\pi}{64} (D_e^4 - D_i^4) \quad (7.23)$$

En assumant que le profilé est en acier et de classe 3 selon la clause 13.5 du code Canadien, le moment admissible est:

$$M_I = 0.9 \cdot F_y \cdot S_{xx}$$

où S_{xx} est le module de flexion et F_y la limite élastique de l'acier avec

$$S_{xx} = 2 \cdot \frac{I_{xx}}{D_e} \quad (7.24)$$

On arrive au fait qu'on pourra utiliser un profilé $D_e = 110\text{mm}$ et $D_i = 90\text{mm}$ si on ne considère que la flexion comme le prouve le graphique ci-dessous:

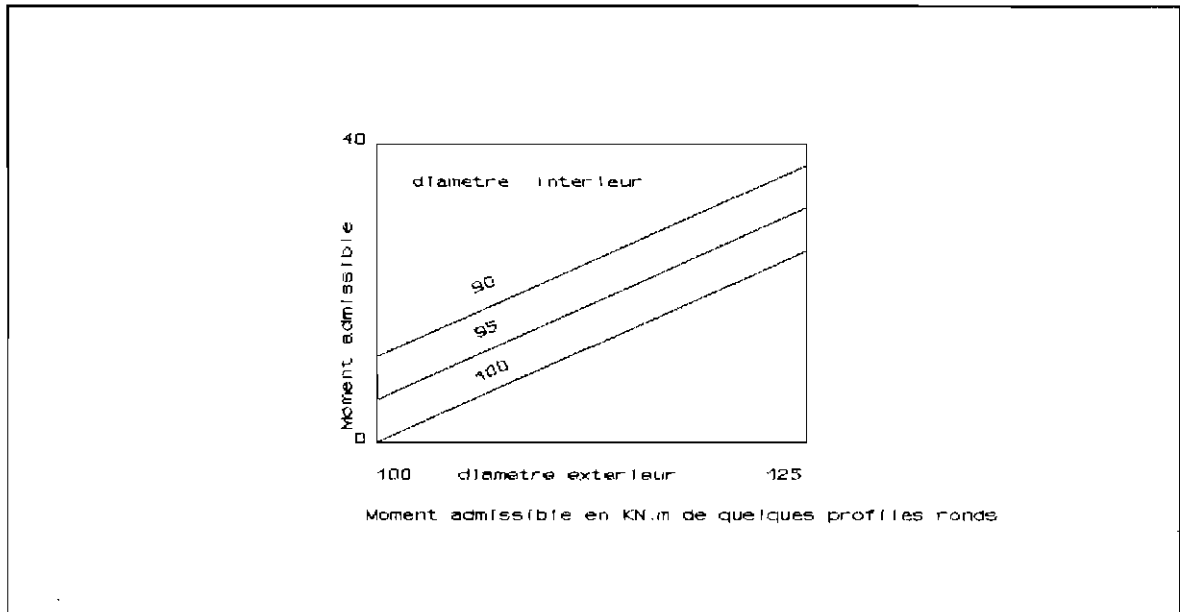


Figure 7.11: Moment admissible dans les profilés ronds

Vérifions avec la torsion en plus

La contrainte de cisaillement due à la torsion est donnée

$$\tau_{xy} = \frac{T r}{J} = \frac{20 \cdot 10^6 \times 55}{\frac{\pi}{32} (110^4 - 90^4)} = 138,67 \text{ Mpa} \quad (7.25)$$

La contrainte de traction due à la flexion est donnée par

$$\sigma_x = 2 \tau_{xy} = 227,34 \text{ Mpa} \quad (7.26)$$

La contrainte principale est donc

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_x}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_x}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} = 334 \text{ Mpa} \quad (7.27)$$

Cette contrainte est légèrement supérieure à celle admissible pour ne pas atteindre la zone plastique. Cependant, nous maintiendrons le profilé sous la condition de ne pas aller à des latitudes de plus de 45°.

Le déplacement du support de l'axe équatorial

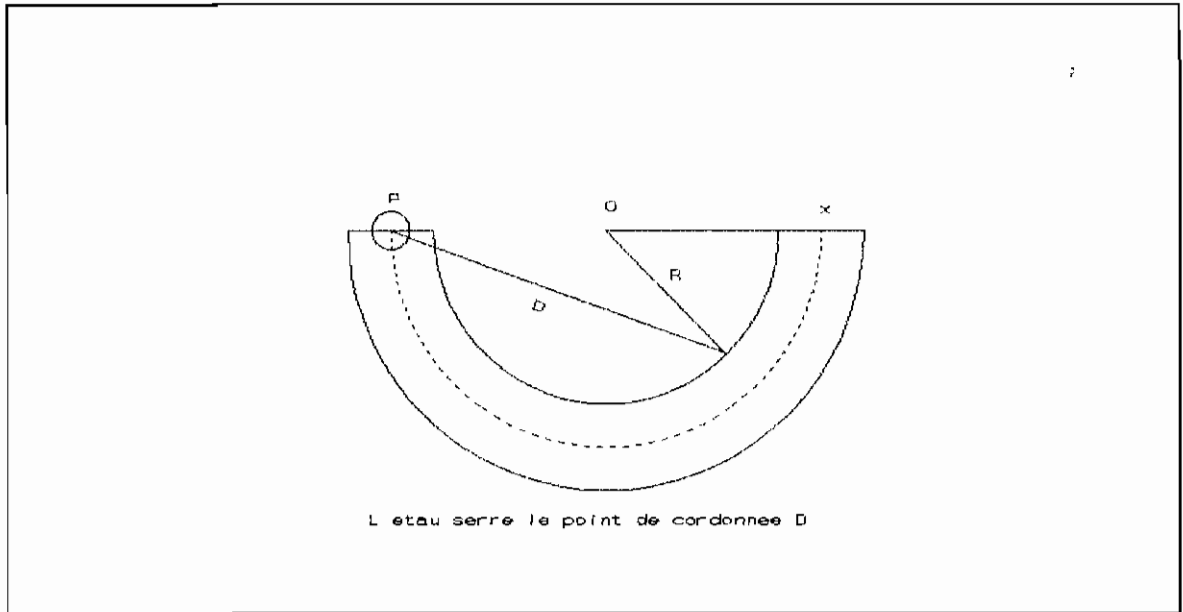


Figure 7.12: Illustration du calcul du déplacement

Nous avons dit que la torsion était plus à craindre au voisinage de l'étai ; le reste du cercle-support étant, essentiellement, soumis à des efforts de flexion.

Pour l'évaluation du déplacement nous utiliserons le théorème de Castigliano basé sur l'énergie de déformation; cette énergie étant donnée dans notre cas par

$$U = \int_0^\pi \frac{M^2 dx}{2EI_x} = \int_0^\pi \frac{M(\theta)^2}{2EI_x} R d\theta \quad (7.28)$$

or

$$M(\theta) = P \cdot D(\theta) = P \cdot \frac{\sin \theta}{\sin \frac{\theta}{2}} \cdot R \quad (7.29)$$

donc

$$U = \frac{1}{2EI_x} P^2 R^3 \int_0^\pi \left(\frac{\sin\theta}{\sin\frac{\theta}{2}} \right)^2 d\theta \quad (7.30)$$

la flèche est donnée par

$$\xi = \frac{\partial U}{\partial P} = \frac{1}{2EI_x} R^3 P \int_0^\pi \left(\frac{\sin\theta}{\sin\frac{\theta}{2}} \right)^2 d\theta \leq \frac{\pi R^3 P}{EI_x} \quad (7.31)$$

soit donc

$$\xi = \frac{7215.10^3 \times 1350^3 \times \pi}{200.10^9 \times 3966261} = 0.07 \text{ mm} \quad (7.32)$$

7.4.2 Le support principal (le quadrupède)

La plaque qui doit relier les 4 cornières (les pieds) est sur la base d'un cône de hauteur $R=2.7/2=1.35\text{m}$ et ayant un angle d'ouverture de 10° . Si on désigne donc par b le rayon de cette plaque on a :

$$b = 1.35 \cdot \tan 10^\circ = 24 \text{ cm} \quad (7.33)$$

On inclinera également les pieds d'un angle de 10° par rapport à la verticale. On considère que la hauteur fait 1.65m soit donc un écartement de $1.65\text{m} \cdot \tan 10^\circ = 29\text{cm}$

On fera de la vérification de proche en proche avec les cornières normalisées tabulées.

On se rend compte, comme le prouve l'exemple de calcul ci-dessous, que le $35 \times 35 \times 3$ supporte les moments de flexion engendrés.

En effet, à une distance x , de la base vers le bas, on a le schéma de coupe de la vue de dessus qui se présente comme suit:

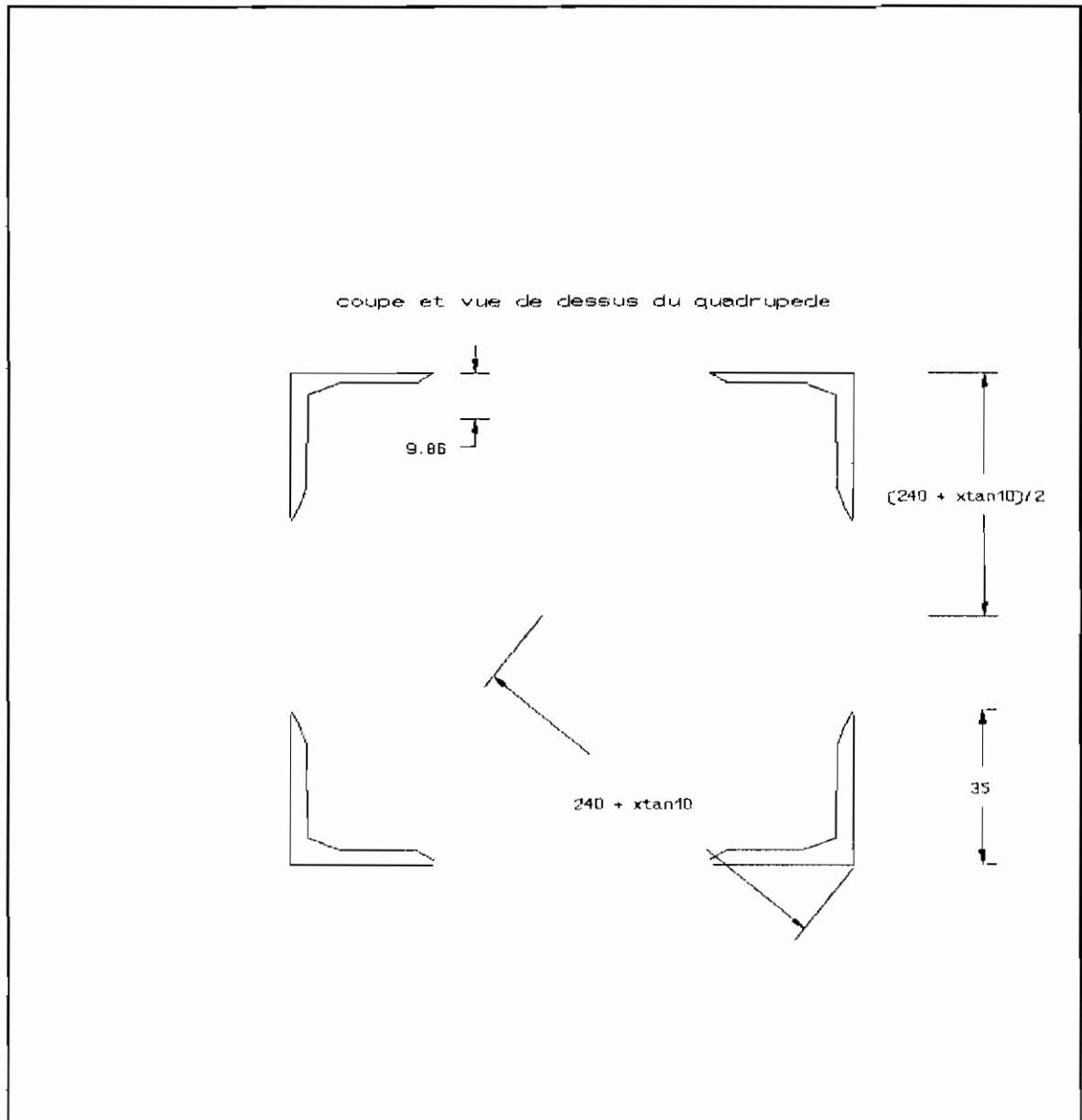


Figure 7.13: Coupe du support principal (le quadrupède)

$$I_{xx} = 4 \left(0.024x10 + 201 \left(\frac{x \tan 10 + 240}{\sqrt{2}} - 9.86 \right)^2 \right) \quad (7.34)$$

Et en assumant que l'ensemble est de classe 3 on obtient le moment admissible

$$M_I = 0.9 \cdot F_y \cdot S_{xx} = 0.9 \cdot 300 \cdot \frac{I_{xx} \cdot 2}{240 + x \cdot \tan 10} \quad (7.35)$$

On a ci-dessous la variation de ce moment en fonction de la

distance x entre la plaque inférieure et le lieu de la coupe comparé à celui effectivement appliqué.

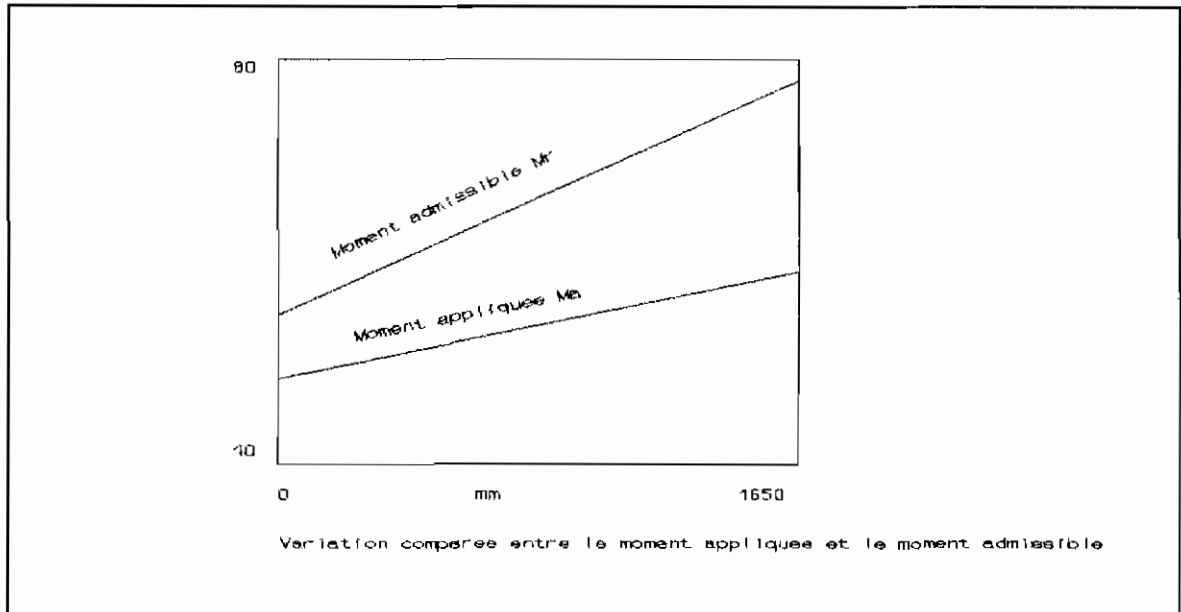


Figure 7.14: Variation comparée entre le moment appliquée au support principal et le moment admissible.

7.4.3 calculs des boulons de l'étau

Coefficient de frottement acier - acier $\mu = 0.15$

donc la force de serrage qui doit être développée dans les boulons de l'étau est:

$$F_s = \frac{14.43 \text{ kN}}{0.15} = 96200 \text{ N} \quad (7.36)$$

Considérant les boulons de la classe 4.8, la pré-charge minimale est:

$$F_i = 0.9 \cdot S_p \cdot A_t = 0.9 \times 310 \times A_t = 279 A_t \quad (7.37)$$

Si nous voulons utiliser 4 boulons, la surface de traction A_t doit vérifier

$$4 \times 279 \times A_t \geq 96200N \quad (7.38)$$

$$A_t \geq 86.2mm^2 \quad (7.39)$$

Les dimensions normalisées ISO nous conduisent aux boulons M 14x2.

Nota: Si les boulons sont pris dans la classe 5.8 on pourra prendre les M 10x1.75

Le diamètre de tête des boulons

$$D_t \approx 1.5d = 1.5 \times 14 \approx 20mm \quad (7.40)$$

On prendra ainsi un étau de largeur

$$b = 20 + 20 + 40 + 20 + 20 = 120mm \quad (7.41)$$

Les contraintes normales dans les boulons

$$\sigma_x = \frac{F_t}{A_t} = 0.9Sp = 279Mpa \quad (7.42)$$

Le couple de serrage nécessaire

$$T = 0.2 \times F_t \times d = 0.2 \times 42948.7 \times 0.014 = 120N.m \quad (7.43)$$

La torsion reprise par le boulon

$$T_b = 0.5T = 60.12N.m \quad (7.44)$$

Le diamètre à la racine du boulon

$$d_r = 14 - 2 \times 2 \times 0.54127 \times 2 = 11.83mm \quad (7.45)$$

Le cisaillement lors du serrage est donc

$$\tau_{xy} = \frac{16T_b}{\pi d_r^3} = 184.9Mpa \quad (7.46)$$

Le facteur de sécurité minimal

$$FS_{\min} = \frac{S_u}{\sigma_1} \quad (7.47)$$

où

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_x}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_x}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} = 371 \text{ Mpa} \quad (7.48)$$

donc

$$FS_{\min} = \frac{420}{371.1} = 1.13 \quad (7.49)$$

7.4.4 Epaisseur de la plaque de l'étai

Les plaques de l'étai supportent essentiellement L'effort longitudinal découlant de la pression p qui naît à l'intérieur de l'étai du fait du serrage de ses boulons.

on a les équations suivantes:

$$\sigma_\theta = \frac{pR_i}{t} = \frac{F_s}{2\pi tb} \quad (7.50)$$

$$t \geq \frac{96200}{2\pi \times 120 \times 0.9 \times 300} = 0.47 \text{ mm} \quad (7.51)$$

où t est l'épaisseur des plaques.

7.4.5 Vérification de l'étai en flexion

La trace de l'étai sur la plaque sur laquelle sa partie inférieure est en flexion. Cet effort découlant de la torsion du cercle-support. Au vu de cette trace représentée ci-dessus,

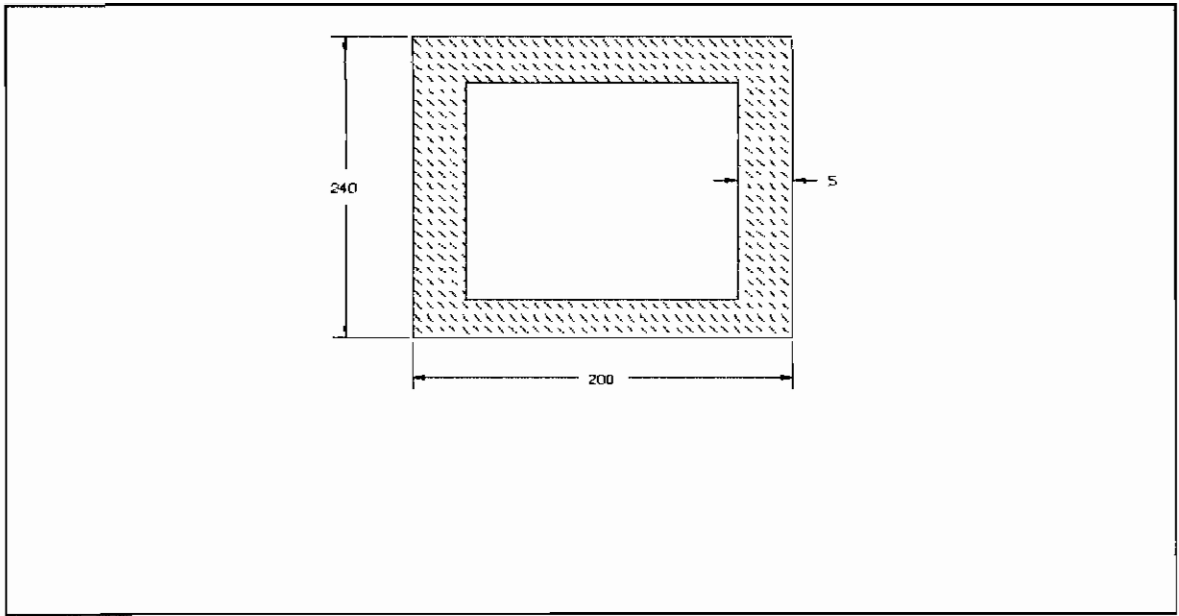


Figure 7.15: Trace de la partie inférieure de l'étau sur la plaque support.

le moment de flexion admissible est donnée par la relation suivante:

$$M_{adm} = 0.9 \cdot F_y \cdot \frac{\frac{1}{12} \cdot (250^3 \cdot 200 - 240^3 \cdot 190)}{\frac{240}{2}} = 87 \text{ KN.m} \quad (7.52)$$

7.4.6 Les caractéristiques de l'écrou

On utilise le critère de l'énergie de distorsion. On prendra le nombre de filets de l'écrou $n = 3$. Donc l'épaisseur des filets t doit vérifier

$$t \geq \frac{F_x F_S}{3 \times 0.577 \times 310 \times \pi \times 14} = 2 \text{ mm} \quad (7.53)$$

7.4.7 Les vis-écrous des plaques

L'étau, sera soudé sur une plaque; elle-même inclinée par

rapport à une autre en ajustement fin de quelques degrés. On disposera 4 vis avec double écrou, M 14x2, sur l'une des plaques au sommets d'un carré de 400 mm de diagonale.

7.4.7.1 les vis en flexion

La flexion de l'ensemble des vis découlera de la torsion du cercle-support. L'inertie de flexion de l'ensemble des boulons est alors

$$I_x = 4 \left(\frac{\pi}{64} \times 14^4 + \frac{\pi}{8} \times 14^2 \times 200^2 \right) = 12322586 \text{ mm}^4 \quad (7.54)$$

Les contraintes de traction dans les vis sont données par

$$\sigma_x = \frac{MC}{I_x} = \frac{20 \cdot 10^6 \left(\frac{200}{\sqrt{2}} \right)}{12322586} = 229 \text{ Mpa} \quad (7.55)$$

7.4.7.2 les filets en traction

La force de traction équivalent à la contrainte de traction calculée ci-dessus est:

$$F_t = \sigma_x A_t = 229 \times \frac{\pi}{4} \times 14^2 = 35252 \text{ N} \quad (7.56)$$

En utilisant le critère de l'énergie de distorsion, avec un nombre de filets $n=3$ on a:

$$t = \frac{F_t \times FS}{n \times 0.577 \times S_{yx} \times \pi \times d} = 1.66 \text{ mm} \quad (7.57)$$

7.4.8 L'épaisseur des plaques

Les plaques doivent supporter l'effort d'arrachement provoqué par la tête des boulons sous l'effet de la traction ou de la compression. Si on note e leur épaisseur et d_t le diamètre de tête des boulons on a:

$$e \geq \frac{F_t \times FS}{\pi \times d_t \times 0.577 \times S_y} = \frac{35252 \times 1.13}{\pi \times 20 \times 0.577 \times 310} = 3.13 \text{ mm} \quad (7.58)$$

7.4.9 La dimension de l'axe équatorial

L'axe équatorial est essentiellement en flexion par l'intermédiaire de ces deux points d'appui. Il supporte un moment de flexion M_{appl} tel que:

$$M_{appl} = \frac{14.43}{2} \cdot \frac{2.7}{2} = 9740250 \text{ N}\cdot\text{m}$$

Si on prend une section carrée pleine en acier, le côté a est donné par:

$$a = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot M_{appl}}{0.9 \cdot 310}} = 59.37 \text{ mm} \quad (7.60)$$

7.5 RECAPITULATIF DES DIMENSIONS

Tableau 7.1 Résumé des calculs de dimensionnement du support

Désignations	Dimensions principales
- Tôles d'acier	- épaisseur = 5mm
- Boulons	- M 14x2
- Tiges carrée pleine	- coté a = 60mm longueur = 6m
- Profilés en L	- 35x35x3 longueur = 6m
- Profilé rond	- 90x102 longueur = 6m

Nota: Le profilé rond n'est pas exactement celui que donne les calculs pour toutes les latitudes, mais il a été choisi parce qu'il convient pour Thiès et qu'on ne peut actuellement trouver mieux sur le marché.

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

L'objectif premier était de fournir, à un instant donné, un prototype d'une antenne parabolique de 5 m après une étude qui soit toute aussi consistante que cohérente. La réalisation de la parabole devant nous permettre:

- d'une part, de confirmer ou infirmer nos hypothèses de travail quelques fois trop fortes, quelques fois incomplètes

- et d'autre part, de prendre la décision de poursuivre les travaux pour créer ou non la Société AFSATEL-SYSTEMS ou tout au moins de consigner dans un guide tous les renseignements utiles pour l'amélioration du prototype ou la construction plus aisée d'autres antennes de configuration différente.

Mais, comme cela peut arriver dans tout projet d'ingénierie, le temps qu'il nous a fallu pour asseoir tout le travail préalable à la réalisation elle-même a été plus long que prévu.

Néanmoins, nous pouvons signaler, pour mémoire, qu'il s'agissait surtout pour de vérifier par nous-mêmes les exigences d'un travail de cette envergure et en tirer tous les enseignements possibles; comme face au problème du retour élastique qui nous a beaucoup gêné dans nos essais de pliages, de vérifier le comportement de la parabole sous des vents perturbés quasi tourbillonnaires; ce dont nous n'avons pas tenu compte dans nos calculs, d'évaluer le temps de travail nécessaire à des ouvriers d'un certain niveau de compétence pour les besoins de l'évaluation du coût réel de l'oeuvre, et enfin construire un

guide assez détaillé pour ceux qui voudraient se construire une antenne parabolique sans trop de moyens.

Le calcul par l'analyse bi-dimensionnelle, bien qu'il donne des résultats satisfaisant, pourraient être approfondi par l'utilisation d'outils informatiques plus performants (IMAGE 3D par exemple); ce qui permettrait de réduire les sections des éléments.

D'autres projets pourraient être initiés dans le même sens par l'étude et la réalisation d'autres types d'antennes (Cassegrain, Offset etc..) où l'école serait le maître d'ouvrage et offrirait ces services à d'autres compagnies qui désireraient se spécialiser dans la production d'antennes.

ANNEXE A

METHODE D'ETUDE DE LA STRUCTURE

On remarque que les charges appliquées à la structure sont essentiellement le poids propre, les efforts engendrés par le vent et les contraintes thermiques. La norme prévoit une vitesse de conception de 140 km/h, ce qui est sécuritaire dans la mesure où les vitesses maximales de vent enregistrées dans la sous-région donne une valeur moyenne de l'ordre de 72 km/h.

Le critère de dimensionnement (choix de sections et de diamètre de boulons) est le calcul aux états limites. Il stipule que la rupture aura lieu lorsque toute la section du matériau atteint la zone plastique. Les coefficients de pondération sont appliquées aux charges de service et la résistance des matériaux sont évaluées en appliquant un coefficient de minoration [12].

B.1. ETUDE MECANIQUE DE LA STRUCTURE ARRIERE DU
REFLECTEUR, CALCUL DES BOULONS ET DE LA STRUCTURE DE
SUPPORT DU CORNET

B.1.1 Etude mécanique de la structure arrière du
réflecteur

B.1.1.1 Evaluation des charges de
sollicitations

Les charges appliquées à la structure sont essentiellement le poids propre et les efforts engendrés par le vent. Nous avons pris comme vitesse de conception celle d'un vent de 140 km/h. Les efforts calculés à l'aide de celle-ci sont majorées de 15% pour tenir compte du poids de la structure inconnue au départ. Une fois les sections des éléments choisies on vérifie si le poids convient. Dans le cas contraire, on recommence partant maintenant du poids précédemment trouvé. Signalons surtout que le critère de conception utilisé est celui du calcul aux états limites comme spécifié à l'annexe A.

La pression hydrostatique du vent [12] est donnée par

$$P \text{ (kPa)} = 50 \cdot 10^{-6} \cdot V^2 \quad (\text{B.1})$$

On obtient donc $P = 0.98 \text{ kPa}$

Calcul de la surface tributaire à chaque noeud de la structure

La relation (5.9) montre que la surface d'une parabololoïde de révolution ne dépend que d'un facteur c et du carré du diamètre d'ouverture de la parabololoïde. Une analyse très attentive des formules intégrales (5.1) et (5.6) puis de la relation finale (5.9) trouvée nous montre que le coefficient c n'est rien d'autre que le rapport entre la distance focale de la parabole

(engendrant la parabololoïde) et le diamètre d'ouverture de la parabololoïde.

Ainsi donc pour une parabololoïde donnée nous pouvons calculer la surface annulaire, $strib$, comprise entre deux points d'abscisses x_m et x_n de la parabole mère lorsque celle-ci effectue une révolution complète. Cette surface est donnée par la relation :

$$strib = s\left(\frac{f}{2 \cdot x_m}\right) \cdot x_m^2 - s\left(\frac{f}{2 \cdot x_n}\right) \cdot x_n^2 \quad (B.2)$$

où la fonction s est telle que définie par la relation (5.9). Soit p , la distance entre deux noeuds consécutifs d'une ferme.

Le noeud j d'abscisse x_j est le barycentre des points d'abscisse $x_j + p/2$ et $x_j - p/2$ affectés des coefficients 1 (x_j est pris dans le système d'axes de la figure 5.1).

La surface tributaire au noeud j est donc la surface annulaire comprise entre les points $x_j - p/2$ et $x_j + p/2$ divisée par le nombre k de ferme.

Posons

$$\alpha_j = \frac{f}{2 \cdot (x_j - \frac{p}{2})} \quad (B.3)$$

$$\beta_j = \frac{f}{2 \cdot (x_j + \frac{p}{2})} \quad (B.4)$$

La surface tributaire sn_j au noeud j est donnée par :

$$sn_j = \frac{4}{k} \cdot [s(\alpha_j) \cdot (x_j + \frac{p}{2})^2 - s(\beta_j) \cdot (x_j - \frac{p}{2})^2] \quad (B.5)$$

L'effort s'exerçant au noeud j $f(x_j)$ est donnée par :

$$f(x_j) = P \cdot sn_j$$

L'effort ch_j utilisé dans l'étude de la structure en tenant compte de la surface effective offert au vent est donné par :

$$ch_j = 0.6 \cdot (1.5 + 1.25 \cdot maj) \cdot f(x_j) \quad (B.6)$$

où maj = majoration de 15 %

L'orientation de cette force et ces composantes suivant les axes x et y est donnée dans le tableau ci-après pour chacun des noeuds de la ferme. L'inclinaison, θ_j , de la droite d'action de la force ou charge ch_j par rapport à la verticale est donnée par

$$\tan(\theta_j) = \left(\frac{dz}{dx} \right)_{x=x_j} = \frac{x_j}{2 \cdot f} \quad (B.7)$$

Le tableau B.1.1, ci-dessous, nous montre les charges et leur inclinaison.

x_j	$\tan(\theta_j)$	ch_j kN	F_x kN	$-F_y$ kN
0.1	0.0333	0.0008	$2.81 \cdot 10^{-5}$	0.0008
0.25	0.0833	0.0188	0.0016	0.0188
0.5	0.1667	0.0381	0.0063	0.0376
0.75	0.25	0.0581	0.0141	0.0563
1	0.3333	0.0792	0.025	0.0751
1.25	0.4167	0.1017	0.0391	0.0939
1.5	0.5	0.1259	0.0563	0.1126
1.75	0.5833	0.1521	0.0767	0.1314
2.0	0.6667	0.1805	0.1001	0.1502
2.25	0.75	0.2112	0.1267	0.1689
2.50	0.8333	0.2291	0.1467	0.176

Tableau B.1.1 : Charges de sollicitations de la structure

Il a été établi pour un vent soufflant à l'intérieur de la parabole. Pour un vent soufflant de l'arrière seul le sens des forces change.

B.1.1.2 Etude de la structure arrière du réflecteur

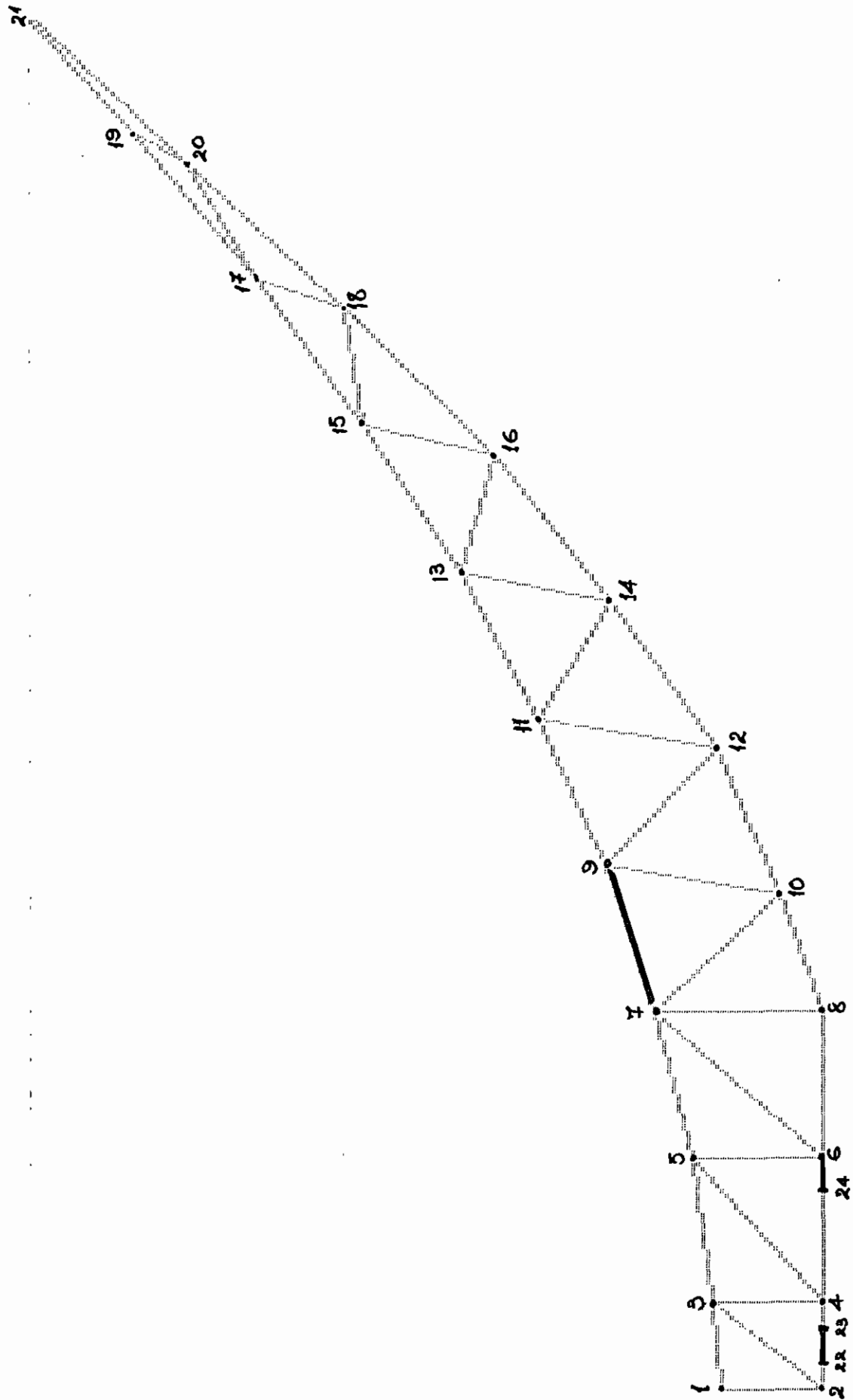
Cette étude a été réalisée à l'aide du logiciel PFRAME. Les résultats obtenus sont donnés à l'annexe B.2.1.2.1 . La section des éléments est choisie en tenant compte des déplacements maxima et des efforts admissibles. Les efforts et déplacements les plus élevés sont soulignés.

On remarquera surtout que cette étude ne tient pas compte de l'effet des éléments servant à améliorer la précision de la surface et des éléments diagonaux de contreventements. Ceux-ci pouvant bien sûr entraîner une redistribution des efforts dans les membrures et une diminution des déplacements.

Description de la forme en cadre,
rigide de la structure arrière du
reflecteur.

Fig. 10 = 09

Fig. 11 = 10



SOFTEK SERVICES LTD.

_ Micro Engineering Software _

REGISTRATION NO. 100158

P-FRAME

Release 1.03

<C> Copyright Softek Services Ltd. 1983,1984

```
-----  
-----  
STR. 01      INITIALIZING DATA      DRIVE A  
  
TOTAL    TOTAL    TOTAL    TOTAL    TOTAL    TOTAL    YOUNGMOD    SHEARMOD  
MEMBERS  JOINTS    SPRINGS  SECTIONS LD CASES  LD COMB  (MPA)      (MPA)  
  
42       24       0        3        2        0        200000     76923
```

CLIENT: AFSATEL-SYSTEMS
USER NAME: CHRISTIAN JESUS BAYODE FAYOMI
FRAME DESCRIPTION: PROJET DE FIN D'ETUDES
UNITS (M/I): M
BANDWIDTH OPTIMIZATION (Y/N): Y

Reperage des points de jointure des membrures de la structure

STR.	01	JOINT DATA			DRIVE A
JOINT NO.	X-FREEDOM	Y-FREEDOM	Z-FREEDOM	X-COORDINATE (METERS)	Y-COORDINATE (METERS)
1	0	1	1	+0.1000	+0.1517
2	1	1	1	+0.1000	+0.0000
3	1	1	1	+0.2500	+0.1604
4	1	1	1	+0.2500	+0.0000
5	1	1	1	+0.5000	+0.1917
6	1	1	1	+0.5000	+0.0000
7	1	1	1	+0.7500	+0.2438
8	0	0	1	+0.7500	+0.0000
9	1	1	1	+1.0000	+0.3167
10	1	1	1	+0.9500	+0.0681
11	1	1	1	+1.2500	+0.4104
12	1	1	1	+1.2000	+0.1531
13	1	1	1	+1.5000	+0.5250
14	1	1	1	+1.4500	+0.3062
15	1	1	1	+1.7500	+0.6604
16	1	1	1	+1.7000	+0.4764
17	1	1	1	+2.0000	+0.8167
18	1	1	1	+1.9500	+0.6921
19	1	1	1	+2.2500	+0.9938
20	1	1	1	+2.2000	+0.9192
21	0	1	1	+2.5000	+1.1917
22	0	1	0	+0.1500	+0.0000
23	0	1	0	+0.2000	+0.0000
24	1	1	0	+0.4000	+0.0000

Définitions des sections de la structure

STR. 01 MEMBER DATA DRIVE A

Section Properties Data :

SECTION NUMBER	X-SECTIONAL AREA (MM2)	MOM. INERTIA 1.0E+06 (MM4)	SHEAR AREA (MM2)
1	+87.000	+0.003	+87.000
2	+90.240	+0.005	+90.240
3	+141.000	+0.013	+141.000

Member Connectivity Data :

MEMBER NUMBER	LOWER JOINT	GREATER JOINT	LOWER END TYPE	GREATER END TYPE	SECTION NUMBER
1	1	2	1	1	2
2	3	4	1	1	2
3	5	6	1	1	2
4	7	8	1	1	2
5	9	10	1	1	2
6	11	12	1	1	2
7	13	14	1	1	2
8	15	16	1	1	2
9	17	18	1	1	2
10	19	20	1	1	2
11	1	3	1	1	2
12	2	22	1	1	2
13	3	5	1	1	2
14	6	24	1	1	2
15	5	7	1	1	2
16	6	8	1	1	2
17	7	9	1	1	2
18	8	10	1	1	2
19	9	11	1	1	2
20	10	12	1	1	2
21	11	13	1	1	2
22	12	14	1	1	2
23	13	15	1	1	2
24	14	16	1	1	2
25	15	17	1	1	2
26	16	18	1	1	2
27	17	19	1	1	2
28	18	20	1	1	2
29	19	21	1	1	2
30	20	21	1	1	2
31	2	3	1	1	2
32	4	5	1	1	2
33	6	7	1	1	2
34	7	10	1	1	2
35	9	12	1	1	2
36	11	14	1	1	2
37	13	16	1	1	2
38	15	18	1	1	2
39	17	20	1	1	2
40	22	23	1	1	2
41	4	23	1	1	2

42

4

24

1

1

2

9

Definition des charges

STR. 01 LOAD DATA DRIVE A

LOAD CASE 1

Initializing Data :

LOAD CASE NO.	NO. OF LOADED JOINTS	NO. OF LOADED MEMBERS	DESCRIPTION
1	11	42	Charge perm+surchage (vent avant)

Joint Load Data :

RECORD NUMBER	LOADED JOINT	HORIZONTAL LOAD (KN)	VERTICAL LOAD (KN)	EXTERNAL MOMENT (KN-M)
1	1	+0.0000	-0.0008	+0.0000
2	3	+0.0016	-0.0188	+0.0000
3	5	+0.0063	-0.0376	+0.0000
4	7	+0.0141	-0.0563	+0.0000
5	9	+0.0250	-0.0751	+0.0000
6	11	+0.0391	-0.0939	+0.0000
7	13	+0.0563	-0.1126	+0.0000
8	15	+0.0767	-0.1314	+0.0000
9	17	+0.1001	-0.1502	+0.0000
10	19	+0.1267	-0.1689	+0.0000
11	21	+0.1467	-0.1760	+0.0000

Distributed Load Data :

RECORD NUMBER	LOADED MEMBER	SLOPED LD. KN/M SLOPE	LOCAL XY KN/M PERP.	PROJ. LOAD KN/M HORIZ
---------------	---------------	-----------------------	---------------------	-----------------------

Point Load Data :

REC NO.	MEM NO.	PT. LOAD 1 (KN)	DIST. (M)	PT. LOAD 2 (KN)	DIST. (M)	PT. LOAD 3 (KN)	DIST. (M)
---------	---------	-----------------	-----------	-----------------	-----------	-----------------	-----------

Temperature Load Data :

RECORD NUMBER	MEMBER NUMBER	TEMPERATURE DIFFERENCE (CENTIGRADE)	COEFFICIENT OF EXPANSION (MM/MM/C X 100)
1	1	+20.000	+0.00239
2	2	+20.000	+0.00239
3	3	+20.000	+0.00239
4	4	+20.000	+0.00239
5	5	+20.000	+0.00239
6	6	+20.000	+0.00239
7	7	+20.000	+0.00239
8	8	+20.000	+0.00239
9	9	+20.000	+0.00239

10	10	+20.000	+0.00239
11	11	+20.000	+0.00239
12	12	+20.000	+0.00239
13	13	+20.000	+0.00239
14	14	+20.000	+0.00239
15	15	+20.000	+0.00239
16	16	+20.000	+0.00239
17	17	+20.000	+0.00239
18	18	+20.000	+0.00239
19	19	+20.000	+0.00239
20	20	+20.000	+0.00239
21	21	+20.000	+0.00239
22	22	+20.000	+0.00239
23	23	+20.000	+0.00239
24	24	+20.000	+0.00239
25	25	+20.000	+0.00239
26	26	+20.000	+0.00239
27	27	+20.000	+0.00239
28	28	+20.000	+0.00239
29	29	+20.000	+0.00239
30	30	+20.000	+0.00239
31	31	+20.000	+0.00239
32	32	+20.000	+0.00239
33	33	+20.000	+0.00239
34	34	+20.000	+0.00239
35	35	+20.000	+0.00239
36	36	+20.000	+0.00239
37	37	+20.000	+0.00239
38	38	+20.000	+0.00239
39	39	+20.000	+0.00239

LOAD CASE 2

Initializing Data :

LOAD CASE NO.	NO. OF LOADED JOINTS	NO. OF LOADED MEMBERS	DESCRIPTION
2	11	42	Charge perm+surchage(vent arriere)

Joint Load Data :

RECORD NUMBER	LOADED JOINT	HORIZONTAL LOAD (KN)	VERTICAL LOAD (KN)	EXTERNAL MOMENT (KN-M)
1	1	-0.0000	+0.0008	+0.0000
2	3	-0.0016	+0.0188	+0.0000
3	5	-0.0063	+0.0376	+0.0000
4	7	-0.0141	+0.0563	+0.0000
5	9	-0.0250	+0.0751	+0.0000
6	11	-0.0391	+0.0939	+0.0000
7	13	-0.0563	+0.1126	+0.0000
8	15	-0.0767	+0.1314	+0.0000
9	17	-0.1001	+0.1502	+0.0000
10	19	-0.1267	+0.1689	+0.0000
11	21	-0.1467	+0.1760	+0.0000

Distributed Load Data :

RECORD NUMBER	LOADED MEMBER	SLOPED LD. KN/M SLOPE	LOCAL XY KN/M PERP.	PROJ. LOAD KN/M HORIZ
------------------	------------------	--------------------------	------------------------	--------------------------

Point Load Data :

REC NO.	MEM NO.	PT. LOAD 1 (KN)	DIST. (M)	PT. LOAD 2 (KN)	DIST. (M)	PT. LOAD 3 (KN)	DIST. (M)
------------	------------	--------------------	--------------	--------------------	--------------	--------------------	--------------

Temperature Load Data :

RECORD NUMBER	MEMBER NUMBER	TEMPERATURE DIFFERENCE (CENTIGRADE)	COEFFICIENT OF EXPANSION (MM/MM/C X 100)
------------------	------------------	---	--

1	1	+20.000	+0.00239
2	2	+20.000	+0.00239
3	3	+20.000	+0.00239
4	4	+20.000	+0.00239
5	5	+20.000	+0.00239
6	6	+20.000	+0.00239
7	7	+20.000	+0.00239
8	8	+20.000	+0.00239
9	9	+20.000	+0.00239
10	10	+20.000	+0.00239
11	11	+20.000	+0.00239
12	12	+20.000	+0.00239
13	13	+20.000	+0.00239
14	14	+20.000	+0.00239
15	15	+20.000	+0.00239
16	16	+20.000	+0.00239
17	17	+20.000	+0.00239
18	18	+20.000	+0.00239
19	19	+20.000	+0.00239
20	20	+20.000	+0.00239
21	21	+20.000	+0.00239
22	22	+20.000	+0.00239
23	23	+20.000	+0.00239
24	24	+20.000	+0.00239
25	25	+20.000	+0.00239
26	26	+20.000	+0.00239
27	27	+20.000	+0.00239
28	28	+20.000	+0.00239
29	29	+20.000	+0.00239
30	30	+20.000	+0.00239
31	31	+20.000	+0.00239
32	32	+20.000	+0.00239
33	33	+20.000	+0.00239
34	34	+20.000	+0.00239
35	35	+20.000	+0.00239
36	36	+20.000	+0.00239
37	37	+20.000	+0.00239
38	38	+20.000	+0.00239
39	39	+20.000	+0.00239
40	40	+20.000	+0.00239
41	41	+20.000	+0.00239

42

42

+20.000

+0.00239

TOTAL STRUCTURE DEGREES OF FREEDOM = 63

THE HALF-BANDWIDTH = 12 AT MEMBER 15

Déformations des membrures

STR.		JOINT DEFORMATIONS				DRIVE A	
MEM NO.	LD. CSE	X-DISPLACE JL. MM.	Y-DISPLACE JL. MM.	ROTATION JL. RAD.	X-DISPLACE JG. MM.	Y-DISPLACE JG. MM.	ROTATION JG. RAD.
1	1	+0.00000	+0.64254	-0.00013	-0.02370	+0.56942	-0.00016
	2	+0.00000	-0.15237	-0.00003	-0.02377	-0.22272	+0.00006
2	1	+0.07953	+0.61853	-0.00036	-0.01514	+0.54242	-0.00057
	2	+0.02377	-0.12426	+0.00014	+0.00291	-0.19810	+0.00034
3	1	+0.23190	+0.46871	-0.00115	-0.04397	+0.37731	-0.00133
	2	+0.05211	+0.00320	+0.00025	+0.00834	-0.08123	+0.00023
4	1	+0.44524	+0.10919	-0.00182	+0.00000	+0.00000	-0.00180
	2	+0.08313	+0.11392	+0.00001	+0.00000	+0.00000	-0.00013
5	1	+0.71271	-0.35181	-0.00199	+0.21340	-0.36406	-0.00198
	2	+0.15130	+0.15310	+0.00023	+0.15019	+0.01753	-0.00002
6	1	+1.01298	-0.81185	-0.00195	+0.49490	-0.82860	-0.00197
	2	+0.19561	+0.29868	+0.00059	+0.28746	+0.14732	+0.00042
7	1	+1.33244	-1.23955	-0.00177	+0.91608	-1.24553	-0.00188
	2	+0.20212	+0.53336	+0.00092	+0.35393	+0.38266	+0.00073
8	1	+1.64318	-1.59637	-0.00137	+1.35101	-1.60218	-0.00161
	2	+0.15862	+0.86160	+0.00123	+0.34111	+0.71333	+0.00108
9	1	+1.86062	-1.78014	-0.00025	+1.78276	-1.81004	-0.00083
	2	+0.05543	+1.27862	+0.00153	+0.20686	+1.14455	+0.00141
10	1	+1.68835	-1.40383	+0.00385	+1.88131	-1.58659	+0.00241
	2	-0.08302	+1.73790	+0.00113	-0.01235	+1.63642	+0.00135
11	1	+0.00000	+0.64254	-0.00013	+0.07953	+0.61853	-0.00036
	2	+0.00000	-0.15237	-0.00003	+0.02377	-0.12426	+0.00014
12	1	-0.02370	+0.56942	-0.00016	+0.00000	+0.56254	+0.00000
	2	-0.02377	-0.22272	+0.00006	+0.00000	-0.21630	+0.00000
13	1	+0.07953	+0.61853	-0.00036	+0.23190	+0.46871	-0.00115
	2	+0.02377	-0.12426	+0.00014	+0.05211	+0.00320	+0.00025
14	1	-0.04397	+0.37731	-0.00133	-0.06112	+0.45724	+0.00000
	2	+0.00834	-0.08123	+0.00023	+0.00617	-0.11240	+0.00000
15	1	+0.23190	+0.46871	-0.00115	+0.44524	+0.10919	-0.00182
	2	+0.05211	+0.00320	+0.00025	+0.08313	+0.11392	+0.00001
16	1	-0.04397	+0.37731	-0.00133	+0.00000	+0.00000	-0.00180
	2	+0.00834	-0.08123	+0.00023	+0.00000	+0.00000	-0.00013
17	1	+0.44524	+0.10919	-0.00182	+0.71271	-0.35181	-0.00199
	2	+0.08313	+0.11392	+0.00001	+0.15130	+0.15310	+0.00023
18	1	+0.00000	+0.00000	-0.00180	+0.21340	-0.36406	-0.00198

	2	+0.00000	+0.00000	-0.00013	+0.15019	+0.01753	-0.00002
19	1	+0.71271	-0.35181	-0.00199	+1.01298	-0.81185	-0.00195
	2	+0.15130	+0.15310	+0.00023	+0.19561	+0.29868	+0.00059
20	1	+0.21340	-0.36406	-0.00198	+0.49490	-0.82860	-0.00197
	2	+0.15019	+0.01753	-0.00002	+0.28746	+0.14732	+0.00042
21	1	+1.01298	-0.81185	-0.00195	+1.33244	-1.23955	-0.00177
	2	+0.19561	+0.29868	+0.00059	+0.20212	+0.53336	+0.00092
22	1	+0.49490	-0.82860	-0.00197	+0.91608	-1.24553	-0.00188
	2	+0.28746	+0.14732	+0.00042	+0.35393	+0.38266	+0.00073
23	1	+1.33244	-1.23955	-0.00177	+1.64318	-1.59637	-0.00137
	2	+0.20212	+0.53336	+0.00092	+0.15862	+0.86160	+0.00123
24	1	+0.91608	-1.24553	-0.00188	+1.35101	-1.60218	-0.00161
	2	+0.35393	+0.38266	+0.00073	+0.34111	+0.71333	+0.00108
25	1	+1.64318	-1.59637	-0.00137	<u>+1.86062</u>	<u>-1.78014</u>	-0.00025
	2	+0.15862	+0.86160	+0.00123	+0.05543	+1.27862	+0.00153
26	1	+1.35101	-1.60218	-0.00161	+1.78276	-1.81004	-0.00083
	2	+0.34111	+0.71333	+0.00108	+0.20686	+1.14455	+0.00141
27	1	+1.86062	-1.78014	-0.00025	+1.68835	-1.40383	+0.00385
	2	+0.05543	+1.27862	+0.00153	-0.08302	+1.73790	+0.00113
28	1	+1.78276	-1.81004	-0.00083	<u>+1.88131</u>	<u>-1.58659</u>	+0.00241
	2	+0.20686	+1.14455	+0.00141	-0.01235	+1.63642	+0.00135
29	1	+1.68835	-1.40383	+0.00385	+0.00000	+0.86858	+0.01083
	2	-0.08302	+1.73790	+0.00113	+0.00000	+1.89918	-0.00011
30	1	+1.88131	-1.58659	+0.00241	+0.00000	+0.86858	+0.01083
	2	-0.01235	+1.63642	+0.00135	+0.00000	+1.89918	-0.00011
31	1	-0.02370	+0.56942	-0.00016	+0.07953	+0.61853	-0.00036
	2	-0.02377	-0.22272	+0.00006	+0.02377	-0.12426	+0.00014
32	1	-0.01514	+0.54242	-0.00057	+0.23190	+0.46871	-0.00115
	2	+0.00291	-0.19810	+0.00034	+0.05211	+0.00320	+0.00025
33	1	-0.04397	+0.37731	-0.00133	+0.44524	+0.10919	-0.00182
	2	+0.00834	-0.08123	+0.00023	+0.08313	+0.11392	+0.00001
34	1	+0.44524	+0.10919	-0.00182	+0.21340	-0.36406	-0.00198
	2	+0.08313	+0.11392	+0.00001	+0.15019	+0.01753	-0.00002
35	1	+0.71271	-0.35181	-0.00199	+0.49490	-0.82860	-0.00197
	2	+0.15130	+0.15310	+0.00023	+0.28746	+0.14732	+0.00042
36	1	+1.01298	-0.81185	-0.00195	+0.91608	-1.24553	-0.00188
	2	+0.19561	+0.29868	+0.00059	+0.35393	+0.38266	+0.00073
37	1	+1.33244	-1.23955	-0.00177	+1.35101	-1.60218	-0.00161
	2	+0.20212	+0.53336	+0.00092	+0.34111	+0.71333	+0.00108
38	1	+1.64318	-1.59637	-0.00137	+1.78276	-1.81004	-0.00083

	2	+0.15862	+0.86160	+0.00123	+0.20686	+1.14455	+0.00141
39	1	+1.86062	-1.78014	-0.00025	+1.88131	-1.58659	+0.00241
	2	+0.05543	+1.27862	+0.00153	-0.01235	+1.63642	+0.00135
40	1	+0.00000	+0.56254	+0.00000	+0.00000	+0.55966	+0.00000
	2	+0.00000	-0.21630	+0.00000	+0.00000	-0.21148	+0.00000
41	1	-0.01514	+0.54242	-0.00057	+0.00000	+0.55966	+0.00000
	2	+0.00291	-0.19810	+0.00034	+0.00000	-0.21148	+0.00000
42	1	-0.01514	+0.54242	-0.00057	-0.06112	+0.45724	+0.00000
	2	+0.00291	-0.19810	+0.00034	+0.00617	-0.11240	+0.00000

Analyse des forces et moments dans les membrures

STR. 01		MEMBER			END ACTIONS		DRIVE A	
MEM NO.	LD. CSE	AXIAL (KN) LOWER JT.	SHEAR (KN) LOWER JT.	BM (KN-M) LOWER JT.	AXIAL (KN) UPPER JT.	SHEAR (KN) UPPER JT.	BM (KN-M) UPPER JT.	
1	1	-0.072	+0.005	+0.001	+0.072	-0.005	+0.000	
	2	+0.257	+0.089	+0.006	-0.257	-0.089	+0.007	
2	1	+0.063	+0.056	+0.006	-0.063	-0.056	+0.003	
	2	+0.319	+0.172	+0.012	-0.319	-0.172	+0.015	
3	1	+0.022	+0.066	+0.007	-0.022	-0.066	+0.005	
	2	+0.678	+0.156	+0.015	-0.678	-0.156	+0.015	
4	1	+0.544	+0.003	+0.000	-0.544	-0.003	+0.000	
	2	+0.194	+0.059	+0.008	-0.194	-0.059	+0.007	
5	1	+0.765	-0.012	-0.002	-0.765	+0.012	-0.001	
	2	-0.848	+0.001	+0.001	+0.848	-0.001	-0.001	
6	1	+0.690	-0.006	-0.001	-0.690	+0.006	-0.001	
	2	-0.398	+0.009	+0.002	+0.398	-0.009	+0.000	
7	1	+0.700	-0.006	-0.000	-0.700	+0.006	-0.001	
	2	-0.467	+0.004	+0.001	+0.467	-0.004	-0.000	
8	1	+0.844	-0.008	+0.001	-0.844	+0.008	-0.002	
	2	-0.386	+0.009	+0.002	+0.386	-0.009	+0.000	
9	1	+1.000	-0.053	+0.001	-1.000	+0.053	-0.008	
	2	-0.519	+0.032	+0.003	+0.519	-0.032	+0.001	
10	1	-0.291	+0.278	+0.030	+0.291	-0.278	-0.005	
	2	-0.407	-0.053	-0.005	+0.407	+0.053	+0.000	
11	1	-0.743	-0.030	-0.001	+0.743	+0.030	-0.004	
	2	+5.580	-0.065	-0.006	-5.580	+0.065	-0.004	
12	1	+0.071	+0.170	+0.001	-0.071	-0.170	+0.008	
	2	+0.047	-0.284	-0.006	-0.047	+0.284	-0.008	
13	1	-0.870	-0.018	+0.001	+0.870	+0.018	-0.006	
	2	+5.479	-0.058	-0.008	-5.479	+0.058	-0.007	
14	1	+5.532	+0.148	-0.007	-5.532	-0.148	+0.022	
	2	<u>+8.236</u>	-0.211	-0.008	-8.236	+0.211	-0.013	
15	1	-0.950	+0.012	+0.004	+0.950	-0.012	-0.001	
	2	+4.885	-0.052	-0.006	-4.885	+0.052	-0.008	
16	1	+5.452	-0.011	+0.001	-5.452	+0.011	-0.003	
	2	<u>+9.229</u>	-0.054	-0.005	-9.229	+0.054	-0.008	
17	1	-0.225	+0.015	+0.003	+0.225	-0.015	+0.001	
	2	+3.331	+0.009	+0.000	-3.331	-0.009	+0.002	
18	1	+1.394	+0.019	+0.003	-1.394	-0.019	+0.001	
	2	-4.001	+0.021	+0.002	+4.001	-0.021	+0.003	

19	1	+0.535	+0.007	+0.001	-0.535	-0.007	+0.001
	2	+2.368	-0.008	-0.003	-2.368	+0.008	+0.000
20	1	+0.632	+0.006	+0.001	-0.632	-0.006	+0.001
	2	-3.111	-0.017	-0.004	+3.111	+0.017	-0.001
21	1	+1.265	+0.006	+0.000	-1.265	-0.006	+0.002
	2	+1.821	-0.002	-0.002	-1.821	+0.002	+0.001
22	1	-0.081	+0.006	+0.000	+0.081	-0.006	+0.001
	2	-2.430	+0.001	-0.001	+2.430	-0.001	+0.001
23	1	+2.069	+0.008	-0.000	-2.069	-0.008	+0.003
	2	+1.132	-0.002	-0.001	-1.132	+0.002	+0.001
24	1	-0.850	+0.005	-0.000	+0.850	-0.005	+0.002
	2	-1.846	-0.003	-0.002	+1.846	+0.003	+0.001
25	1	+3.305	+0.016	-0.002	-3.305	-0.016	+0.006
	2	+0.450	-0.001	-0.001	-0.450	+0.001	+0.001
26	1	-1.819	+0.013	-0.000	+1.819	-0.013	+0.005
	2	-1.214	-0.001	-0.001	+1.214	+0.001	+0.001
27	1	+4.093	+0.063	-0.005	-4.093	-0.063	+0.024
	2	-0.357	-0.021	-0.002	+0.357	+0.021	-0.005
28	1	-3.300	+0.055	-0.001	+3.300	-0.055	+0.020
	2	-0.376	-0.015	-0.002	+0.376	+0.015	-0.003
29	1	+3.723	-0.190	-0.054	-3.723	+0.190	-0.007
	2	-0.724	+0.034	+0.010	+0.724	-0.034	+0.001
30	1	-2.871	-0.076	-0.038	+2.871	+0.076	+0.007
	2	+0.353	+0.013	+0.006	-0.353	-0.013	-0.001
31	1	-0.116	-0.018	-0.001	+0.116	+0.018	-0.003
	2	+0.048	-0.012	-0.002	-0.048	+0.012	-0.001
32	1	-0.034	-0.025	-0.002	+0.034	+0.025	-0.006
	2	-0.627	-0.015	-0.002	+0.627	+0.015	-0.003
33	1	+0.200	-0.005	+0.001	-0.200	+0.005	-0.002
	2	-1.182	-0.013	-0.002	+1.182	+0.013	-0.003
34	1	-0.740	+0.002	+0.001	+0.740	-0.002	-0.000
	2	+0.898	+0.018	+0.003	-0.898	-0.018	+0.002
35	1	-0.683	-0.003	-0.001	+0.683	+0.003	-0.000
	2	+1.010	+0.001	-0.001	-1.010	-0.001	+0.001
36	1	-0.532	-0.002	-0.001	+0.532	+0.002	+0.000
	2	+0.496	+0.001	-0.001	-0.496	-0.001	+0.001
37	1	-0.463	-0.001	-0.001	+0.463	+0.001	+0.001
	2	+0.510	-0.003	-0.001	-0.510	+0.003	+0.001
38	1	-0.679	+0.015	-0.001	+0.679	-0.015	+0.004
	2	+0.432	-0.006	-0.002	-0.432	+0.006	+0.000

39	1	+0.058	+0.088	-0.003	-0.058	-0.088	+0.023
	2	+0.366	-0.028	-0.002	-0.366	+0.028	-0.004
40	1	+0.000	+0.170	+0.004	+0.000	-0.170	+0.004
	2	<u>+8.627</u>	-0.284	-0.007	-8.627	+0.284	-0.007
41	1	+5.465	+0.170	-0.008	-5.465	-0.170	+0.017
	2	<u>+7.575</u>	-0.284	+0.000	-7.575	+0.284	-0.014
42	1	+5.532	+0.148	+0.007	-5.532	-0.148	+0.015
	2	<u>+8.236</u>	-0.211	-0.013	-8.236	+0.211	-0.018

Calcul des réactions aux appuis

STR. 01		SUPPORT REACTIONS		DRIVE A
JOINT NUMBER	LOAD CSE	X-REACTION (KNTS)	Y-REACTION (KNTS)	Z-REACTION (KNTS-M)
1	1	-0.735	-0.000	+0.000
	2	<u>+5.664</u>	+0.000	-0.000
8	1	-4.142	+1.022	+0.000
	2	<u>-13.082</u>	-1.022	+0.000
21	1	-1.109	+0.000	-0.000
	2	+0.483	-0.000	-0.000
22	1	-0.071	-0.000	+0.012
	2	<u>+8.580</u>	+0.000	-0.016
23	1	<u>+5.465</u>	-0.000	+0.021
	2	-1.052	+0.000	-0.022
24	1	+0.000	-0.000	+0.037
	2	-0.000	+0.000	-0.031

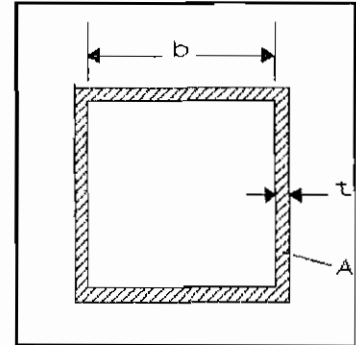
B.1.1.2.2 Vérification du flambage au niveau des membrures

[12],[26]

Tube carré : 20·20·1.2

Aire du tube : $A = 2 \cdot (20 \cdot 1.2 + (20 - 2.4) \cdot 1.2)$

soit $A = 90.24 \text{ mm}^2$



Moment d'inertie:

$$I = 2 \cdot \left[\left(\frac{1}{12} \right) \cdot 17.6^3 \cdot 1.2 + \left(\frac{1}{12} \right) \cdot 1.2^3 \cdot 20 \right] + 2 \cdot 20 \cdot 1.2 \cdot 94$$

$$\text{soit donc } I = 5337.3952 \text{ mm}^4$$

Flambage locale

F_y : limite d'élasticité de l'acier ordinaire $F_y = 300 \text{ MPa}$

$$b/t = (20 - 2.4) / 1.2 = 17.6 / 1.2 = 14.67$$

$$670 / (F_y)^{0.5} = 670 / (300)^{0.5} = 38.6825$$

On remarque que $b/t < 670 / (F_y)^{0.5}$ donc le flambage local n'est pas à craindre.

Flambage général

Le rayon de giration r de la section est:

$$r = (I/A)^{0.5} = 7.6907 \text{ mm} = 7.69 \text{ mm}$$

Calcul de Γ

$$\Gamma = (KL/r) (F_y / \pi^2 \cdot E)^{0.5}$$

K dépend des conditions d'appuis . Nous choisirons la pire condition d'appuis qui correspond à $K = 2$

L = longueur de l'élément $L = 0.35 \text{ m}$

$$\Gamma = (2 \cdot 0.35 / 7.69 \cdot 10^{-3}) (300 / \pi^2 \cdot 200 \cdot 10^3)^{0.5} = 1.1222$$

Charge pondérée en compression

$$C_r = 0.9 \cdot A \cdot F_y (-0.111 + 0.636 + 0.087)$$

$$C_r = 0.9 \cdot 90.24 \cdot 300 (-0.111 + 0.636 \cdot (1.12)^{-1} + 0.087 \cdot (1.12)^{-2})$$

$$C_r = 12.821 \text{ kN} \quad \text{donc pas de risque de flambage.}$$

B.1.2. CALCUL DES BOULONS DE FIXATION DES MEMBRURES DE LA STRUCTURE ARRIERE DU REFLECTEUR A LA STRUCTURE DE BASE

Dans l'étude de la structure arrière du réflecteur parabolique, nous avons fait des hypothèses concernant les appuis, ce qui nous a conduit à des résultats satisfaisants au niveau des contraintes et des déformations de la structure. Il est donc primordial de respecter ces conditions d'appuis dans le reste du design. C'est ce qui justifie le calcul des boulons de fixation à la structure de base. Les boulons sont calculés pour reprendre les efforts de cisaillement et de traction aux appuis définis précédemment.

B.1.2.1. Calcul des diamètres des boulons

La largeur brute du tube est : $L_b = (20+17.6) \cdot 2 = 75.2$

L'épaisseur e du tube est : $e = 1.2 \text{ mm}$

L'aire brute A_g est alors : $A_g = 75.2 \cdot 1.2 = 90.24 \text{ mm}^2$

Contrainte ultime de l'acier ordinaire $F_u = 450 \text{ MPa}$

Dans la calcul des boulons, on a l'habitude de faire l'hypothèse selon laquelle il y aurait plastification de la section brute avant rupture de la section nette [12],[26]. Cette hypothèse nous permet de calculer le diamètre maximal des boulons.

$$(F_y/F_u) = 0.667$$

On remarque que $(F_y/F_u) < 0.85$ par conséquent on a

$$(A_n)_{\max} = 0.85 \cdot A_g \quad \text{soit} \quad (A_n)_{\max} = 0.85 \cdot 90.24 = 76.70 \text{ mm}^2$$

IL en résulte que $l_n_{\max} = 0.85 l_b$ soit $l_n_{\max} = 63.92 \text{ mm}$

Le diamètre maximal du boulon que l'on peut utiliser est:

$$L_b - l_n_{\max} = 75 - 63.92 = 11.28 \text{ mm}$$

La valeur trouvée ci-dessus n'est qu'un indicateur dans le choix de notre diamètre de design. Le diamètre réel à prendre est celui pour lequel l'effort pondéré en cisaillement du boulon est juste supérieure à la plus grande des sollicitations en cisaillement aux appuis. On remarque qu'un diamètre de 8 mm est un choix idéal.

B.1.2.2. Calcul de l'effort pondéré que peut reprendre la tube en traction

Diamètre du boulon: $d = 8\text{mm}$

Largeur nette du tube : $l_n = 75.2 - 2 \cdot 8 = 59.2$

Aire nette: $A_n = 59.2 \cdot 1.2 = 71.04\text{mm}^2$

$Tr_1 = 0.9 \cdot A_n \cdot F_y$ $Tr_1 = 19180.8 \text{ N} = 19.18 \text{ kN}$

$Tr_2 = 0.77 \cdot A_n \cdot F_u$ $Tr_2 = 24615.36 \text{ N} = 24.615 \text{ kN}$

La charge maximale, Tr , que peut reprendre le tube en traction est la plus petite des charges Tr_1 et Tr_2 .

On constate que Tr est plus grande que l'effort le plus élevé auquel est soumis le tube, il n'y aura donc pas rupture en traction de la section nette de celui-ci.

La plus petite pince longitudinale dans le cas de notre section est $s = 50\text{mm}$. Calculons la pression diamétrale exercée par le boulon.

Par définition, $Br = \phi \cdot s \cdot e \cdot F_u$ où ϕ est un coefficient correctif définit plus loin. Selon l'ACNOR $\phi = 0.67$ [12],[26].

$Br = 6930.9 \text{ N}$ soit $Br = 6.930 \text{ kN}$

Calcul de la résistance pondérée des boulons

Résistance pondérée en traction

La résistance pondérée en traction d'un boulon est donnée par la relation ci-dessous où ϕ est un coefficient qui tient compte des défauts de montage ou de fabrication, des moments de flexion dus au mauvais positionnement des boulons et de la variabilité de la résistance ultime ou de la limite d'élasticité dans les différentes sections du matériau constitutif du boulon [12],[26].

$T = 0.7 \cdot A_b \cdot \phi \cdot F_u$ où A_b est la section du boulon

$$A_b = \pi \cdot d^2 / 4 \quad A_b = 50.2655$$

$$T = 0.75 \cdot A_b \cdot \phi \cdot F_u \quad T = 11.37 \text{ kN}$$

T est plus grande que la plus élevée des forces de traction au niveau des appuis.

Résistance du boulon en cisaillement

Elle est donnée [12] par:

$$C = 0.7 \cdot 0.6 \cdot \phi \cdot m \cdot A_b \cdot F_u$$

m étant le nombre de cisaillement. Dans notre cas $m = 1$

$$C = 0.7 \cdot 0.6 \cdot \phi \cdot m \cdot A_b \cdot F_u \quad C = 6.37 \text{ kN}$$

Calcul de l'effort de serrage des boulons

L'effort de serrage des boulons est donné par:

$$S = 0.7 \cdot 0.75 \cdot A_b \cdot F_u \quad S = 11.88 \text{ kN}$$

Détermination de la longueur et du nombre de boulons

La longueur sous tête des boulons doivent être au moins égale à la somme des épaisseurs des pièces à assembler augmentée de la hauteur de l'écrou. La désignation de chaque boulon pour un diamètre donné est fourni dans Précis de construction mécanique [13]. Plusieurs formes de boulons possédant les propriétés précédemment définis sont prises dans le design en fonction des besoins.

Pour la fixation des membrures au cercle de la structure de base, la longueur minimale des boulons est $l_b = c_1 + c_2 + h$ où c_1 : largeur du premier tube carré $c_1 = 20 \text{ mm}$,

c_2 : largeur du second tube carré $c_2 = 25 \text{ mm}$,

h : hauteur de l'écrou $h = d = 8 \text{ mm}$.

$l_b = 20 + 25 + 8 = 53 \text{ mm}$. La longueur normalisée immédiatement supérieure est de 60 mm. Le nombre total de ces boulons est de 20 (+4% pour tenir compte des éventuelles pertes)

Désignation : Boulon H M 8-60, type 2, NF E 25-114

En ce qui concerne la fixation à la feuille d'acier de la structure de support la longueur minimale des boulons à considérer est donnée par $l_b = c_1 + e + h$ où e est l'épaisseur de la tôle. On obtient :

$$l_b = 20 + 2 + 5 = 27 \text{ mm}$$

La longueur normalisée immédiatement supérieure est de 30 mm. Ces boulons sont au nombre de $2 \cdot 20 = 40$.On commandera 50 pour les raisons citées plus haut.

Désignation : Boulon H M8-30, type 2, NF E 25-114 .

Enfin pour la fixation des éléments de contreventement de la structure, on utilisera ici des vis auto-taraudeuses pour faciliter le montage. Leur nombre est estimé à 100 et leur longueur tient compte de la somme des épaisseurs des pièces à assembler, augmentée d'un petit jeu (exigences des normes AFNOR dans le montage des vis auto-taraudeuses)

Désignation : Vis H ST 8-13, F, type 2, NF E 25-662 .

B.1.3. Calcul de la structure de fixation du cornet

Le cornet sera suspendu à une structure en forme de col de cygne. Les critères de design sont le déplacement maximal admissible au niveau du cornet pour ne pas affecter la qualité de l'image et la rupture par instabilité de la structure. Les

calculs sont essentiellement de vérification. Il s'agit de choisir la plus petite section qui satisfait nos critères de design.

Evaluation des charges

Section de calcul : Tube d'acier galvanisé

Diamètre intérieur: $d = 32 \text{ mm}$

Epaisseur du tube : $e = 4 \text{ mm}$

Longueur du tube : $L = 1.2 \text{ m}$

Poids volumique : $w = 26.487 \text{ kN/m}^3$

La pression hydrostatique du vent sera transformée en une charge linéaire uniformément répartie. Puisqu'il s'agit d'une surcharge on utilisera un coefficient de majoration de 1.5 [12]. On obtient alors:

$$S_c = 1.5(d+2e) \cdot P \quad \text{d'où} \quad S_c = 0.0559 \text{ kN/m} = 0.06 \text{ kN/m}$$

Le poids propre linéique du mât est donné par la relation ci-après. Il sera multiplié par un coefficient de 1.25 vu que nous utilisons la méthode aux états limites comme critère de design des structures [12].

$$C_p = (\pi/4) \cdot 1.25 \cdot 5[(d+2e)^2 - d^2] \cdot w \quad C_p = 0.0109 \text{ kN/m}$$

A toutes ces charges s'ajoutent le poids du cornet et des éléments de fixation. La masse totale de ces éléments annexes est de 3 kg . Ce qui nous donne une charge concentrée de 0.044kN au sommet du mât.

$$S_{cc} = 3 \cdot 9.81 \cdot 10^{-3} \cdot 1.5 \quad S_{cc} = 0.0441 \text{ kN}$$

En résumé le mât, support du cornet, est soumis:

-à une force linéaire horizontale due au vent $S_c = 0.06 \text{ kN/m}$,

-à une force concentrée $S_{cc} = 0.0441 \text{ kN}$,

-à la force triangulaire verticale $C_p = 0.011 \text{ kN/m}$

Analyse de la structure

Calcul des réactions aux appuis

Schéma descriptif du montage

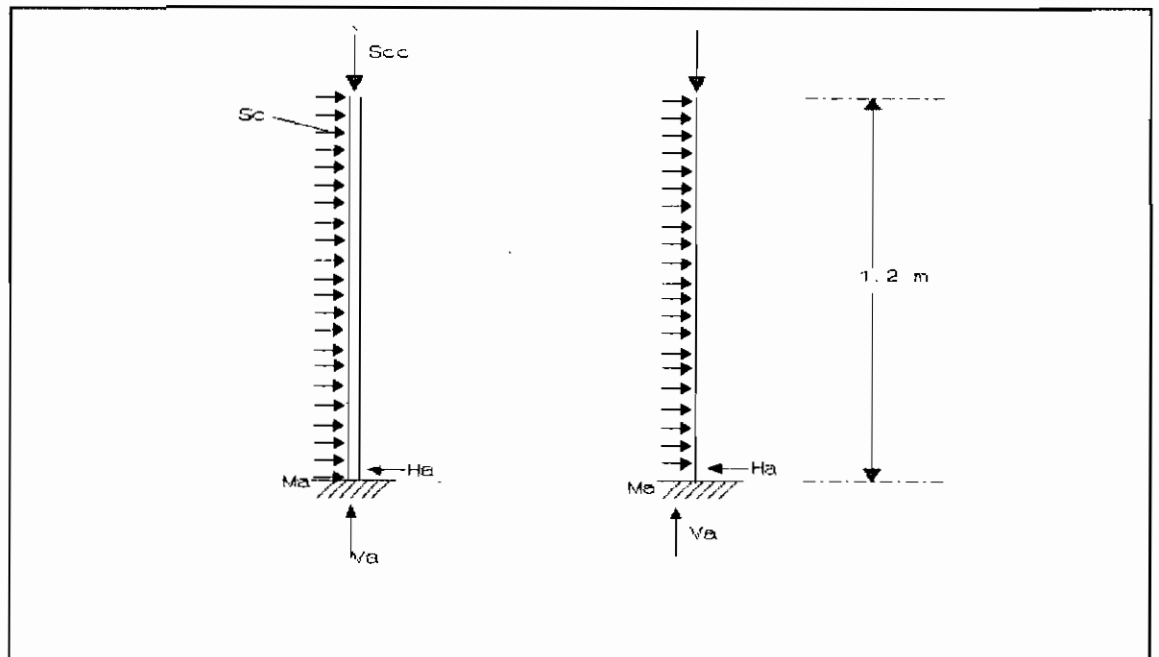


Figure B.1.2 : Diagramme du corps libre (support du cornet)

Le moment au niveau de l'encastrement est donnée par l'équation:

$$Ma - 0.060 \cdot 1.2 \cdot 0.6 = 0 \quad Ma = 0.0432 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Les réactions aux appuis, quant à elles sont données par:

$$Ha - 0.060 \cdot 1.2 = 0 \quad Ha = 0.0720 \text{ kN}$$

$$Va - 0.04410 - 0.011 \cdot 1.2 = 0 \quad Va = 0.0573 \text{ kN}$$

Diagramme des efforts normaux

L'effort normal maximal est atteint à la base et est de 0.0573 kN. Le diagramme des efforts est montré sur la figure ci dessous.

Il en est de même du diagramme des efforts tranchants et du cisaillement. On remarque à partir de ces digrammes que les conditions critiques sont atteintes à la base du mât.

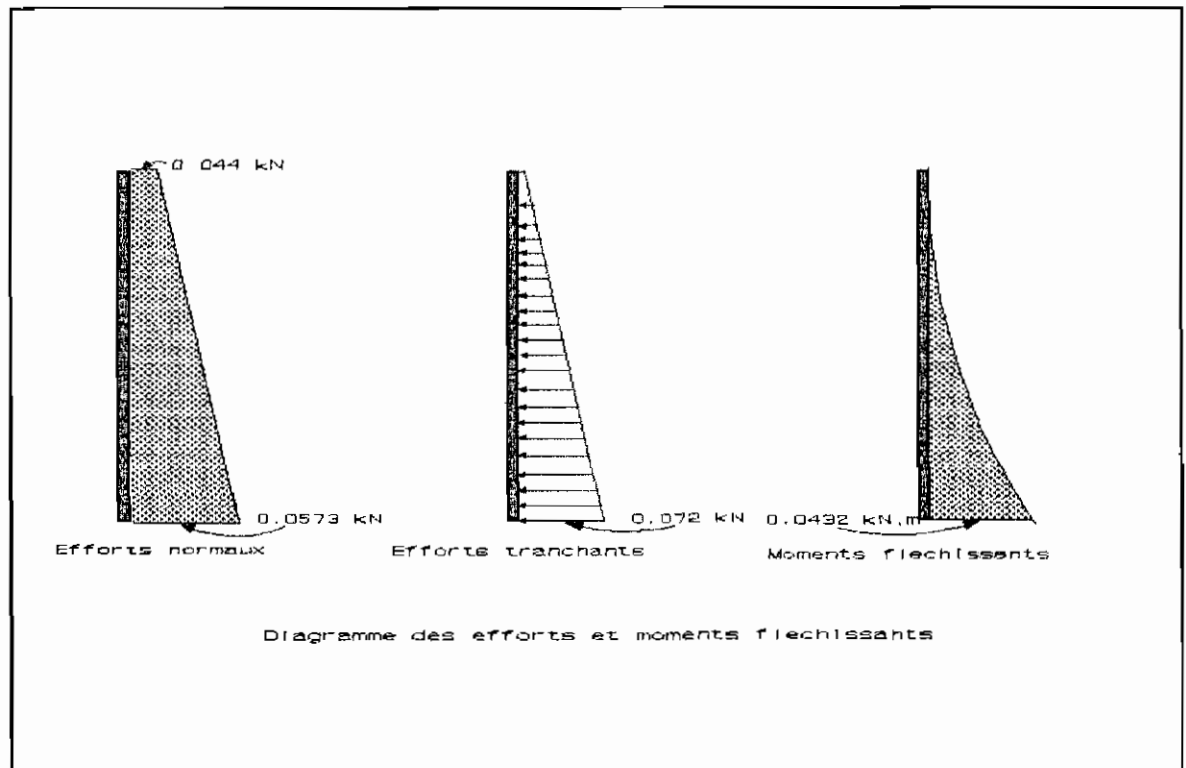


Figure B.1.3 : Diagramme des efforts et des moments fléchissants

Calcul de la contrainte maximale dans la fibre en compression

L'effort de compression à la base du mât est $V_a = 0.0573 \text{ kN}$

La contrainte de compression qu'elle provoque dans la section A est donnée par la relation $\sigma_a = 4 \cdot V_a / (\pi \cdot [(d+2e)^2 - d^2])$.

Soit alors $\sigma_a = 0.1736 \text{ MPa}$

Moment d'inertie du tube $I = n/64[(d+2e)^4 - d^4]$

On obtient alors $I = 5.0882 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$

Le moment de flexion maximal à la base est $M_a = 0.0432 \text{ kN} \cdot \text{m}$.

Il engendre une contrainte à la fibre externe donnée par

$$\sigma_m = M_a \cdot c / I = (M_a / I) \cdot [(d+2e)+d] / 2 \quad \text{d'où} \quad \sigma_m = 29.72 \text{ MPa}$$

La contrainte maximale résultante de compression est $\sigma = \sigma_a + \sigma_m$
soit $\sigma = 29.8894 \text{ MPa} \quad \sigma \approx 30 \text{ MPa}$.

La force H_a induit une contrainte de cisaillement donnée par la relation $\tau = H_a / A$. On obtient par calcul $\tau = 0.22 \text{ MPa}$.

La théorie de l'énergie de distorsion nous permet de calculer la contrainte de von Mises [7] par la formule :

$$\sigma_v = (\sigma^2 + 3 \cdot \tau^2)^{1/2}$$

$$\text{soit } \sigma_v = 30.002 \text{ MPa}$$

On remarque que σ_v est inférieure à la contrainte d'écoulement de l'aluminium.

Vérification du flambage

Calcul de la contrainte admissible en flambage

$$\text{Aire du tube: } A = (3.14/4) [(d+2e)^2 - d^2] \quad A = 329.8672 \text{ mm}^2$$

$$\text{Rayon de giration de la section: } r = (I/A)^{0.5}$$

$$\text{On a } r = 12.417 \text{ mm}$$

$$\text{Limite d'élasticité de l'aluminium } F_y = 300 \text{ MPa}$$

$$\text{Module de Young } E = 71000 \text{ MPa}$$

$$K = 2 \text{ (dépend des conditions aux appuis)}$$

$$\Gamma = K \cdot (L/r) \cdot (F_y / (3.14)^2 \cdot E)^{0.5} = 3.9983 \quad \Gamma \approx 4$$

Contrainte critique de flambage:

$$C_r / A = 0.9 \cdot F_y \cdot \Gamma^{(-2)}$$

$$C_r / A = 16.87 \text{ MPa}$$

On remarque que C_r / A est suffisamment supérieure à la contrainte de compression engendrée par le poids du cornet qui est de

$$\sigma_c = s_{cc} / A = 0.13 \text{ MPa}$$

Vérification de la flèche maximale:

$$\Delta_{\max} = S_c \cdot L^4 / (8 \cdot E \cdot I) \quad \Delta_{\max} = 4 \text{ mm}$$

La valeur de la flèche obtenue est relativement élevée. Dans la réalisation on réduira celle-ci en disposant des haubans à des angles de 120° les uns des autres au sommet du mât.

Remarquons surtout que le choix de la longueur L est dicté par la flèche admissible vu que les niveaux de contraintes critiques ne sont jamais atteints.

Calcul des vis de fixation du réflecteur à sa structure

Les vis doivent être calculées de manière à reprendre l'effort d'arrachement que le vent exerce sur le réflecteur. Pour faciliter le montage et réduire ne serait-ce qu'un tout petit peu le coût de réalisation, il est plus judicieux d'utiliser des vis à tête auto-taraudeuse. La tête des vis doit être plane pour que l'adhérence grille-structure soit parfaite et complète.

Calcul du diamètre des vis

La pression hydrostatique du vent sur la structure est connue et est égale à 0.98 kPa.

De là, on déduit l'effort d'arrachement que le vent exerce sur une rangée de vis de fixation à la membrure: $F_t = P \cdot S/k$

S: surface totale de la grille,

k: nombre de rangées.

$$F_t = 0.98 \cdot 25/20 \text{ kN} = 1.225 \text{ kN}.$$

La longueur d'une rangée de vis est: $L = 2.765 \text{ m}$.

On en déduit l'effort F'_t par unité de longueur:

$$F'_t = F_t/L = 1.225 \text{ kN}/2.765 \text{ m} = 0.4430 \text{ kN/m} = 0.4430 \text{ N/mm}.$$

On remarque qu'une vis de 5.5 mm de diamètre convient à merveille

Vérification de la vis

Désignation de la vis: Vis H, ST 5.5-16, C, type 2 NF E 25.662

La résistance en traction de la vis est:

$$T\tau = 0.75 \cdot 0.67 \cdot A_b \cdot F_u.$$

$$A_b = (5.5\text{mm})^2 \cdot \pi/4 = 23.7589 \text{ mm}^2 \approx 23.76 \text{ mm}^2.$$

$$T\tau = 0.75 \cdot 0.67 \cdot 23.76 \cdot 450 = 5.37 \text{ kN}.$$

On remarque donc qu'il n'y a aucun risque d'arrachement.

Mais pourquoi choisir un diamètre aussi sécuritaire?

En plus des conditions liées aux efforts, notre choix est guidé par le diamètre de la tête de la vis. Cette dernière doit être suffisante pour retenir le réflecteur dont le diamètre des mailles avoisine 4 mm. La vis H, ST 5.5 avec son diamètre de tête de vis $e = 1.15 \cdot s = 1.15 \cdot 8 = 9.2 \text{ mm}$ constitue un bon choix.

Choix du pas p_l de fixation

La norme prévoit que la distance entre deux vis consécutives doit excéder 3 fois le diamètre nominal de la vis.

$$p_{l_{\min}} = 3 \cdot d = 16.5 \text{ mm}.$$

Un pas $p_l = 120 \text{ mm}$ s'avère judicieux et évite le plissement du réflecteur.

Calcul du nombre de vis

$$n_1 = k \cdot L / p = 20 \cdot 2765 / 120 = 461.$$

Pour cela, il faudra ajouter le nombre de vis de fixation aux tubes permettant d'améliorer la précision de la surface:

$$n_2 = (18 + 16) \cdot 10^3 / 120 = 281.$$

Soit au total $n = n_1 + n_2 = 745$ qu'on ajustera à 800. En conclusion, nous devons acheter $n = 800$ vis H, ST 5.5-16.

B.2. EVALUATION DE LA QUANTITE DE MATERIAUX DE CONSTRUCTION

Pour effectuer cette évaluation, de faire des calculs géométriques en utilisant l'équation de la parabole et des différents parties de la ferme. Le schéma du plan N°001 a été construit sur cette base. Ce schéma, fait à l'échelle 1/10 peut également servir pour l'évaluation .

Calcul de la longueur de la lame supérieure

Elle est donnée par la relation :

$$L = 0.553 \cdot D \text{ soit } L = 0.553 \cdot 5 \text{ m} = 2.765 \text{ m}$$

Le coefficient 0.553 est tiré du tableau (5.1) pour $f/D = 0.3$

Calcul de la longueur des membrures

Ici, il faut utiliser l'équation des différentes parties de la ferme. Connaissant les coordonnées des différents noeuds, on calcul la distance entre deux noeuds liés par une membrure. La somme de toutes ces distances donne la longueur totale des membrures qui ne sont rien que des tubes carrés 20·20·1.2 soit $L_1 = 204 \text{ m}$ après majoration de 10 % pour tenir compte des pertes lors du découpage.

Nous donnons ci-dessous l'équation des principales parties de la ferme.

La lame supérieure ou parabole : $z(x) = x^2/(4 \cdot f)$ $0.1 \leq x \leq D/2$

Partie horizontale: $y(x) = 0$ $0 \leq x \leq 0.75 \text{ m}$

2^{ème} partie linéaire $y(x) = 0.3043 \cdot x - 0.2552$ $0.75 \leq x \leq 1.25$

3^{ème} partie linéaire $y(x) = 0.6806 \cdot x - 0.6806$ $1.25 \leq x \leq 1.75$

4^{ème} partie linéaire $y(x) = 0.9083 \cdot x - 1.0792$ $1.75 \leq x \leq 2.5$

nous ont conduit à une configuration adéquate de la ferme.

La longueur des éléments de contreventements, calculés par la même méthode, est de 42 m. Il s'agit de tube carré 16.16.1.5

Calcul de la longueur des tubes ronds

Là, il s'agit simplement du calcul de la longueur d'arc joignant deux points d'un arc de cercle. Connaissant le rayon de l'arc, on en déduit sa longueur. La somme de toutes ces longueurs d'arc donne la longueur totale de tubes ronds de chaque type. On a alors:

Tube rond type n°1 : 16 m

Tube rond type n°2 : 20 m

En ce qui concerne la longueur du mât, elle donnée par l'étude de la structure de support du cornet et est de 1.2 m.

Il faut garder présent à l'esprit que ces différents tubes se vendent par longueur de 4 m.

ANNEXE C

ETUDE DE CAS DE LA PARABOLE DE CINQ METRES (5 m) : EVALUATION DE LA STATION DE RECEPTION

C.1. GAIN DE L'ANTENNE

Nous prendrons ici une efficacité moyenne η de 0.55 [6]

Le gain de l'antenne (relation 3.6) sera calculé selon que l'on soit en bande C ou en bande Ku.

Bande C Fréquence : 3.725 GHz ---> $G = 43.21$ dB

Bande Ku Fréquences : 10.95 GHz ---> $G = 52.57$ dB

11.75 GHz ---> $G = 53.18$ dB

On remarquera surtout que le choix de ces fréquences particulières pour le calcul de G est lié au convertisseur d'hyperfréquence dont nous disposons.

C.2. BILAN DE LA LIAISON

Comme le gain ainsi que l'atténuation varie en fonction de bande de fréquence et de la position de la station terrienne de réception par rapport au satellite, le bilan devrait donc être fait en tenant compte de ces deux variantes, mais, le satellite pour lequel l'exemple de calcul est exécuté émet en bande C. C'est pour cela que ce bilan ne sera fait que dans cette bande.

C.2.1. Température globale de bruit du système de réception

Le facteur de bruit de la tête d'hyperfréquence choisi est de 0.8 . En utilisant la relation de (4.17) , on obtient alors que la température T_{LNB} de bruit du convertisseur est :

$$T_{LNB} (^\circ K) = 290 * (-1 + 10^{0.8/10})$$

soit $T_{LNB} = 58.66 ^\circ K$.

L'évaluation de la température de bruit de l'antenne est très difficile à évaluer à cause des multiples facteurs intervenant dont nous avons parler au cours des chapitres précédents. Les études menées récemment à Polytechnique ont conduit à une température d'antenne de $21 ^\circ K$, à cause de l'élévation de celle-ci qui ne capte que du bruit sidéral. Ce résultat a d'ailleurs été confirmé par certains auteurs qui estiment qu'en général la température moyenne des antennes paraboliques de diamètre avoisinant cinq mètres (5 m) est de l'ordre de $22 ^\circ K$.

En conclusion la température globale de bruit de l'installation est $T = 79.66 ^\circ K$ soit approximativement $80 ^\circ K$.

C.2.2. Pire du satellite

Nous avons dans le cadre du projet choisi le satellite STATIONAR 12 ($40^\circ E$). Ce satellite relaie le signal de TV5 Europe, en bande C, sur l'ensemble du continent Africain.

Pire au centre : 30 dBW

Fréquence de réception : 3.725 GHz

Précision de la fréquence : 4 KHz

Par interpolation sur la courbe on obtient une pire $E = 28.2$ dB

au dessus du Sénégal. Des écarts peuvent être constatés entre cette couverture théorique et la couverture pratique.

C.2.3. Bande de fréquence du récepteur

Le récepteur dont nous disposons possède deux bandes de fréquence B1 = 27 MHz et B2 = 22 MHz (programmable). Il s'agit d'un récepteur ECHOSTAR SR5500 . C'est un récepteur PAL, SECAM, NTSC etc.

C.2.4. Atténuation globale

Pour effectuer ce calcul, il nous faut tout d'abord connaître la distance réelle satellite-station de réception [10]. Celle-ci est donnée par la relation:

$$d^2 = D^2 + 2 \cdot R \cdot (R+D) \cdot (1 - \cos\theta \cdot \cos\gamma) \quad (C.1)$$

où D est l'altitude des satellites géostationnaires qui est donc de l'ordre de 35786.04 km ;

R rayon de la terre soit R = 6378.16 km

θ est la latitude du lieu de réception et γ l'écart de longitude entre la position du satellite et le lieu de réception.

On obtient d = 39129.32 km . A partir de l'équation (4.16) on obtient:

$$A_1 = 32.44 + 20 \cdot \log(F \cdot d) = 195.71 \text{ dB}$$

En estimant les autres pertes à 3 dB, on a A = 198.71 dB

C.2.5. Rapport Porteuse sur bruit C/N

Le rapport C/N est donné par la relation suivante, tirée du chapitre 4 :

$$C/N = G + E - A - 10 \cdot \log B - 10 \cdot \log T - 10 \cdot \log k$$

$$C/N = 43.21 + 28.2 - 198.71 - 10 \cdot \log(27 \cdot 10^6) - 10 \cdot \log 80 + 228.6$$

D'où $C/N = 7.96 \text{ dB} \# 8 \text{ dB}$

Le rapport C/N obtenu est légèrement supérieur au seuil pratique de démodulation du récepteur soit 7.5 dB . Ce qui veut dire qu'on aura une image de qualité acceptable.

ANNEXE D

D.1 Evaluation du prix de revient de l'antenne parabolique

DETAILS	COUTS	
Désignation des articles	Prix unitaire	Total
1 tube 25*25*1.2	2000 FCFA	2000 FCFA
34 tubes carrés 20*20*1.2	1450 FCA /6 m	49300 FCFA
7 tubes carrés 16*16*1.5	1300 FCFA /6 m	9100 FCFA
Feuille d'acier 33/10	9500 FCFA	9500 FCFA
Tube d'aluminium :		
32*38	25000 FCFA /4 m	25000 FCFA
16*20	12891 FCFA /4 m	12891 FCFA
14*16	7680 FCFA /4 m	7680 FCFA
Vis à tôle (NF E 25-662)		
100 vis H ST 6-13, F, type 2	2888 FCFA /100 u	2888 FCFA
Boulons (NF E 25-114)		
25 Boulons H M 8-60, type2	80 FCFA	2000 FCFA
45 boulons H M 8-40, type 2	70 FCFA	3150 FCFA
Métal déployé (25 m²)		
2 contre-plaqué	9500 FCFA	19000 FCFA
1 paquet de baguettes à souder	4500 FCFA	4500 FCFA

TOTAL :

147009 FCFA

**Tableau D.1.1 : Frais d'achats de matériaux de construction
(Réflecteur et divers éléments structuraux)**

Tableau D.1.2 Coûts des matières Premières pour le support

Désignations	Dimensions principales	Coût TTC TVA = 7%
- Tôles d'acier	- épaisseur = 5mm 2000x1000	12000
- Boulons	- M 14x2 20 boulons	7460
- Tiges carrée pleine	- coté a = 60mm longueur = 6m	10460
- Profilés en L	- 35x35x3 longueur = 6m	4210
- Profilé rond	- 90x102 longueur = 6m	6520
TOTAL		40650 FCFA

BIBLIOGRAPHIE

Documents en langue française

[1] H.J. BAKER- P.J. GABARATT, Étude d'un service de télévision destinée aux forces britanniques stationnées en Allemagne, Communication Broadscat, vol.4, n°2, pp 32-34, Gbr 1974

[2] BEER/ JOHNSTON, Mécanique à l'usage des ingénieurs-Statique, Mc Graw-Hill, pp 154-156, 1974

[3] M. BOUSQUET- G. MARRAL- J. PARES, Les systèmes de télécommunications par satellite, MASSON, px-278, Paris, 1982

[4] L.N. BRONSTEIN- K.A. SEMENDIAEV, Aide mémoire de mathématiques, Editions EYROLLES, pp 592-601, 1971

[5] Ch. DARTEVELLE, Antennes et Réception TV, Editions RADIO, Juillet 1988

[6] B. DIOP, Dimensionnement d'une antenne parabolique pour la réception de signaux de satellite, Projet de fin d'études, Juin 1990

[7] Gilbert DROUIN- Michel GOU, Éléments de machines, Editions de l'ECOLE POLYTECHNIQUE DE MONTREAL (E.P.M), 2^{ème} Edition revue et augmentée, 1982

[8] JW. EDEMS, Comparaison des équipements terminaux pour réception directe des émissions de télévision par satellite à 2.6 et à 12 GHz, Tél. CHE, vol. 44, n°11, pp 9-15, 1977

[9] J. ESCULIER- A. PARNIERE- J. SALOMON, Télécommunications dans les pays en voie de développement, Révue des télécommunications, vol.62, n°1, pp 42-48, 1988

[10] Roger Ch. HOUZE, Les antennes... du fil rayonnant à la parabole, Tome 2 - La Télévision- La RDS, Editions EYROLLES, Juin 1989

[11] Jacques MAX, Méthodes et techniques de traitement du signal et applications aux mesures physiques, Edition MASSON, 2^{ème} Edition , 1977

[12] J.R. MURAT, Éléments de construction, Edition de l'E.P.M, Décembre 1980

[13] R. QUATREMER- J.P. TROTIGNON, Précis de construction mécanique, Editions NATHAN, 1985

[14] Michelle REMOISSENET, Théorie et pratique de la télévision par satellite: Installation d'une station de réception individuelle, Editions EYROLLES, 1988

[15] Antenne à réflecteur grégorien décalé à lobes latéraux atténués pour petite station, Br. Télécom. Technol., vol.2,n°2, Bibl. (8 ref), pp 51-61, Gbr., 1974

[16] L'antenne de la station terrienne suisse pour satellite, P.T.T. Bull. Techn., n°3, pp 68-84, 1977

[17] La diffusion à 12 GHz : Dimensionnement des stations, J. Electronique Radio-Plans, n°537, pp 61-70, Août 1992

[18] Évaluation d'une station TV SAT: Différents critères permettant d'estimer les besoins matériels à une bonne réception selon les satellites visés et les sites de réception, Electronique Radio-Plans, n°499, pp 67-70, Juin 1989

[19] Petites stations stations terriennes pour expérimentation de liaisons numériques par satellites, Rev. Electr. Commun. Labo., vol.30, n°1, pp 80-91, Japon, 1982

[20] Revue des télécommunications, vol.65, n°3, 1982

[21] Station de réception TV par satellite, Electronique Radio-Plans, n°464, pp 27-53, Juin 1986

Documents en langue anglaise

[22] Noise considerations en space communication, J. Institut Telecommunications, vol.18, n°9, Bibl.15 ref, pp437-448, Engrs India, DA 1972

[23] A new station antenna for domestic satellite communication, R.C.A Rev., vol. 33, n°4, Bibl. 7 Ref, pp 695-728, USA, DA 1972

[24] Some aspects of ground station antennas for satellite communications, T. H. Rep, n°60, Bibl.5 Ref, pp 173, Nederl., DA 1975

[25] The parabolic torus reflector , Marconi Rev., vol.41, n°211, pp 237-248, Gbr., DA 1978

[26] Handbook of steel construction, 3rd Edition