

ecole polytechnique de thies

Gm. 0394

## PROJET DE FIN D'ETUDES

TITRE : ETUDE pour INSTALLATION  
d'une EOLIENNE à AXE HORIZONTAL

Auteur : Cheikh Tidiane SAKHO

Genie : Mécanique

Date : Juin 1982

## DEDICACES

- ② mon oncle M. A. SY qui m'a éduqué et qui n'est plus.
- ② ma mère et mon père
- ② mes frères et sœurs : SODA SAKHO, ELHADJ et MBOYE,  
Deboye Hiong et Pape M. Wade.
- ② Djibril SALL pour toute la sympathie dont il me témoigne.
- ② la famille NDIR pour son ouverture et son affection.
- ② la petite MAYMOUHA NDIR
- Enfin à tous ceux qui luttent pour la liberté de l'homme et  
pour son bien être ...

# REMERCIEMENTS

Quant à l'exposé du projet, je voudrais exprimer tous mes remerciements à Monsieur DINH VO HAO mon directeur de projet pour ses conseils, son aide et sa disponibilité entière.

Ma profonde gratitude à MR Roger Lupien, à MR Sami Boudo, à MR YOUSSEF pour leurs conseils, leurs disponibilités.

Toute ma reconnaissance à MRS TREMBLAY, HOUHAIRE pour l'aide qu'il m'a apportée dans l'orientation de l'étude.

Enfin mes remerciements à tous ceux qui, en cette année difficile nous ont soutenus moralement, particulièrement à mes jeunes camarades (A.A. Pouye, Aboulaye GACKO, M. BIOT, THIOYE ... tous ceux de 'COLOBANE') de l'EPT.

# SOMMAIRE

Partout dans le monde, il est question de recourir aux énergies renouvelables. C'est en ce sens que l'EPT devrait être dotée d'une tour et d'un montage pour étudier de type de profils aérodynamiques, la possibilité de produire l'énergie électrique par le vent dans le pays.

C'est ainsi que nous avons entrepris de proposer un système de montage d'éolienne après avoir recueilli suffisamment d'informations sur le régime de vent, les éléments et principes fondamentaux qui régissent le mouvement de l'air :

Non fondant sur l'expérience dans les villages comme BARAK, SABKO, PEYKOU ..., nous avons effectué des calculs basés sur les états limites pour une tour qui résisterait aux tempêtes de zones tropicales.

Dans un second temps, nous avons observé les mesures de vent effectuées à Thiss et relevé que 55% du temps, la vitesse du vent est supérieure à 3m/s ; ce qui du reste n'est pas très encourageant pour la production d'électricité. Avec l'expérience de autres nous en sommes arrivés à établir une vitesse probable de déplacement de 7m/s ; ce qui nous permet de recharger une batterie de 12V par une dynamo de voiture (faible puissance)

Les calculs de résistances de notre machine guidés par un souci d'économie repose sur les contraintes admissibles.

Notre système devra utiliser à l'essai une hélice d'avion de type "brouard" juste pour observer la capacité de production d'énergie

# TABLE DES MATIERES

Dédicaces	i
Remerciements	ii
Sommaire	ii
Introduction	1

## PARTIE 1: Quelques notions de base.

<u>Chapitre 1</u> : Le vent	7
I Circulation atmosphérique	6
II Vitesse du vent	9
<u>Chapitre 2</u> : L'hélice	12
I Théorie de BETZ	13
II Aerodynamique de l'hélice	17
<u>Chapitre 3</u> : Quelques paramètres	18
A Le site	19
B La vitesse du vent	21
C Caractéristiques de la machine	23

<u>PARTIE 2: L'INSTALLATION</u>	27
<u>Chapitre 1 : La tour</u>	28
I type de support	29
II Calculs	29
A Efforts externes	32
B Efforts internes	39
C Résistance	44
D Décisions	51
<u>Chapitre 2: La machine</u>	52
A Fonctions mécaniques	53
B Système proposé :	
1 Description	56
2 Calcul et choix des éléments	57
CONCLUSION	87
BIBLIOGRAPHIE	90
ANNEXES	92

## LISTE des DESSINS

	N°
1 Montage	1
2 Arbre d'hélice	2
3 Plateau	3
4 Bloc support	4
5 Elements du frein	26, 27, 28
6 Axe de regulation	5
7 Liaison plateau - bloc support	
8 Ajustements	
9 Cuvette	10

## LISTE des figures

	page
1 Circulation et usages planiques	7
2 Veine fluide à travers une hélice	13
3 Emplacement de la tour	20
4 la tour	30
5 Treillis simple charge	37
6 Système de montage tour (treillis simple)	48
7 Schéma minimum du montage mécanique	55
8 Clavette	64
9 Frein	82
10 Empennage	85



# INTRODUCTION

L'énergie éolienne est une énergie renouvelable utilisée depuis l'antiquité.

Elle a connu une évolution considérable dans son histoire.

Ainsi, à travers les âges, cette énergie est utilisée pour :

- la traction de navires.
- l'entraînement des moulins à vent et de pompes.
- la production d'énergie électrique.

L'apparition de la machine à vapeur puis du moteur à explosion a remplacé les grands voiliers. Cependant, il existe toujours des bateaux à voile utilisés pour les sports et pour la pêche dans certains pays.

Les moulins à vent ont disparu alors que les pompes utilisant l'énergie du vent existent toujours et se perfectionnent d'avantage.

C'est qu'à la suite de la seconde guerre mondiale, par suite de la crise de l'énergie, que les tentatives d'installation d'aérogénérateur pour la production de l'électricité se sont développées :

À l'aube du 20<sup>e</sup> siècle, un académicien français, DARREIUS, inventa la première éolienne rapide qui se répand

par suite dans le monde pour faire l'objet d'étude pour amélioration en plus du service qu'il rend.

Dans les deux optiques du service et de l'Étude, il est certain que l'énergie éolienne est d'un intérêt particulier tant pour les pays développés que pour les pays sous développés : En effet, à l'heure où l'on s'achemine vers l'épuisement des réserves énergétiques mondiales jusqu'ici reconnues, il serait intéressant de pouvoir "dompter" le vent pour lui faire assumer certains travaux ; retardant ainsi l'échéance de l'épuisement des hydrocarbures ou même s'en passer (pourquoi pas) à la faveur du vent qui ne coûte pas ...

D'un autre point de vue, certaines zones de nos pays sont très reculées et nos infrastructures, nos possibilités ne permettent pas de leur amener des adductions d'eau ou même des installations électriques ; l'énergie électrique et l'eau pourraient être offertes à ces zones grâce à l'énergie éolienne.

Étant des facteurs d'intérêt de l'énergie du vent ont fait que notre choix a porté sur ce projet d'installation, à l'ÉPI, d'une tour d'essai pour les éoliennes, celles à axes horizontales en particulier.

Le caractère sous développé de notre pays est une surcharge en ce sens que, pratiquement dans tous nos villages, des difficultés

véritables sont ressenties par les populations quant à leur alimentation en eau (vitale) et en électricité (facteur de bien être).

L'installation de la tour permettrait donc une étude du comportement des éoliennes dans notre milieu pour des améliorations et une contribution sinon au développement de nos campagnes du moins à aider nos populations défavorisées à surmonter du manque de moyens d'adduction d'eau, adéquatement...

# CHAPITRE 1

## LE VENT

# PARTIE 1

QUELQUES NOTIONS de BASE .

Les différences de pression atmosphérique toujours variables font que l'air, sur notre planète, est en déplacement permanent. Le courant en résultant constitue le vent.

En principe, le vent se déplace des zones de hautes pressions vers les zones de basses pressions.

La rotation de la terre modifie la direction du vent aux moyennes et grandes latitudes: Le vent est alors parallèle aux isobares

Dans l'hémisphère nord, le vent tourne dans le sens des aiguilles d'une montre autour des aires anticycloniques et dans le sens antihoraire autour des aires cycloniques.

Les sens sont inversés dans l'hémisphère sud.

## CIRCULATION ATMOSPHERIQUE

C'est dans la partie inférieure de l'atmosphère qui contient les 4/5 de la masse de celle-ci et dont l'épaisseur est de 7 km au pôle et 17 km à l'équateur que circule l'air atmosphérique

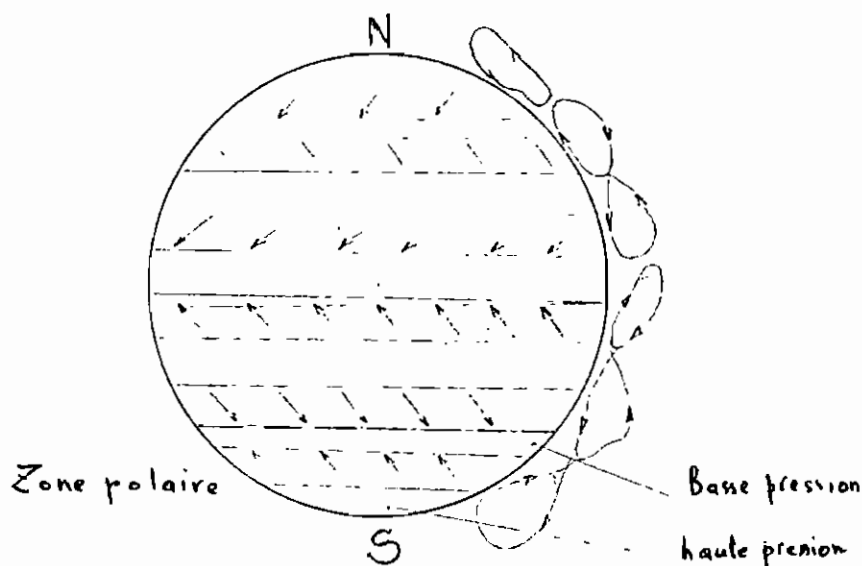
La circulation atmosphérique repose essentiellement sur trois causes principales :

1.- Le rayonnement solaire : il est plus important à l'équateur qu'aux pôles et est le facteur le plus important.

b, - La rotation de la terre : Elle provoque une déviation des vents vers la droite dans l'hémisphère nord et vers la gauche dans l'hémisphère sud et, par effet centrifuge, une surélévation de la hauteur d'atmosphère à l'équateur

c, - Le mouvement des masses d'air due aux perturbations atmosphériques

La circulation atmosphérique générale est schématisée en moyenne à la surface de la terre et en coupe dans le plan méridien



Trois cellules plus ou moins distinctes partagent chaque hémisphère :

- la cellule tropicale
- la cellule tempérée
- la cellule polaire

Les cellules tropicales de part et d'autre de l'équateur sont séparées par les zones de calmes et basses pressions équatoriales.

Les cellules tempérées sont séparées des tropicales par les ceintures de hautes pressions subtropicales et des cellules polaires situées sur les 60<sup>e</sup> parallèles.

Nous nous intéressons aux zones tropicales ; notre pays y étant situé :

La zone de pressionnaire équatoriale est alimentée à sa base par les courants aériens d'origine des régions tropicales : les Alizés.

L'air chaud des régions équatoriales retourne lorsqu'il est monté assez haut dans son mouvement convectif vers les tropiques sous forme d'un contre courant : les vents contre alizés.

Les vents sont plus forts sur les océans que sur les continents. Cela est dû aux reliefs et végétations qui freinent le mouvement de l'air (couches limites).

Les zones les plus favorables pour la production de l'énergie éolienne sont situées sur les côtes.



## II VITESSE du VENT

### 1 Classification

Selon la grandeur de cette vitesse de vent, une graduation, l'échelle de BEAUFORT a été établie, classant les vents en 17 catégories.

Degrés Beaufort	Vitesse du Vent		Description Générale
	m/s	km/h	
0	0 - .4	< 1	Calm
1	.5 - 1.5	1 - 5	Très légère brise
2	1.6 - 3.4	6 - 11	Légère brise
3	3.5 - 5.5	12 - 19	Petite brise
4	5.5 - 8	20 - 28	Jolie brise
5	8.1 - 10.9	29 - 38	Bonne brise
6	11.4 - 13.9	39 - 49	Vent frais
7	14.1 - 16.9	50 - 61	Grand frais
8	17.4 - 20.4	62 - 74	Coup de vent
9	20.5 - 23.9	75 - 88	Fort Coup de vent
10	24.4 - 28	89 - 102	Tempête
11	28.4 - 32.5	103 - 117	Violente tempête
12	32.6 - 35.9	118 - 133	Ouragan.
13	36.9 - 40.4	134 - 149	
14	40.1 - 45.4	150 - 166	
15	45.1 - 50	167 - 183	
16	50.1 - 54	184 - 201	
17	54.1 - 60	202 - 220	Cyclone

## 2 Variation cyclique

Par suite du déplacement de la surface de la terre, des zones de hautes pressions et des zones de basses pressions, la vitesse et la direction du vent varient en général au cours de l'année.

Les vents subissent des fluctuations journalières qui sont dues à des effets convectifs.

Pour la chaleur spécifique du sol inférieure à celle de l'eau, la terre s'échauffe plus rapidement que la mer sous l'effet du rayonnement solaire : il y a alors des mouvements convectifs et au cours de la journée, un appel d'air au voisinage du sol orienté de la mer vers la terre. Le soir, la terre refroidit plus vite que la mer et la brise de terre souffle vers la mer.

Ces effets d'appel d'air sont ressentis jusqu'à 50 km des côtes et autour des grands lacs.

## 3 Variation avec l'altitude

La vitesse du vent augmente avec l'élevation par rapport au sol.

La réduction de la vitesse du vent au voisinage du sol est due au freinage de l'air par la végétation, les habitations et les obstacles de toute sorte.

Différents auteurs proposent, pour évaluer la vitesse  $V$  du vent à une hauteur  $H$  en un point donné et connaissant la vitesse  $V_0$  à la hauteur

$H_0$  au même point, la formule suivante :

$$V = V_0 \left( \frac{H}{H_0} \right)^n \quad [1]$$

Généralement  $H_0 = 10 \text{ m}$

$n = 0.1 \text{ @ } 0.4$  : les valeurs les plus faibles sont prises pour les régions ventées et les valeurs les plus fortes pour les régions de faibles intensités.

L'énergie susceptible d'être recueillie étant proportionnelle au cube de la vitesse, il en résulte :

$$\frac{E}{E_0} = \left( \frac{H}{H_0} \right)^{3n} \quad 0.1 \leq n \leq 0.4$$

$E_0$  = énergie disponible à la hauteur  $H_0$

$E$  = énergie disponible à la hauteur  $H$

#### 4 Influence des obstacles sur l'intensité des vents

L'intensité des vents est fortement influencée par la présence d'obstacles : il en résulte le phénomène de couches limites qui réduisent considérablement la vitesse du vent sur une couche assez importante

CHAPITRE 2  
L'HELICE

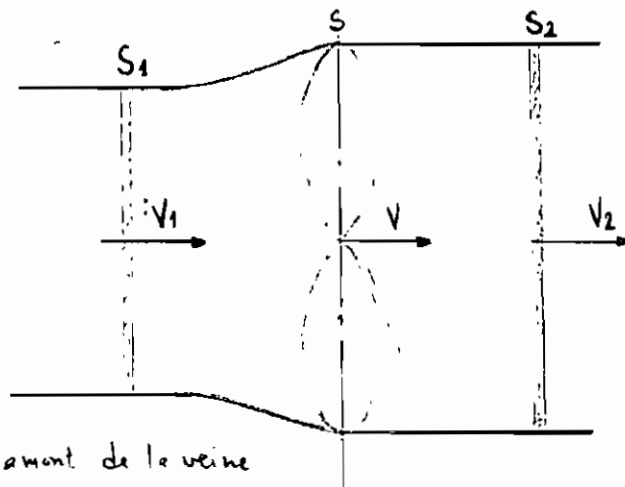
Les moteurs éoliens utilisés pour capter l'énergie du vent peuvent être classés en deux catégories : les machines à axes horizontale et les machines à axes verticale.

L'élément principal du moteur éolien, quel qu'il soit, est la pale et par extension, l'hélice.

Il convient donc de connaître le fonctionnement de cet élément pour en tirer le maximum de rentabilité dans une installation.

## I THEORIE de BETZ

Dans cette théorie, on suppose la machine éolienne dans un air animé à l'infini amont d'une vitesse  $V_1$  et à l'infini aval d'une vitesse  $V_2$ .



$S_1$  : la section amont de la veine

$S_2$  : la section aval de la veine

$S$  : surface balayée par l'hélice

$V$  : la vitesse de l'air à la traversée de l'aéromoteur.

La production de l'énergie se fait par perte de l'énergie cinétique de l'air à la traversée de la machine : la vitesse  $v_2$  est nécessairement plus petite que  $v_1$ . Il en résulte un élargissement de la veine fluide traversant la machine.

Avec l'équation de continuité, approche volume de contrôle, avec les hypothèses de l'incompressibilité de l'air (fluide idéal) et d'un écoulement permanent, nous pouvons exprimer le débit de la veine fluide :

$$Q = S_1 v_1 = S v = S_2 v_2$$

Avec l'équation de quantité de mouvement (théorème d'EULER) dans la mécanique des fluides, la force  $F$  exercée par le vent sur l'air peut être obtenue :

- direction : vers l'avant
- Intensité : avec  $\rho$  = masse volumique de l'air

$$\begin{aligned} F &= \rho Q (v_1 - v_2) \\ &= \rho S v (v_1 - v_2) \end{aligned}$$

La puissance absorbée par la force  $F$  dont le point d'application se déplace à la vitesse  $v$  par rapport aux molécules de l'air en mouvement est :

$$P = F \cdot V$$

$$= \rho S V^2 (v_1 - v_2)$$

Cette même puissance découle de la variation de l'énergie cinétique qui traverse le moteur ; en supposant qu'il n'y a pas de perte. On a :

$$\Delta E = E_1 - E_2$$

$$E_1 = \frac{1}{2} \rho S V \cdot v_1^2$$

$$E_2 = \frac{1}{2} \rho S V \cdot v_2^2$$

$$\rightarrow \Delta E = \frac{1}{2} \rho S V (v_1^2 - v_2^2)$$

$$= \frac{1}{2} \rho S V (v_1 - v_2) (v_1 + v_2)$$

En égalisant les deux termes de la puissance :

$$P = \Delta E$$

$$\rho S V^2 (v_1 - v_2) = \frac{1}{2} \rho S V (v_1 - v_2) (v_1 + v_2)$$

On tire :

$$V = \frac{1}{2} (v_1 + v_2)$$

À ce stade, nous obtenons, en remplaçant dans les équations de la force et la puissance absorbée

$$F = \frac{1}{2} \rho S (v_1^2 - v_2^2)$$

$$P = \frac{1}{4} \rho S (v_1^2 - v_2^2) (v_1 + v_2)$$

Pour étudier la variation de la puissance recueillie, nous supposons  $V_2$  comme étant la variable tandis que  $V_1$  est constante.

Nous obtenons :

$$\frac{dP}{dV_2} = \frac{1}{4} \rho S (V_1^2 - 2V_1V_2 - 3V_2^2)$$

$$\frac{dP}{dV_2} = 0 \quad \text{si : } \begin{cases} V_2 = -V_1 \\ \text{ou} \\ V_2 = \frac{1}{3} V_1 \end{cases}$$

$V_2 = -V_1$  ne présente aucun intérêt physique

$V_2 = \frac{1}{3} V_1$  correspond selon BETZ au maximum de puissance susceptible d'être recueillie

En remplaçant  $V_2$  par  $\frac{1}{3} V_1$ , on exprime la puissance maximale en fonction de  $V_1$  :

$$P_{\max} = \frac{16}{27} \left( \frac{1}{2} \rho S V_1^3 \right)$$

$$S_1 V_1 = S V$$

$$V = \frac{V_1 + V_2}{2} = \frac{2}{3} V_1$$

$$\begin{aligned} \rightarrow P_{\max} &= \frac{8}{9} \left( \frac{1}{2} \rho S_1 V_1^3 \right) \\ &= \frac{8}{9} E_1 \end{aligned}$$



L'énergie maximale susceptible d'être recueillie par un moteur éolien ne dépasse jamais le  $\frac{8}{9}$  de l'énergie cinétique de la masse d'air qui le traverse.

## II AERODYNAMIQUE de L'HELICE

### 1 Définitions :

- Axe de l'hélice : axe de rotation de l'hélice
- Diamètre de l'hélice : le diamètre balayé par l'hélice
- Axe d'une pale : c'est l'axe longitudinal autour duquel on peut faire varier l'inclinaison de la pale par rapport au plan de rotation de l'hélice
- Profil d'une pale : La section de la pale par un cylindre ayant pour axe, l'axe de l'hélice. Il varie avec le distance  $r$  qui sépare le profil de l'axe de l'hélice
- Angle de calage d'un profil : C'est l'angle  $\alpha$  que fait la corde du profil avec le plan de rotation de l'hélice.

# CHAPITRE 3 :

## QUELQUES PARAMETRES

A - Le site

B - les mesures de Vent

C - Caractéristiques du moteur.

L'utilisation de l'énergie éolienne suppose une connaissance du paramètre fondamental qui est le vent, et de la géographie du milieu. C'est en ce sens que des études de la vitesse du vent dans le milieu même où l'on veut installer un aéromoteur se justifie d'autant qu'elles nous permettent de connaître la quantité maximale d'énergie que l'on peut espérer recueillir avec telle ou telle autre configuration de pale et d'en faire le choix judicieusement (si l'on peut choisir...)

## A LE SITE :

Un emplacement convenable pour notre installation s'articule autour de deux raisons fondamentales :

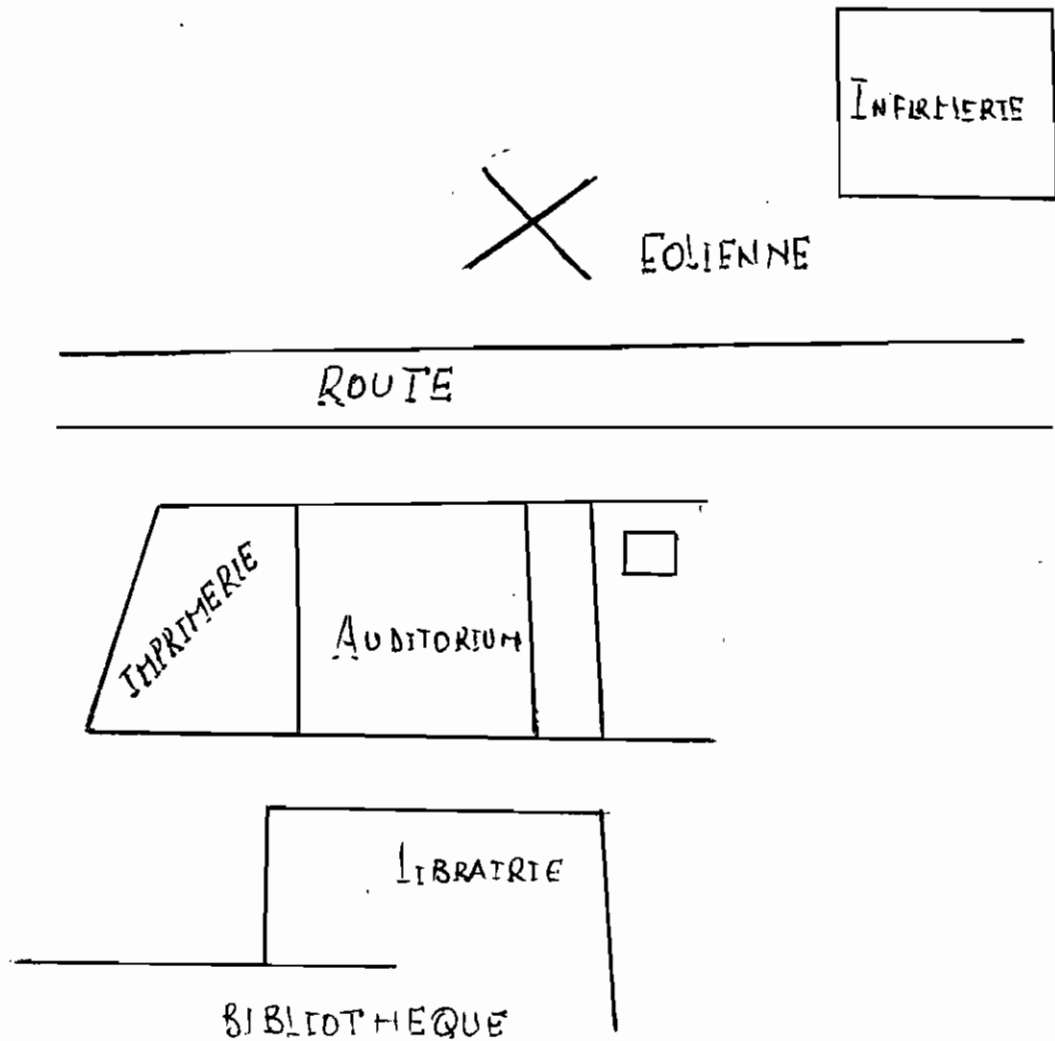
- Favoriser une bonne vitesse de vent :

Il s'agit d'éviter que notre machine soit masquée, par des obstacles tels les bâtiments, la végétation, sur un rayon de 100 m au moins.

- Assurer une surveillance quasi permanente au niveau du campus en toute sécurité et pour fin d'utilisation future.

Pour satisfaire ces conditions, nous relevons qu'il serait souhaitable

table de mettre l'installation assez près des ateliers de la phase II  
de l'EP1. La machine doit être montée haut à 14 m du sol;  
en tout cas au dessus de obstacles que constituent le bâtiment



EMPLACEMENT de la TOUR.

## B LA VITESSE DU VENT

La vitesse du vent peut se mesurer de deux façons :

- Forme intégrée : selon l'appareil, on mesure le chemin parcouru par le vent en un temps donné ou on obtient directement l'énergie reçue en kWh par unité de surface exposée.

- Forme simple : On enregistre sur papier la vitesse instantanée du vent.

Nous avons relevé quelques mesures selon la forme simple avec un anémomètre à coupelle classique.

Nos relevés se sont faits dans une période très courte de 5 semaines. Ce qui n'est pas très représentatif par rapport à l'année. Cependant nous avons trouvé dans les archives de la bibliothèque de l'EPT une étude comparative de mesures effectuées à l'École et au Centre météorologique de Thies. [7]

Selon cette étude (elle est faible), le vent à Thies est quasi-stable sur l'année : Les deux courbes de vitesse (EPT et Méteo) présentent la même allure.

Malgré ce constat et du fait que les points de mesure à l'EPT et sur notre installation ne sont pas très éloignés, nous nous servons

pour nos besoins des mesures trouvées dans le projet de fin d'Etudes portant sur la vitesse de vent à l'EPT, projet fait par René HDOUR [7]

### 1 Les mesures (Annexe p 13.14.15 (R. HDOUR))

Nous présentons en annexe A les mesures de vent effectuées de Juillet 1977 à Février 1978.

La détermination de la moyenne (journalière, mensuelle et annuelle) relève d'une approximation graphique qui est tout de même valable, suffisamment précise pour nos besoins :

MOIS	$V_{\text{moy}} / \text{mens.}^{\text{m/s}}$	$V_{\text{moy}} / \text{annu.}^{\text{m/s}}$
Juillet	2.83	3
Aout	2.84	
Septembre	1.87	
Octobre	2.67	
Novembre	2.83	
Décembre	3.23	
Janvier	4.54	
Février	3.11	

## 2 Quelques résultats :

Le service météorologique donne quelques résultats : la vitesse du vent en fonction de la durée. Il apparaît que pour les 55% du temps, la vitesse du vent est inférieure à 3 m/s.

Sur la mesure obtenues à l'EPT, la vitesse du vent, dans la période (juillet à février) est maximale en décembre, janvier et février ; le maximum de l'énergie du vent serait donc disponible en ces 3 mois.

Ainsi, nous évaluons les caractéristiques de notre moteur éolien selon la vitesse moyenne du vent de 3 m/s

## C - CARACTERISTIQUES de la MACHINE

Les études menées au laboratoire d'Eiffel sur une éolienne bifale nous permet de faire une première approximation de la puissance maximale que peut fournir votre machine ; en fait, il est établi une formule empirique qui peut s'appliquer à toute les éoliennes similaires :

• Puissance maximale de l'éolienne :

Elle correspond à 50 à 70% de la puissance de BETZ.

$$P_{\text{emr}} = 0.20 D^3 V^3 \quad [1]$$

Pour la vitesse moyenne de  $3 \text{ m/s}$  et pour une vitesse probable de déplacement de  $7 \text{ m/s}$ , nous trouvons avec cette machine ( $D = 4 \text{ m}$ ) :

	$V = 3 \text{ m/s}$	$V = 7 \text{ m/s}$
$P_{\text{max}}(\text{W})$	86.4	1097.6

Notons simplement que pour cette vitesse moyenne de  $3 \text{ m/s}$ , la puissance maximale susceptible d'être recueillie est très faible. C'est en ce sens que nous nous voyons obligé de pourvoir notre travail sur la base de la "vitesse probable" des  $7 \text{ m/s}$  donc de la puissance maximale de  $1097.6 \text{ W}$  d'autant que notre profil est meilleur.

Cette hypothèse est d'autant exacte que les études menées sur les éoliennes rapides révèlent qu'il faut au moins une vitesse de  $5 \text{ m/s}$  pour faire tourner de telles machines de façon efficiente : Une vitesse de vent en deça serait bonne pour les éoliennes dites lentes pour le pompage de l'eau.



• Vitesse de rotation de l'éolienne :

Généralement, pour les éoliennes rapides on donne une valeur du rapport de la vitesse périphérique de la pale à la vitesse du vent de 5 à 7.

Ce rapport est la vitesse spécifique de la machine :

$$\lambda_0 = \frac{\pi D H}{60 V}$$

$H$  = vitesse de rotation de l'éolienne (rpm)

$V$  = vitesse du vent (m/s)

$D$  = diamètre de l'hélice (m)

Cependant, avec une valeur de  $\lambda_0 = 7$ , nous trouvons comme vitesse de rotation de l'hélice :

$$H = \frac{60 \lambda_0 V}{\pi D} = \frac{60 \times 7 \times 7}{\pi \times 4} \approx 235 \text{ rpm.}$$

• Rendement mécanique de l'éolienne.

A priori, il nous est pratiquement impossible de déterminer cette caractéristique sans mesures précises.

En ce sens, nous référant simplement à une estimation grossière des pertes de puissance par les frottements, nous retenons que le système éolien que nous concevons peut être efficace à au moins 50% et 70% au plus

$$\eta_m = .50$$

• Puissance transmise à la génératrice :  $P_G$

Etant un rendement mécanique de 50%, nous pouvons compter installer une génératrice de puissance maximale :

$$\begin{aligned} P_G &= 0.50 \times 1.098 = 0.5488 \text{ kW} \\ &= 549 \text{ W} \end{aligned}$$

## PARTIE 2 :

# L'INSTALLATION

Il s'agit ici de procéder à l'étude  
fatigue du montage que nous nous  
proposons de faire : tour et montage  
de la machine .

Les éléments constituant notre installation  
seront calculés et choisis relativement  
à la sécurité ...

# CHAPITRE 1 :

## LA TOUR :

I type de support

II Calculs

A Efforts externes

B Efforts internes

C Résistance

D Déformations.

## I LE TYPE DE SUPPORT

Le tour ou support de notre installation est un élément important pour notre installation. C'est en ce sens que nous avons jugé utile de visiter quelques installations dans la région de Thès.

De ces visites nous avons retenu 2 types de supports :

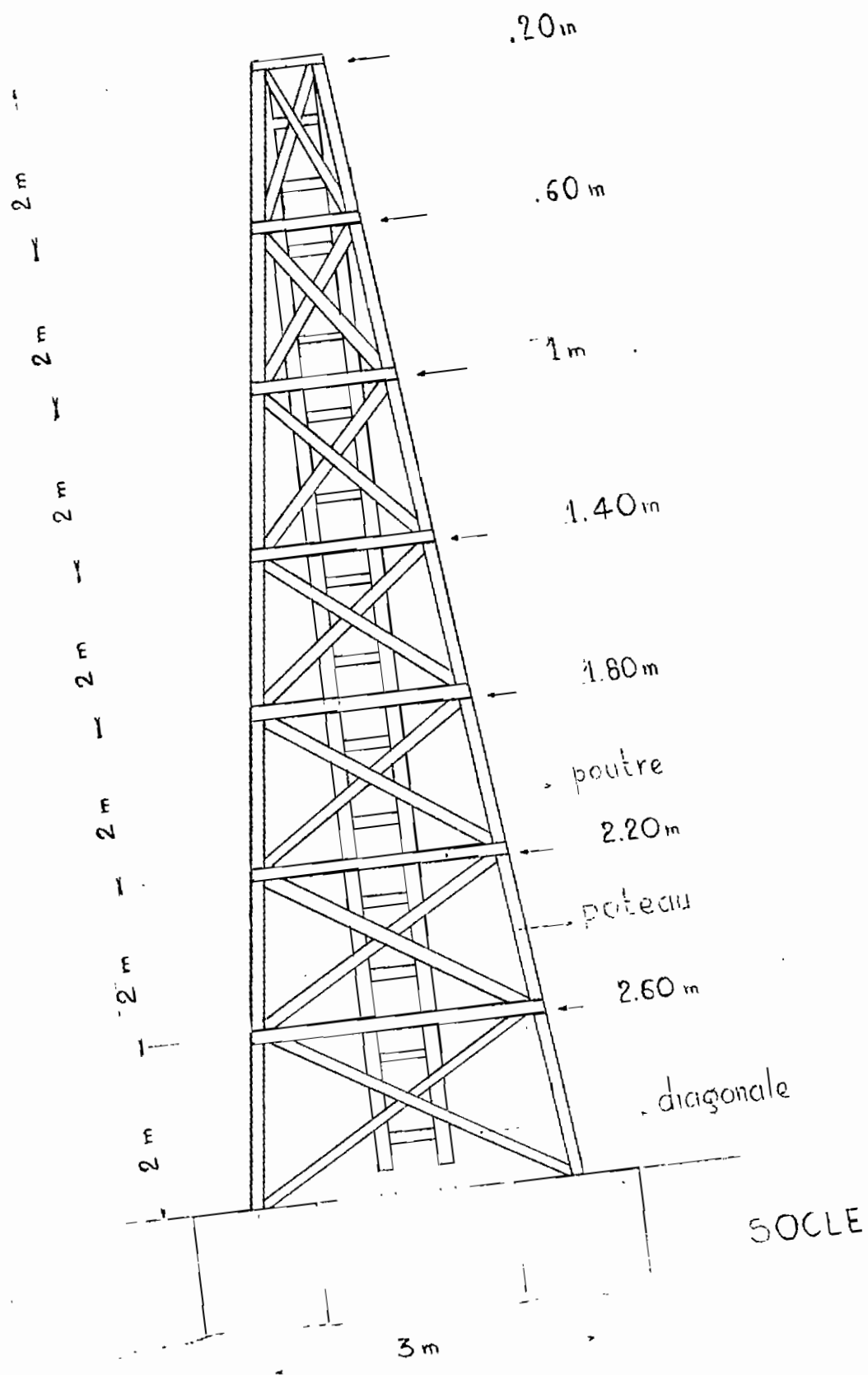
- Le pylône est constitué d'un poteau portant à son sommet la machine. Il est riveté en bois sur un socle en béton. Les câbles le retiennent contre les coups de vents et les éventuelles vibrations. (SABKO)

- Le pylône est un treillis spatial : Il s'agit d'une structure constituée de profilés liés par boulonnage ou soudage. La structure porte au sommet la machine et repose à sa base sur un socle en béton (Peykou, BABAK, ...)

Or, nous avons apprécié les deux possibilités de montage et nous finalement choisi le treillis spatial sur base rectangulaire. Le choix en question est principalement guidé par deux raisons :

- l'accès facile au moteur esbenne
- résistance.

## II CALCULS



Pour la construction de votre tour, nous faisons l'étude sur un squelette constitué de profils en L, à ailes égales (Cornières).  
A priori, nous retenons que votre structure est entièrement constituée de profils L 45x45x5.

Selon la géométrie de la tour, il nous faudra alors une longueur de profils ainsi répartie :

$$\text{- Colonnes : } 14.14 \text{ m} \times 4 = 56.56 \text{ m}$$

$$\text{- Poutres : } (.20 + .60 + 1. + 1.40 + 1.80 + 2.20 + 2.60) \times 4 = 39.2 \text{ m}$$

$$\text{- Diagonales : } (3.44 + 3.12 + 2.83 + 2.56 + 2.33 + 2.15 + 2.14) \times 2 \times 4 = 147.8 \text{ m}$$

$$\text{- Echelle : } 14 \times 2 + .20 \times 40 = 36 \text{ m}$$

Ce qui équivaut à une longueur totale de :

$$L_{\text{totale}} = 279.56 \text{ m}$$

Le profil de notre prédimensionnement a les caractéristiques suivantes :

$$\text{Poids linéaire : } .033 \text{ kN/m}$$

$$\text{Section } A = 425 \text{ mm}^2$$

$$\text{Rayon de giration : } r_{x,y} = 13.8 \text{ mm.}$$

## A. EFFORTS EXTERNES

### 1. POIDS

#### • Structure :

$$.033 \times 279 = 9.207 \text{ KN} \rightarrow \text{Poids total}$$

Pour le besoin de nos calculs, nous considérons le poids de l'échelle et le poids de la partie de la structure :

$$P_s = .033 \times \left( \frac{244}{2} + 35 \right) = 5.181 \text{ KN}$$

#### • Machine et Accessoires :

Nous supposons que nous pourrions installer sur la tour un élément de 250 Kg soit

$$P_m = 250 \times 9.81 \times \frac{1}{1000} = 2.453 \text{ KN}$$

Nous retenir donc pour nos calcul un poids mort de :

$$P_{\text{tot}} = P_s + P_m$$

$$= 5.181 + 2.453 = 7.634 \text{ KN}$$

### 2. SUR L'HELICE

Nous évaluons les efforts le plus élevés



qui finissent s'appliquer sur l'hélice : Pour cela, nous prenons la vitesse la plus élevée qui est susceptible de se produire dans notre région.

Le Centre météorologique de Thiers a retenu un maximum de  $25 \text{ m/s}$  de vitesse du vent (soit  $90 \text{ km/h}$ )

L'échelle de Beaufort nous présente un intervalle :

$103 \text{ à } 117 \text{ km/h}$  pour la violente tempête.

Aussi, pour demeurer sécuritaire dans nos calculs et être en conformité avec les relevés, nous utiliserons une vitesse maximale de :

$$V_{\max} = 30 \text{ m/s} = 108 \text{ km/h}$$

Nous disposons d'une hélice de diamètre  $D = 4 \text{ m}$ .

À partir de la théorie de BÉTZ, nous pouvons donc - à présent - déterminer la force exercée par le vent sur notre hélice :

$$F_{\max} = \frac{4}{9} \rho S V_1^2$$

$\rho$  = masse volumique de l'air =  $1.25 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

$V_1$  = vitesse du vent en amont =  $108 \text{ km/h}$

$S$  = surface balayée par l'hélice

$$= \pi \frac{D^2}{4} = 4\pi \text{ m}^2$$

$$\begin{aligned} \rightarrow F_{\max} &= \frac{4}{9} \times 1.25 \times 4 \times \pi \times 30^2 \\ &= 6283 \text{ N} = 6.283 \text{ KN} \end{aligned}$$

### 3 EFFET du VENT sur LA STRUCTURE

Selon le code National du Bâtiment Canadien, nous pouvons déterminer la traînée sur notre structure [5]:

$$Q_v = k \cdot C_{nd} \cdot q \cdot C_g \cdot C_e \cdot A_s$$

où

$k$  : Coefficient de réduction de la forme

$C_{nd}$  : Coefficient de traînée de la forme

$q$  : Pression de référence (dynamique) due au vent

$C_g$  : Coefficient de rafale

$C_e$  : Coefficient d'exposition

$A_s$  : surface occupée par le profilés sur une face.

$A$  : surface occupée par le cadre de la structure (une face)

$$A = \left( \frac{2.20 + 2.80}{2} \right) \times 14 = 21 \text{ m}^2$$

$$\begin{aligned} A_s &= (14 \cdot 14 \cdot 2 + 2.6 \cdot 2.2 + 1.8 \cdot 1.40 + 1 \cdot 1.60 + 1.20 + 36.95) \times 45 \\ &= 3.376 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

$$\frac{A_s}{A} = \frac{3.376}{21} = .161$$

$$\frac{L}{h_t} = \frac{14}{2} = 70$$

a) Coefficients de traînée et de réduction :

$$C_{nd} = 1.8$$

$$k = 1$$

b) Pression de référence :

$$q = C V^2$$

$V$  = vitesse de référence à 10 m au dessus du sol (108 km/h)

$$C = 50 \times 10^{-6}$$

$$q = 50 \times 10^{-6} \times 108^2 = 583.2 \text{ N/m}^2$$

c) Coefficients de rafale et d'exposition :

Le supplément n°4 du CNBC 1977 donne pour les éléments structureux :

$$C_g = 2$$

$$C_e = 1.1 \quad \text{pour une hauteur } h = 14 \text{ m} \approx 50 \text{ pi.}$$

Nous obtenons la charge du vent sur la face directement attaquée :

$$Q_1 = 1 \times 1.8 \times 583.2 \times 2 \times 1.1 \times 3.376 = 7796.78 \text{ N}$$

Le vent attaque deux faces : celle qui est directement exposée et celle qui est située derrière la première.

Selon la norme Canadienne, la face marquée subit 90% de la poussée exercée sur la première face :

$$Q_2 = -90 \times 7796.78 = 7017.10 \text{ N}$$

Soit on obtient un effort maximum du vent sur la structure de :

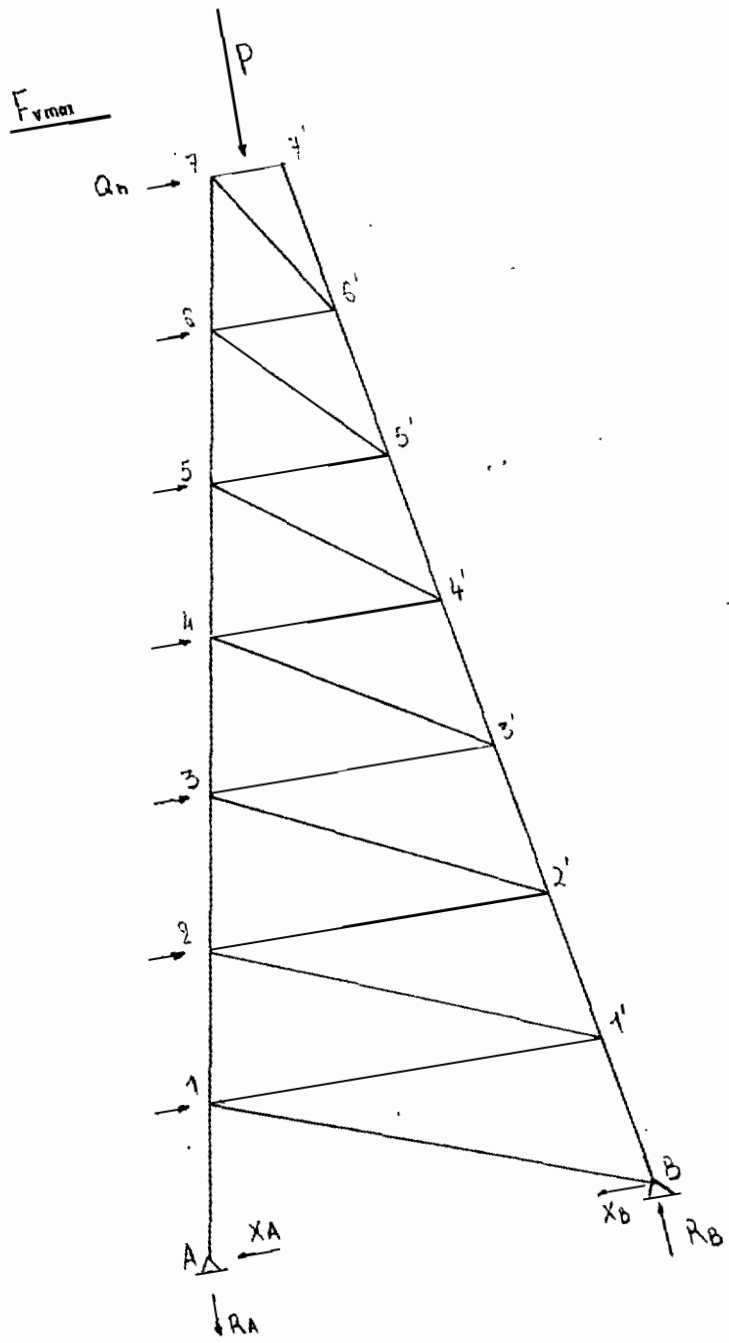
$$Q_{\Sigma} = 7796.78 + 7017.10 = 14814 \text{ N} = 14.814 \text{ kN}$$

L'effort du vent est repris (sur chaque face) par les deux 'poteaux' de la face d'attaque. Aussi, la face que nous considérons pour notre étude portera la moitié de la charge de vent.

Ainsi, nous pouvons répartir cette charge sur les bords de notre première surface d'attaque :

$$Q_n = \frac{14.814}{2} \times \frac{1}{7} = 1.058 \text{ kN}$$

(figure page 37)



Handwritten notes or scribbles at the bottom left of the page.

## 4 REACTIONS aux APPUIS

$$\oplus \sum M_A = 0$$

$$= 5.181 \times 1.5 + 6.283 \times 15 + 7.407 \times 8 - R_B \times 3$$

$$\rightarrow R_B = \frac{1}{3} (5.181 \times 1.5 + 6.283 \times 15 + 7.407 \times 8)$$

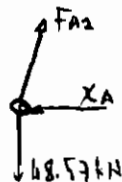
$$= 53.75 \text{ kN}$$

$$\uparrow \sum F_y = 0$$

$$= 53.75 - 5.181 - R_A$$

$$\rightarrow R_A = 48.57 \text{ kN}$$

Pour évaluer les réactions horizontales, nous isolons le nœud A et nous établissons les équations nécessaires à son équilibre.



$$0.995 F_{A1} = 48.57$$

$$\rightarrow F_{A1} = 48.814 \text{ kN}$$

$$\rightarrow X_A = 48.814 \times 0.995 = 4.857 \text{ kN}$$

$$\rightarrow X_B = 6.283 + 7.407 - 4.857 = 8.833 \text{ kN}$$

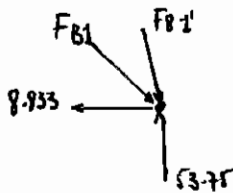
## B EFFORTS INTERNES

Nous procédons aux calculs des efforts dans les membrures par la méthode des nœuds. Chaque nœud, isolé, devra satisfaire à l'équilibre statique.

Nœud A

$$F_{A1} = 48.814 \text{ KN}$$

Nœud B

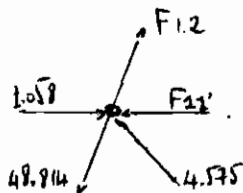


$$\left. \begin{aligned} .995 F_{B1}' + .581 F_{B1} &= 53.75 \\ .0995 F_{B1}' + .814 F_{B1} &= 8.833 \end{aligned} \right\} \text{Equilibre}$$

$$\rightarrow F_{B1}' = 51.349 \text{ KN (C)}$$

$$F_{B1} = 4.575 \text{ KN (C)}$$

Nœud 1

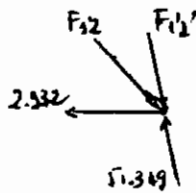


$$.995 F_{12} + .581 \times 4.575 - 48.814 \times .995 = 0$$

$$F_{12}' - .0995 F_{12} - 1.058 + .814 \times 4.575 + .0995 \times 48.814 = 0$$

$$\rightarrow F_{12} = 46.142 \text{ KN (T)}$$

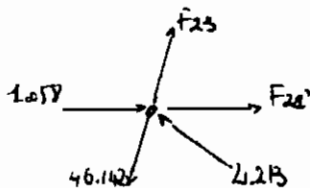
$$F_{12}' = 2.932 \text{ KN (T)}$$

NOEUD 1'

$$\begin{cases} .995 F_{12}' + .64 F_{12} = 51.349 \times .995 & (51.092) \\ .0995 F_{12}' + .16 F_{12} = 2.932 + 51.349 \times .099 & (8.0412) \end{cases}$$

$$\rightarrow F_{12}' = 49.639 \text{ kN (C)}$$

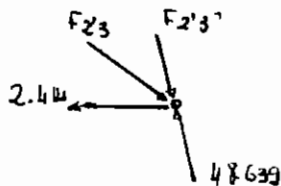
$$F_{12} = 4.213 \text{ kN (C)}$$

NOEUD 2

$$\begin{cases} .995 F_{23} - .995 \times 46.142 + 4.213 \times .64 = 0 \\ F_{22}' - 46.142 \times .0995 - .16 \times 4.213 + 1.058 + .0995 F_{23} = 0 \end{cases}$$

$$\rightarrow F_{23} = 43.432 \text{ kN (T)}$$

$$F_{22}' = 2.414 \text{ kN (T)}$$

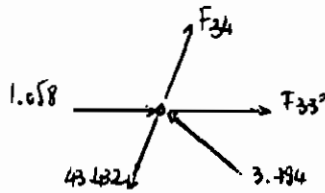
NOEUD 2'

$$\begin{cases} .77 F_{23} + .995 F_{2'3}' = 48.639 \times .995 \\ .77 F_{23} + .0995 F_{2'3}' = 2.414 + 48.639 \times .0995 \end{cases}$$

$$\rightarrow F_{2'3}' = 45.943$$

$$F_{23} = 3.794 \text{ kN}$$

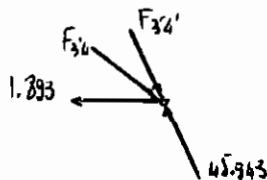


NOEUD 3

$$\begin{cases} .995 F_{34} + 3.794 \times .707 - 43.432 \times .995 = 0 \\ .0995 F_{34} + 1.058 - 43.432 \times .0995 - 3.794 \times .707 + F_{33'} = 0 \end{cases}$$

$$\rightarrow F_{34} = 40.736 \text{ kN (T)}$$

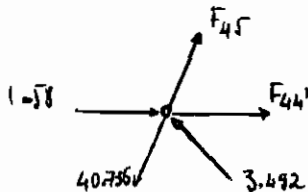
$$F_{33'} = 1.893 \text{ kN (T)}$$

NOEUD 3'

$$\begin{cases} .995 F_{34'} + .78 F_{34} = 45.943 \times .995 \\ .0995 F_{34'} + .62 F_{34} = 1.893 + 45.943 \times .0995 \end{cases}$$

$$\rightarrow F_{34'} = 43.205 \text{ (C)}$$

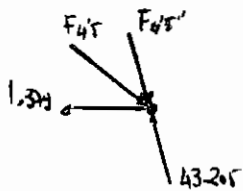
$$F_{34} = 3.492 \text{ (C)}$$

NOEUD 4

$$\begin{cases} .995 F_{45} - 40.736 \times .995 + 3.492 \times .71 = 0 \\ .0995 F_{45} + 1.058 - F_{44'} - 3.492 \times .62 - 40.736 \times .0995 = 0 \end{cases}$$

$$\rightarrow F_{45} = 37.998 \text{ kN (T)}$$

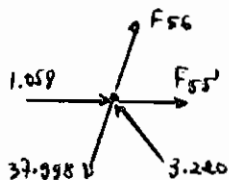
$$F_{44'} = 1.379 \text{ kN (T)}$$

NOEUB 4'

$$\begin{cases} .995F_{4'S'} + .857F_{4'S} = 43.205 \times .995 \\ .0955F_{4'S'} + .514F_{4'S} = 1.379 + 43.205 \times .0955 \end{cases}$$

$$\rightarrow F_{4'S'} = 40.432 \text{ kN} \quad (c)$$

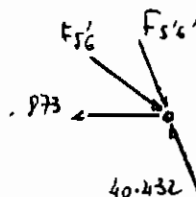
$$F_{4'S} = 3.220 \text{ kN} \quad (c)$$

NOEUB 5

$$\begin{cases} .995F_{56} + .871 \times 3.220 - 37.998 \times .995 = 0 \\ .0955F_{56} + 1.059 + F_{55'} - .514 \times 3.220 - 37.998 \times .0955 = 0 \end{cases}$$

$$\rightarrow F_{56} = 35.225 \text{ kN} \quad (T)$$

$$F_{55'} = .873 \text{ kN} \quad (T)$$

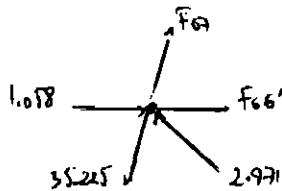
NOEUB 5'

$$\begin{cases} .995F_{5'6'} + .928F_{5'6} = 40.432 \times .995 \\ .0955F_{5'6'} + .371F_{5'6} = .873 + 40.432 \times .0955 \end{cases}$$

$$\rightarrow F_{5'6'} = 37.673 \text{ kN} \quad (c)$$

$$F_{5'6} = 2.871 \text{ kN} \quad (c)$$

NOEUD 6

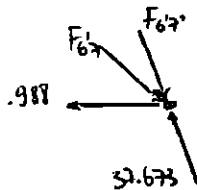


$$\begin{cases} .995 F_{67} + 2.871 \times 9.20 - 35.225 \times .995 = 0 \\ .0995 F_{67} + 1.058 + F_{66'} - 35.225 \times .0995 - 2.871 \times .62 = 0 \end{cases}$$

$$\rightarrow F_{67} = 32.547 \text{ KN (T)}$$

$$F_{66'} = .988 \text{ KN (T)}$$

NOEUD 6'



$$\begin{cases} .995 F_{67'} + .986 F_{67''} = 37.673 \times .995 \\ .0995 F_{67'} + .196 F_{67''} = .988 + 37.673 \times .0995 \end{cases}$$

$$\rightarrow F_{67'} = 27.737 \text{ KN (C)}$$

o facteur de pondération des charges internes:  $\alpha_R$

facteur de charge due au vent :  $\alpha_Q = 1.5$

facteur de charge due au poids mort :  $\alpha_D = 1.25$

Moment par rapport au point A due à la charge de vent :  $6.283 \times 15 + 7.407 \times 8 = 153.501 \text{ kNm}$ .

Moment due au poids mort :  $5.181 \times 1.5 = 7.7715 \text{ kNm}$ .

$$\rightarrow \Sigma M_A = 161.2725 \text{ kNm}$$

$$\rightarrow \alpha_R = \frac{153.501}{161.2725} \times 1.5 + \frac{7.7715}{161.2725} \times 1.25 = 1.488$$

## C. RESISTANCE

L'étude de la résistance de notre tour relève de l'étude des éléments constituant. Nous optons de nous référer au calcul aux états limites pour faire la vérification de la tenue de notre profilé.

Nous prenons à priori de l'acier

G 40.211 300 W (Désignation de la norme canadienne)

$F_y = 300 \text{ MPa}$  : limite d'écoulement

$F_u = 450 \text{ MPa}$  : limite ultime de rupture ou de cisail.

Le code S16.1 M78 nous permet

la classification de notre profilé :

$$\frac{b_o}{t} = \frac{45}{5} = 9 < \frac{260}{\sqrt{300}} = 15.01$$

→ L 45x45x5 G 40.211 300W est de Classe 3

Pour assurer le facteur de sécurité de notre structure, nous pourrions les charges effectives sur nos membres tel :

$$F_{\max} = \alpha_R F$$

$$\text{avec } \alpha_R = 1.488 \approx 1.5$$

## 1 Résistance à la traction

Section sollicitée à la traction :

$$A_n = 425 \text{ mm}^2$$

$$\frac{A_n}{A_g} = 1$$

$$\frac{F_y}{F_u} = \frac{300}{450} = 0.667$$

$$\left. \begin{array}{l} \frac{A_n}{A_g} = 1 \\ \frac{F_y}{F_u} = 0.667 \end{array} \right\} \frac{A_n}{A_g} > \frac{F_y}{F_u}$$

Résistance fondée de l'acier (à la traction) :

selon le code Cana

dien S16.1 1978, la résistance peut se trouver selon l'expression :

$$T_r = \min (\phi A_n \bar{F}_y, 0.85 \phi \bar{F}_u) \quad [6]$$

$$\phi A_n \bar{F}_y = 0.9 \times 425 \times 300 \times 10^3 = 114.750 \text{ kN}$$

$$0.85 \phi A_n \bar{F}_u = 0.85 \times 0.9 \times 425 \times 450 \times 10^3 = 146.310 \text{ kN}$$

$$\rightarrow T_r = 114.750 \text{ kN}$$

Or, pour les éléments tendus dans notre structure, le membre le plus sol-

licité est (A.1) :  $F_{A1} = 48.814 \text{ kN}$

Notre vérification en traction passera donc sur cet élément seul dont

la sollicitation fondée est :

$$F_{\max}(A-1) = 1.5 \times 48.814 = 73.221 \text{ kN}$$

A la comparaison de la charge et de la résistance fondée :

$$T_r > F_{\max}(A-1)$$

→ la résistance à la traction  
est bonne

## 2 Résistance à la compression

Chaque noeud de notre structure constitue une rotule ; nos éléments sont

donc birotules :

$K = 1$  facteur d'appui

$C_r =$  résistance d'un élément en compression.

$C_f =$  sollicitation en compression.

a) élément B-1'

longueur de l'élément :  $l = 2.01 \text{ m}$ .

$$\frac{kl}{r_x} = \frac{1 \times 2.01}{18.8 \times 10^{-3}} = 145.65$$

$$C_r = 48.2 \times 425 \times 10^{-3} = 20.485 \text{ kN}$$

$$C_f = 1.5 \times F_{B1'} = 1.5 \times 51.349 = 77.024 \text{ kN}$$

$C_r < C_f$  : l'élément flambe

Notre élément va résister face à sa charge. Nous allons donc essayer de voir quel serait le comportement d'une section L 55 x 55 x 5 en acier G 40.21 M 350 W dont  $A = 525 \text{ mm}^2$  et  $r_x = 17 \text{ mm}$ ; en notant que le système d'assemblage de ces éléments réduit la longueur de B1' à la moitié de la longueur initiale soit  $L = 1.005 \text{ m}$ .

$$\rightarrow \frac{KL}{r_x} = \frac{1 \times 1.005}{17 \times 10^{-3}} = 59$$

$$\rightarrow C_r = 167 \times 525 \times 10^{-3} = 87.675 \text{ kN}$$

$$C_f = 77.024 \text{ kN}$$

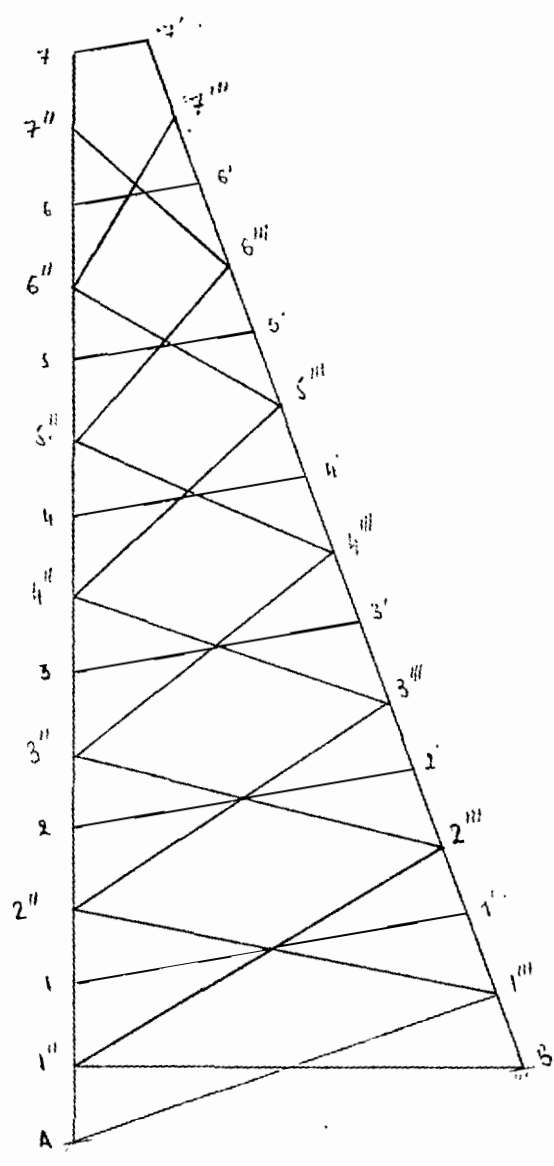
$$C_r > C_f$$

→ L'élément résiste bien au flambage.

De même, tous les autres éléments : (1'2'), (2'3'), (3'4'), (4'5'), (5'6'), (6'7') seront réduits de moitié pour bien supporter les charges qui pourraient leur être appliquées. Ces éléments seront constitués de profils L 55.55 x 5 G 40 M 78 350 W.

Il faut compter avec le changement de direction du vent : les éléments soumis à la compression pourraient se retrouver soumis à la traction et inversement, il convient de faire de nos 4 poteaux des profils de même type et de même résistance.

# SYSTEME de MONTAGE de la TOUR





b) élément B1"

On maintient les éléments diagonaux dans le même profilé, le même matériau : L 45 x 45 x 5 G40 M78 300 W.

$$\text{longueur de l'élément : } L = \sqrt{2.9^2 + 1^2} = 3.06 \text{ m.}$$

$$\frac{KL}{r_x} = \frac{1 \times 3.06}{13.8 \times 10^{-3}} = 221.74$$

$$\lambda = \frac{KL}{r_x} \sqrt{\frac{F_y}{\pi^2 E}} = 221.74 \times 0.0123 = 2.727 < 3.6$$

$$\begin{aligned} \rightarrow C_r &= \phi A F_y \left( 0.009 + \frac{0.877}{\lambda^2} \right) \\ &= 0.9 \times 425 \times 10^6 \times 300 \times 10^6 \left( 0.009 + \frac{0.877}{2.727^2} \right) \times 10^{-3} = \\ &= 14.565 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$C_f = F_{max}(B1'') = 1.5 \times 4.575 = 6.863 \text{ kN}$$

À la comparaison de la résistance de l'élément à la compression  $C_r$  et de la sollicitation  $C_f$  :

$$C_r > C_f$$

L'élément B1'' résiste bien à sa charge, au flambage.

c) élément 1''-2''

Il s'agit d'un élément diagonal qui a dû être traduit de position pour contribuer à la longueur de flambement des éléments de poteaux. L'élément est un profilé L 45x45x5 G40.211930W dont la longueur  $l = 3.36$  m.

$$\rightarrow \frac{KL}{r_x} = \frac{1 \times 3.36}{13.8 \times 10^{-3}} = 243.48$$

$$\lambda = \frac{KL}{r_x} \sqrt{\frac{F_y}{\pi^2 E}} = 243.48 \times 0.0123 = 2.995 < 3.6$$

$$\begin{aligned} \rightarrow C_r &= \phi A F_y (-0.009 + 0.877/\lambda^2) \\ &= 9 \times 425 \times 300 (-0.009 + 0.877/2.995^2) \times 10^{-3} \\ &= 12.253 \end{aligned}$$

$$C_p = F_{uor} = 1.5 \times F_{1/2} = 1.5 \times 4.213 = 6.319 \text{ kN}$$

$C_r > C_p$   $\rightarrow$  L'élément résiste bien aux sollicita  
dont il est objet.

Nous noterons que c'est l'élément le plus étancé et le plus sollicités en comparaison des autres éléments diagonaux situés au dessus ; c'est dire simplement que les autres éléments résisteront également à leur sollicitation interne, à la faille (ils sont du L 45x45x5 G40.211930W)

D

## DECISION

Il s'agit pour nous de faire le choix définitif de nos profiles et de spécifier les détails de construction exactels.

### • Profiles :

En conformité avec les calculs établis, nous jugeons que la sécurité est satisfaisante. Ainsi, nous recommandons d'utiliser :

- L 55 x 55 x 5 G 40.21178 350W pour les colonnes :

longueur :  $15 \times 4 = 60 \text{ m}$ .

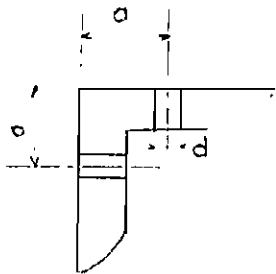
- L 45 x 45 x 5 G 40.21178 300W pour les diagonales et les barres.

longueur : 230 m

### • Le montage des profiles :

Il se fera par boulons pour un coût plus faible et une facilité de démontage.

Les trous de boulons doivent répondre à des normes :

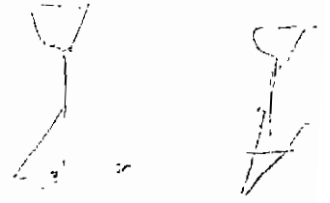


• Pour L 55 x 55 x 5 :  $a = 27 \text{ mm}$

$d = 20$

• Pour L 45 x 45 x 5 :  $a = 23$

$d = 20$



# CHAPITRE 2

## LA MACHINE

### A Fonctions mécaniques

1. Transmission et transformation de puissance
2. Régulation de vitesse
3. Orientation
4. Freinage.

### B Système proposé

B.1 : Description

B.2 : Calcul et choix de matériaux

Annexes : Dessins : Ensemble et détails

La machine éolienne que nous nous proposons d'installer devra répondre à certaines fonctions mécaniques fondamentales pour son fonctionnement.

Elle devra également être constituée d'éléments peu coûteux et faciles de réalisation et d'entretien ; l'interchangeabilité des pièces ne devrait pas poser de problèmes majeurs.

Pour atteindre ces objectifs, nous nous proposons dans ce chapitre de notre projet de poser les problèmes mécaniques ou fonctions à réaliser pour ensuite proposer parmi les possibilités nombreuses, la solution qui nous semble être la plus adéquate (coût et entretien.)

## A FONCTIONS MECANQUES:

(1) La génération d'énergie électrique à partir de l'énergie du vent suppose la transformation de cette énergie mécanique en énergie électrique. Cela requiert essentiellement deux fonctions:

- La transmission de la puissance mécanique
- La transformation de la puissance mécanique en électrique

② Le vent varie perpétuellement en intensité; Pour une même position relative de l'hélice (à angle de calage fixe) par rapport à la direction du vent, la vitesse de rotation de l'hélice change avec le vent, donc la vitesse de l'élément transformateur de l'énergie varie dans le même sens, dans la même proportion.

Or, du fait de la limitation de la vitesse de l'élément transformateur (une génératrice est efficace entre deux vitesses limites) et du fait qu'une trop grande vitesse de la machine causerait des vibrations, il faudrait que la variation de la vitesse du vent pose un problème, une fonction à assurer (la machine doit fonctionner le maximum de temps possible):

— La régulation de la vitesse de l'hélice et conséquemment, de notre transformateur.

③ La direction du vent change en permanence. Il nous faut faire fonctionner notre machine en permanence. Il s'agit donc de maintenir, en permanente position relativement à la direction du vent, notre hélice. Cela est l'expression d'une fonction mécanique à assurer:

— L'orientation du système dans le lit du vent.

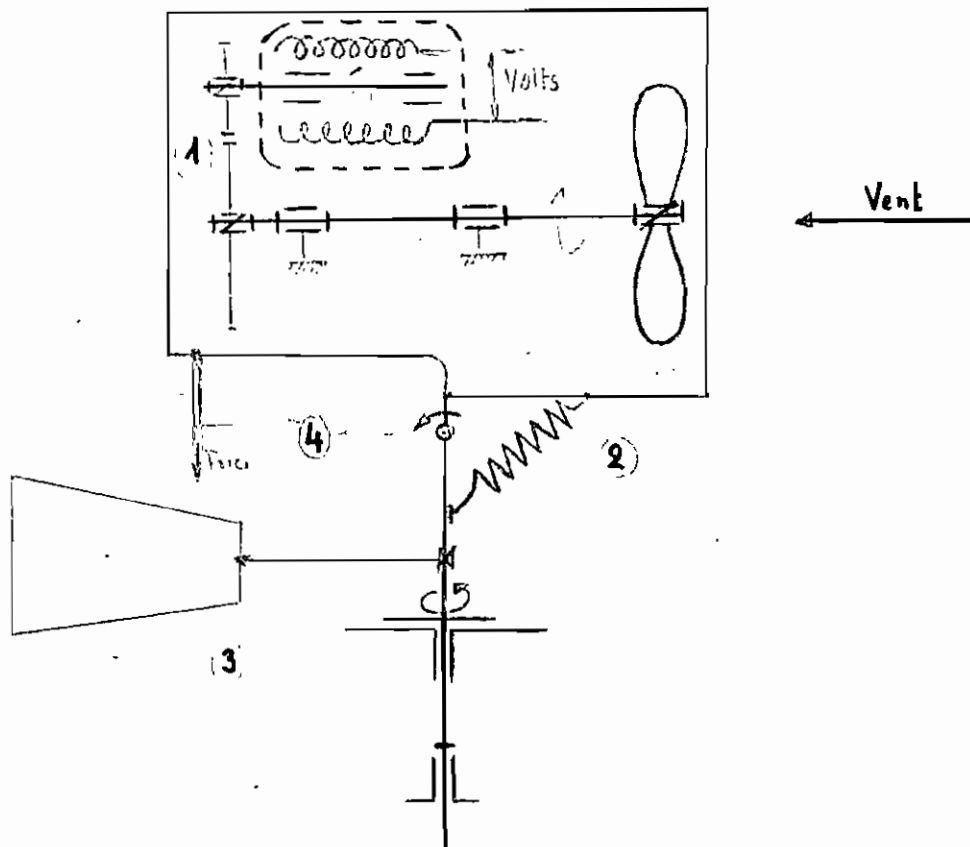
④ La machine doit fonctionner dans une gamme de vitesses données et s'arrêter au delà de la limite maximale

Pour rendre possibles des réparations ou vérifications éventuelles,

il doit être possible d'arrêter la machine depuis le bas de la tour.  
Cela peut se résumer en une fonction mécanique :

- Le freinage (automatique et manuelle ou comman-  
dé)

Dans le sens de la réalisation de tous ces objectifs, nous avons  
établi le schéma de principe suivant.



Sur la base des fonctions à assurer, du schéma de principe nous  
avons élaboré un système.

## B SYSTEME PROPOSE (dessin 1)

B-1: Le système que

nous proposons est essentiellement constitué de :

- l'hélice (1)
- Un arbre qui sert à la transmission de puissance (2)
- Un plateau support (3) des cotes de l'arbre (2) et de la génératrice (30)
- Un bloc support du plateau (4) et servant à l'orientation
- Une cuvette pour le guidage en rotation et pour supporter toute la machine (Bloc support et plateau support) (10)
- Deux renats accrochés au plateau et en bloc pour la régulation (15)
- Un axe pour la régulation et la mise en chopéau de l'hélice (5)
- Deux câbles de retenue pour l'équilibrage des moments créés par le poids de l'hélice et de l'arbre (7)
- Un câble pour le freinage manuel (11)
- Un système de bras de levier portant le câble-frein
- Un empannage pour l'orientation, la régulation
- Un dynamo de voiture nous sert de génératrice



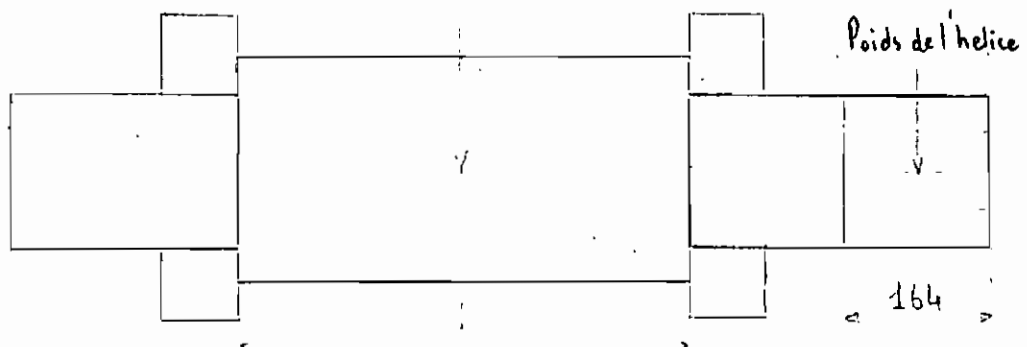
La description du système suffit en notre sens à expliquer le fonctionnement; les moyens utilisés pour assurer les fonctions peuvent être observés sur les dessins d'ensemble et de détail que nous joignons en annexe.

## B2 CALCUL et CHOIX des ELEMENTS

Nos calculs porteront essentiellement sur le dimensionnement des éléments tels l'arbre d'hélice et l'axe du système; pour demeurer dans une limite acceptable de déformations.

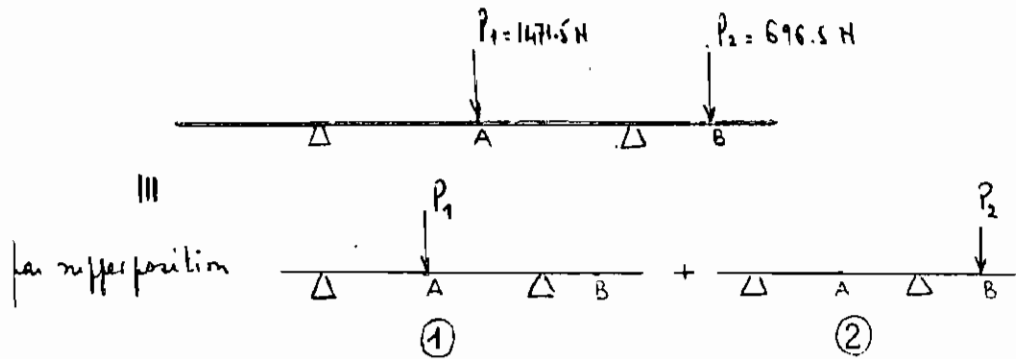
Nous estimerons également les charges à supporter par les roulements pour un bon choix; les contraintes induites dans les autres éléments nous permettront de faire un bon choix du matériau constitutif en notant que le coût est un critère auxiliaire mais important.

### 2.1 DIMENSIONNEMENT de L'ARBRE d'HELICE



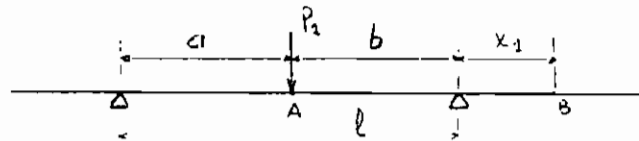
En cette section, il s'agit de déterminer la longueur  $l$  qui pourrait demeurer en conformité avec la déformation maximale permise pour un arbre de transmission.

Pour faire l'étude, nous prenons notre arbre tel une poutre sur deux appuis :



Les chargements  $P_1$  et  $P_2$  causent chacun une déformation aux points A et B. Pour connaître la déformation totale en chaque point, il s'agit d'ajouter les effets de chaque chargement (superposition)

• Cas 1 :



$$a = b = \frac{l}{2}$$

$$I_A = \bar{I} \times \frac{100^4}{64} = 4908738.5 \times 10^{-12} \text{ m}^4$$

$$I_B = \bar{I} \times \frac{80^4}{64} = 2010619.2 \times 10^{-12} \text{ m}^4$$

$$E = 200 \text{ GPa} \quad (\text{Acier})$$

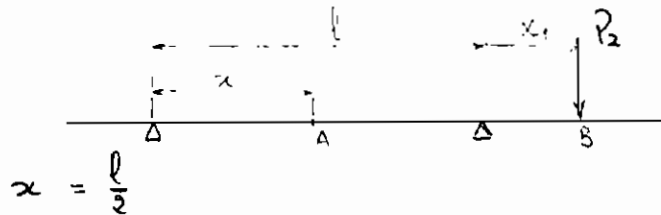
au point A, la déformation due à la charge  $P_1$  :

$$\Delta A_{1(m)} = \frac{P_1 \cdot a^2 \cdot b^2}{3 E I_A l} = \frac{1471.5 \text{ l}^3}{48 \times 200 \times 10^3 \times 4908738 \times 10^{-12}} = 3.123 \times 10^{-5} \text{ l}^3$$

au point B, la déformation due à la charge  $P_1$  :

$$\Delta B_{1(m)} = \frac{P_1 \cdot a \cdot b \cdot x_1}{6 E I_B l} (l + a) = \frac{1471.5}{48 \times 200 \times 10^3 \times 2010619.2 \times 10^{-12}} = 7.62 \cdot 10^{-5} \text{ l}^2 x_1$$

Cas 2



au point A, la déformation due à la charge  $P_2$

$$\Delta A_{2(m)} = \frac{P_2 \cdot a \cdot x}{6 E \cdot I \cdot l} (l^2 - x^2) = \frac{696.51 \text{ l}^3}{32 \times 200 \times 10^3 \times 4908738 \times 10^{-12}} = 2.22 \times 10^{-5} \text{ l}^3$$

au point B, la déformation due à  $P_2$  :

$$\Delta B_2 = \frac{P_2}{3 E I_B} (x_1^2 l + x_1^3) = \frac{696.51 (x_1^2 l + x_1^3)}{3 \times 200 \times 10^3 \times 2010619.2 \times 10^{-12}} = 5.77 \times 10^{-4} (x_1^2 l + x_1^3)$$

• Portée maximale entre les supports :  $l_{max}$

Pour un arbre de transmission, la déformation maximale doit être inférieure à 10% de la portée entre les supports [11]

$$\Delta A_{max} = 0.001 l_{max}$$

La déformation totale au point A, due à  $P_1$  et  $P_2$  :

$$\begin{aligned} \Delta A &= \Delta A_1 + \Delta A_2 \\ &= 5.343 \times 10^{-5} l^3 \end{aligned}$$

$$\rightarrow 0.001 l_{max} = 5.343 \times 10^{-5} l_{max}^3$$

$$\rightarrow l_{max} = 4.32 \text{ m}$$

• Pour notre arbre, la dimension entre les supports est choisie inférieure à  $l_{max}$  :

$$l = \underline{230 \text{ mm}}$$

ainsi, nous notons la déformation en A :

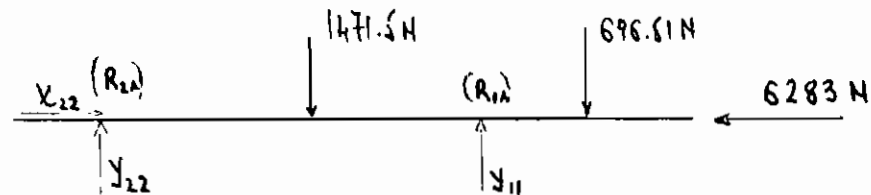
$$\Delta A = 5.343 \times 10^{-5} \times 230^3 \times 10^{-9} = 650 \times 10^{-6} \text{ mm} < 0.23 \text{ mm}$$

$$\text{Pour } \underline{\chi_1 = 140 \text{ mm}}$$

$$\Delta B = 4.75 \times 10^{-3} \text{ mm} < 0.23 \text{ mm}$$

## 2.2 : Roulements d'arbre d'hélice

Les roulements d'arbre d'hélice constituent les supports de l'arbre : le roulement  $R_{2A}$  est supposé reprendre les charges axiales sur l'arbre tandis que le roulement  $R_{1A}$  est sollicité radialement.



• Calcul de la charge radiale sur  $R_1$  et  $R_2$  :

$$\sum M_{R_2} = 1471.5 \times 115 + 696.61 \times 370 - Y_{11} \times 230 = 0$$

$$\rightarrow Y_{11} = 1856 \text{ N}$$

$$\sum F_v = 0$$

$$\rightarrow Y_{22} = 312 \text{ N}$$

$$\sum F_x = 0$$

$$\rightarrow X_{22} = 6283 \text{ N}$$

• Calcul de la charge équivalente :

- La bague intérieure du roulement tourne :  $V = 1$

- Pour des roulements à gorge profonde, le facteur multipliant les charges radiales et axiales :  $X_1 = 1, Y_1 = 0$  -  $X_2 = 0.5, Y_2 = 1.4$

$$R_{e1A} = \max \begin{cases} V_1 Y_{11} = 1 \times 1856 = 1856 \\ X_1 V_1 Y_{11} + Y_1 X_{11} = 1 \times 1 \times 1856 = 1856 \text{ N} \\ X_2 V_1 Y_{11} + Y_2 X_{11} = .5 \times 1 \times 1856 + 1.4 \times 0 = 928 \text{ N} \end{cases}$$

$$\rightarrow R_{e1A} = 1856 \text{ N}$$

$$R_{e2A} = \max \begin{cases} 1 \times 312 = 312 \text{ N} \\ .5 \times 312 + 1.4 \times 6283 = 8952.2 \text{ N} \end{cases}$$

$$\rightarrow R_{e2A} = 8952.2 \text{ N}$$

Calcul de la charge dynamique requise :

Avec une vitesse maximale  $N = 350 \text{ rpm}$ .

Avec une durée de vie avec une fiabilité de 90%.  $Hr = 60000 \text{ heures}$

La charge dynamique se calcule selon la formule : [9, 11]

$$C = R_e \left( \frac{N \cdot Hr}{300 \times 33.33} \right)^{1/3}$$

$$\rightarrow C_{1A} = 20.05 \text{ KN}$$

$$\rightarrow C_{2A} = 96.69 \text{ KN}$$

• Choix des roulements :

- Roulements R<sub>1A</sub> : Serie 02 SKF  
 $C = 73.840 \text{ KN}$   
 $\Phi_{\text{interieur}} = 90 \text{ mm.}$

- Roulement R<sub>2A</sub> : Serie 03 SKF  
 $C = 101.864 \text{ KN}$   
 $\Phi_{\text{int}} = 85 \text{ mm.}$

## 2.3 Clavette :

• Dans notre système, nous employerons une clavette à bout rond (Patt and Whitney) :

On nous en donne le diamètre d'arbre  $\Phi = 60 \text{ mm.}$ , la norme dicte une clavette  $18 \times 11 \times 11$

• On nous donne une vitesse de rotation minimale  $N = 200 \text{ rpm.}$ , le couple repris par la clavette, la force s'exerçant entre l'arbre et la clavette nous permettra d'évaluer les contraintes sur l'élément, la puissance à transmettre est  $P_E = 1097 \text{ W}$

- Couple de torsion repris par la clavette :

$$T = \frac{P_E \times 60}{2\pi N} = \frac{1097 \times 60}{2\pi \times 200} = 52.38 \text{ Nm}$$

- Force entre l'arbre et la clavette :

$$F_{Ac} = \frac{2T}{\phi} = \frac{2 \times 52.38}{60 \times 10^{-3}} = 1746 \text{ N}$$

- Contraintes induites dans la clavette :

• Compression :  $\sigma_c = \frac{2F_m}{L \times H} = \frac{2 \times 1746}{18 \times 11} = 17.64 \text{ MPa}$

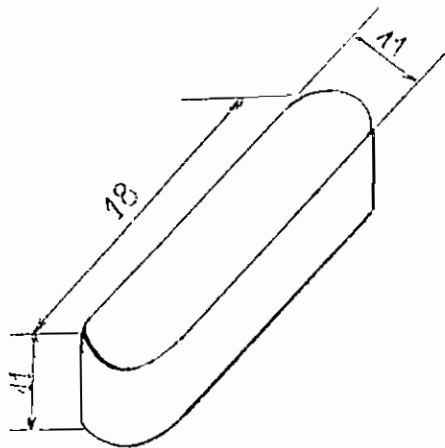
• Cisaillement :  $\tau = \frac{F_{Ac}}{L \cdot W} = \frac{1746}{18 \times 11} = 8.82 \text{ MPa}$

Pour un facteur de sécurité de 10, le matériau de la clavette devrait avoir une limite d'écoulement  $S_y$  égale à :

$$S_y = 10\sigma_c = 176.4 \text{ MPa.}$$

- Choix du matériau :

Acier d'usage courant C 10  
( $S_u = 330 \text{ MPa}$ ,  $S_y = 210 \text{ MPa}$ )





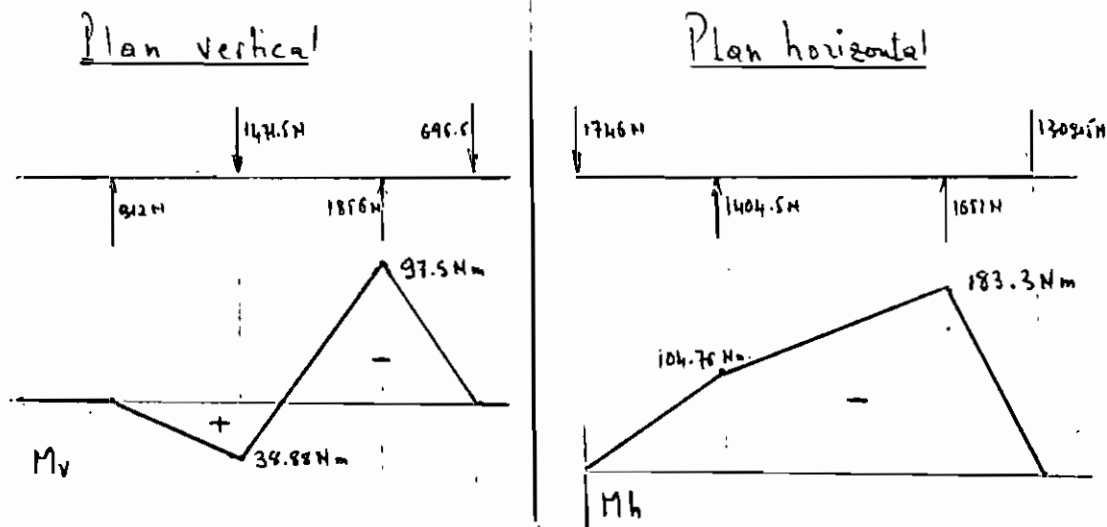
## 2.4 Arbre de l'hélice : (dessin 2)

L'arbre est soumis à des efforts dans les plans horizontal et vertical. L'évaluation des contraintes dans sa section critique et l'expression de sa limite d'endurance nous permettent, pour un facteur de sécurité choisi (adéquat) de déterminer la limite de rupture du matériau. Par la suite, nous pourrions selon les tables disponibles sélectionner le matériau le moins coûteux qui constitue notre arbre d'hélice.

Après ce choix, nous vérifierons le comportement des couveteurs de l'arbre; nous regarderons le rapport entre le couple de torsion admissible et le couple de torsion appliqué pour juger de l'adéquation de notre matériau.

### Détermination de la section critique et du moment fléchissant maxi

#### DIAGRAMMES des MOMENTS



La section critique est :  $A = \pi \frac{90^2}{4} = 6361.725 \text{ mm}^2$  ( $d = 90 \text{ mm}$ )

Le moment flechissant maximum :

$$M_f = \sqrt{M_v^2 + M_h^2} \\ = \sqrt{183.3^2 + 97.5^2} = 207.62 \text{ Nm.}$$

Le moment de torsion  $T = 52.38 \text{ Nm.}$

### Contraintes induites dans la section :

- Le moment flechissant induit des contraintes variables :

$$\sigma_{xa} = \frac{32 M_f}{\pi d^3} = \frac{32 \cdot 207.62}{\pi \times 90^3 \times 10^{-9}} = 2.90 \text{ MPa}$$

- La force axiale induit des contraintes constantes.

$$\sigma_{xm} = \frac{F}{A} = \frac{6283}{6361.725} = 0.988 \text{ MPa}$$

- Le moment de torsion constant induit des contraintes constantes.

$$\tau_{xyw} = \frac{16 T}{\pi d^3} = \frac{16 \times 52.38}{\pi \times 90^3 \times 10^{-9}} = 0.366 \text{ MPa}$$

$$\tau_{xye} = 0 \quad (\text{Pas de cisaillement variable})$$

• Expression de la limite d'endurance de l'arbre  $S_e$  :

$$S_e = k_a \cdot k_b \cdot k_c \cdot k_d \cdot k_e \cdot k_f \cdot S'_e$$

Pour notre arbre ainsi que la température d'opération n'excede pas 71°C, notre design se base sur une vie infinie avec une fiabilité de 99%.

$$k_a = \text{facteur de fini de surface} = .85$$

$$k_b = \text{ " de grosseur} = .75$$

$$k_c = \text{ " de fiabilité} = .814$$

$$k_d = \text{ " de temperature} = 1$$

$$k_e = \text{ " de concentration de contrainte} = .33$$

$$k_f = \text{ " divers} = 1$$

Pour un acier dont la limite ultime de rupture en tension  $S_u$  est telle que :

$$\cdot S_u \leq 1400 \text{ MPa} \Rightarrow S'_e = .5 S_u \Rightarrow S_e = .0856 S_u$$

$$\cdot S_u > 1400 \text{ MPa} \rightarrow S'_e = 700 \text{ MPa} \Rightarrow S_e = 119.87 \text{ MPa}$$

• Contrainte de von Mises :

$$\sigma'_a = \sqrt{\sigma_{xa}^2 + 3(\tau_{xya})^2} = 2.90 \text{ MPa}$$

$$\sigma'_m = \sqrt{\sigma_{xm}^2 + 3(\tau_{xym})^2} = 1.174 \text{ MPa}$$

Pour un facteur de sécurité de 10, nous trouvons que notre arbre devrait avoir une limite ultime de rupture de :

Selon la théorie de VON MISES - HENCKY, le facteur de sécurité  $n$  s'exprime tel :

$$\frac{1}{n} = \frac{\sigma'_m}{S_u} + \frac{\sigma'_a}{S_e}$$

$$n = 10$$

$$S_u = ?$$

$$S_e = 0.856 S_u$$

$$\left. \begin{array}{l} n = 10 \\ S_u = ? \\ S_e = 0.856 S_u \end{array} \right\} \rightarrow \frac{1}{10} = \frac{1.174}{S_u} + \frac{2.90}{0.856 S_u}$$

$$\Rightarrow S_u = 350.5 \text{ MPa.}$$

• Choix du matériau de l'arbre :

$$\begin{aligned} \text{Acier rapide XC 10} : \quad S_u &= 350 \text{ MPa} \\ S_y &= 210 \text{ MPa} \\ S_e &= 30 \text{ MPa.} \end{aligned}$$

• Vérification des couvelures :

$$\text{Couple appliqué : } T_c = \frac{1097 \times 60}{2\pi \times 200} = 52.38 \text{ Nm.}$$

$$\text{Couple admissible : } T_a = i \frac{d_w}{2} L \cdot h \cdot p$$

$$i = \text{nbre de caucature} = 25$$

$$d_m = \text{diamètre moyen} = 72.5 \text{ mm.}$$

$$L = \text{longueur de la caucature} = 164 \text{ mm.}$$

$$h = \text{hauteur de contact} = 5 \text{ mm.}$$

$$p = \text{pression latérale admissible} = 4S_{cy} = 2S_y = 420 \text{ MPa.}$$

$$\rightarrow T_a = \frac{25 \times 72.5}{2} \times 164 \times 5 \times 420 \times 10^{-9} \times 10^6 = 312 \times 10^3 \text{ Nm.}$$

Du point de vue de la torsion, nous aurons un facteur de sécurité très bon au niveau des caucatures : le matériau choisi est adéquat.

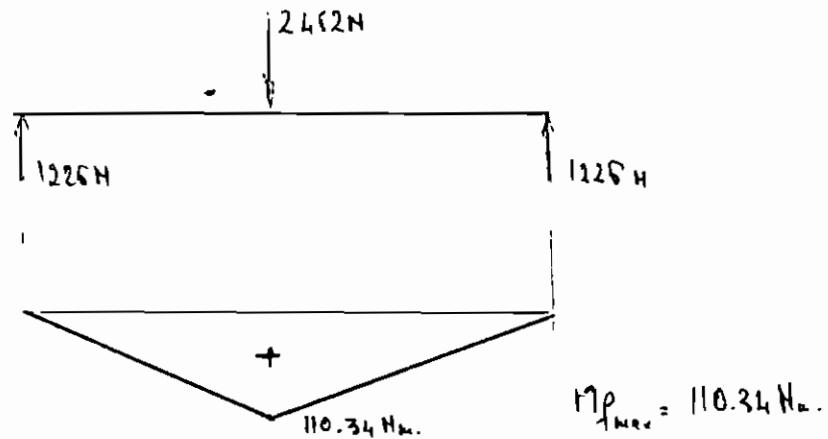
## 2.5 Axe de régulation

L'axe de régulation est la pièce qui permet au plateau support une rotation soit pour la régulation de la vitesse de l'hélice, soit pour le freinage. Il supporte l'ensemble plateau et est soumis à des efforts de cisaillement et de moments de flexion ; la détermination de ces contraintes nous permettra de choisir le matériau constitutif.

L'élément compte une section quasiment uniforme sans aucune concentration de

contrainte appreciable .

◦ Diagramme des moments fléchissants



◦ Contraintes induites :

Le moment fléchissant induit des contraintes variables :

$$\sigma_{xa} = \frac{32 M_p}{\pi d^3} = \frac{32 \times 110.34}{\pi \times 40^3 \times 10^9} = 17.56 \text{ MPa}$$

Le effort tranchant introduit un cisaillement

$$\tau_{xyw} = \frac{1226}{1256.64} = 0.976 \text{ MPa}$$

◦ Contrainte de von Mises

$$\sigma'_a = 17.56 \text{ MPa}$$

$$\sigma'_m = 0.976 \sqrt{3} = 1.69 \text{ MPa.}$$

• Limite ultime requise :  $S_u$

Pour un facteur de sécurité  $n = 8$

Pour un acier  $S_u < 1400$  MPa, usiné et dont le milieu d'opération n'exécède pas  $71^\circ\text{C}$  on a sur l'axe une limite d'endurance

$$S_e = .293 S_u.$$

$$\rightarrow \frac{1}{n} = \frac{1.64}{S_u} + \frac{17.66}{.293 S_u} \quad (n = 8)$$

$$\Rightarrow S_u = 492 \text{ MPa.}$$

• Choix du matériau :

Acier rapide (Trempe à l'eau à  $900^\circ\text{C}$  et  $825^\circ\text{C}$ ) : XC10

$$S_u = 580 \text{ MPa}$$

$$S_y = 300 \text{ MPa}$$

$$S_e = 146.5 \text{ MPa.}$$

... 11 - 15 - 22

## 2.6 Bloc support:

Il est l'élément 5 de notre système. Il est soumis à des efforts de vents, au foi ds du système et aux réactions de appuis :

• Efforts de vents sur l'élément :

$$Q_B = C_p \cdot C_e \cdot C_g \cdot q \cdot A$$

$$C_p = \text{Coefficient de pression} = .7$$

$$C_e = 1.1$$

$$C_g = 2.5$$

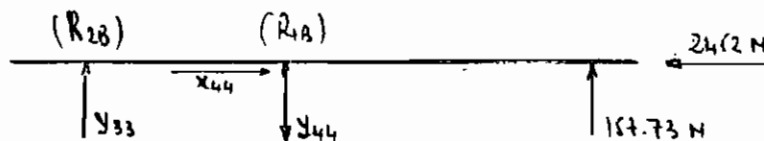
$$q = 583.2 \text{ N/m}^2$$

$$A = \text{surface exposée} = 140.5 \times 10^3 \text{ mm}^2$$

$$\begin{aligned} \rightarrow Q_B &= .7 \times 1.1 \times 2.5 \times 583.2 \times 140 \times 10^3 \\ &= 157.73 \text{ N} \end{aligned}$$

• Charge de roulements :

Le roulement  $R_{1B}$  reçoit une partie de la charge radiale et toute la partie de la charge axiale. Inversement  $R_{2B}$  est sollicité radialement.





$$\rightarrow R_{1B} : \begin{cases} Y_{44} = 664.72 \text{ N} \\ X_{44} = 2452 \text{ N} \end{cases}$$

$$R_{e1B} = 3.765 \text{ KN}$$

$$\rightarrow R_{2B} : \begin{cases} Y_{33} = 506.99 \text{ N} \\ X_{33} = 0 \end{cases}$$

$$R_{e2B} = .50699 \text{ KN}$$

• Charges dynamiques des roulements :

$$N = 20 \text{ rpm}$$

$$H_r = 60000 \text{ h}$$

$$C = R_e \left( \frac{20 \times 60000}{60 \times 33.33} \right)^{1/3}$$

$$\rightarrow C_{1B} = 33.75 \text{ KN}$$

$$C_{2B} = 4.54 \text{ KN}$$

• Choix de roulements :

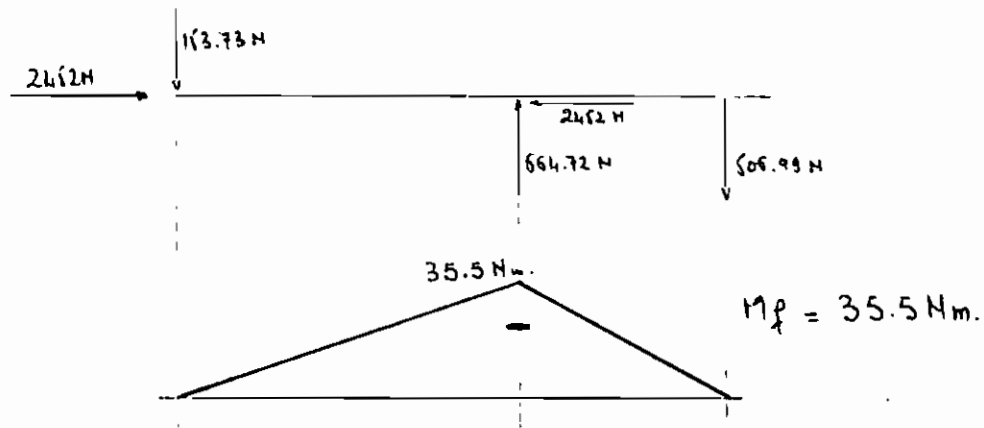
- Roulement  $R_{1B}$  :

$$\text{Serie 02} : C = 73.840 \text{ KN}, \phi_{in} = 90 \text{ mm}$$

- Roulement  $R_{2B}$  :

$$\text{Serie 02} : C = 55.60 \text{ KN}, \phi_{in} = 80 \text{ mm}$$

• Moments fléchissants - section critique :



Section critique :  $\bar{x} \frac{90^2}{4} = 6361.726 \text{ mm}^2$

effort tranchant à la s.c.  $V = 506.99 \text{ N}$

• Contraintes induites :

- Le moment fléchissant induit des contraintes aller :

ner :

$$\sigma_{xa} = \frac{32}{\pi \cdot 0.09^3} \times 35.5 = .496 \text{ MPa}$$

- L'effort tranchant induit un cisaillement constant :

$$\tau_{xym} = \frac{506.99}{6361.726} = .080 \text{ MPa}$$

- La force axiale induit une compression constante :

$$\sigma_{xm} = \frac{2452}{6361.726} = .39 \text{ MPa}$$

• Contrainte de VON MISES.

$$\sigma'_a = .496 \text{ MPa.}$$

$$\sigma'_m = .410 \text{ MPa.}$$

• Limite ultime de rupture requise  $S_u$ :

Pour un facteur de sécurité  $n = 10$ , la limite d'endurance étant:

$$S_e = .0856 S_u$$

$$\frac{1}{10} = \frac{.410}{S_u} + \frac{.496}{.0856 S_u}$$

$$\rightarrow S_u = 62 \text{ MPa.}$$

• Choix du matériau:

Acier rapide XC 10.S

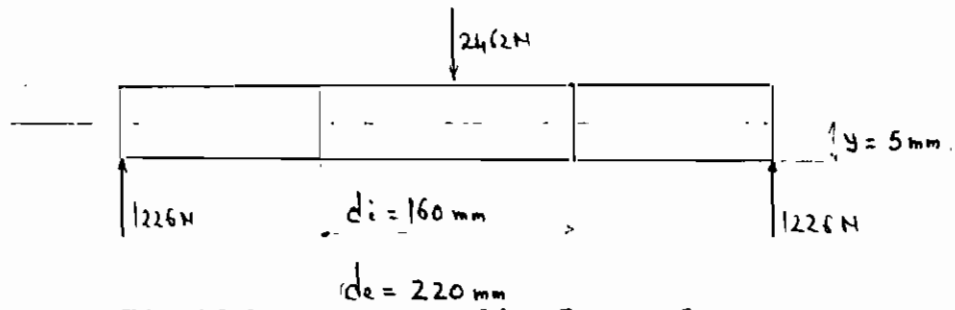
$$S_u = 330 \text{ MPa}$$

$$S_y = 210 \text{ MPa}$$

$$S_e = 28.25 \text{ MPa}$$

## 2.7 Cuvette :

- Contraintes normales induites (Poids du système)



Le moment de flexion est  $M_f = 134.86 \text{ Nm}$ .

La contrainte induite est  $\sigma = \frac{M_f y}{I}$

$$I = \frac{\pi}{64} (220^4 - 160^4) = 8.285 \times 10^{-5} \text{ m}^4$$

$$\rightarrow \sigma = \frac{134.86 \times 5 \times 10^{-3}}{8.285 \times 10^{-5}} = 8139 \text{ Pa} = 8.139 \times 10^{-3} \text{ MPa}$$

La contrainte que subit l'élément est très faible par conséquent, le problème de la sécurité ne devrait pas se poser.

• Matériau :

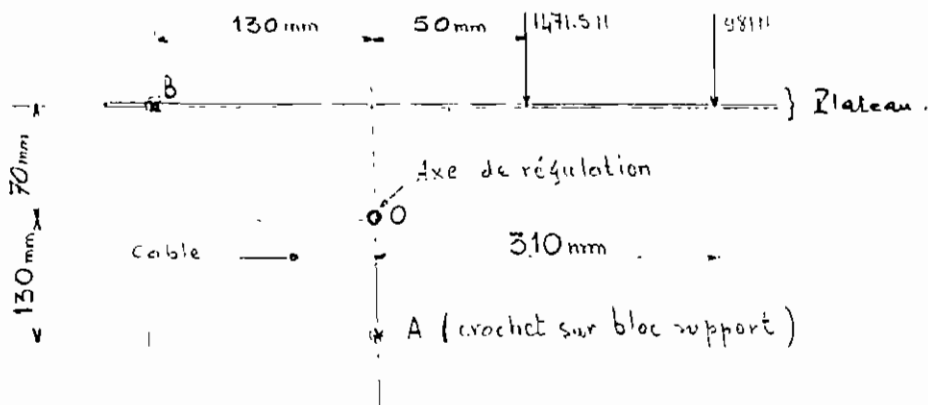
Acier de qualité courante C 10-S

$$S_u = 330 \text{ MPa}$$

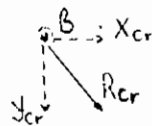
$$S_y = 210 \text{ MPa}$$

## 2.8. Cables de retenue :

Les cables de retenue sont des éléments flexibles qui doivent servir à la compensation des moments causés par le poids de la machine ; ils servent à l'équilibre de la portion du système. Ces cables sont accrochés au plateau et au bloc support, ils sont au nombre de deux. Pour le choisir, nous étudierons la sollicitation dont ils font objet.



- Au point B la réaction au fait du cable cree le moment nécessaire à l'équilibre :



$$X_{cr} = .707 R_{cr}$$

$$Y_{cr} = .707 R_{cr}$$

$$\overset{(+\curvearrowright)}{\sum} M_0 = 0 = 1471.5 \times 50 + 981 \times 310 + 2 \times .707 \times R_{cr} \times 70 - 2 \times .707 R_{cr} \times 130$$

→ la force dans chaque cable est :

$$R_{cr} = 4452 \text{ N}$$

• Pour un câble de diamètre 6 mm, la contrainte de tension induite est :

$$\sigma_{tc} = \frac{4452 \times 4}{\pi \times 36} = 157.5 \text{ MPa}$$

• Pour un facteur de sécurité de 2 par rapport à la limite d'écoulement, nous avons :

$$S_y = 2 \times \sigma_{tc} = 315 \text{ MPa}.$$

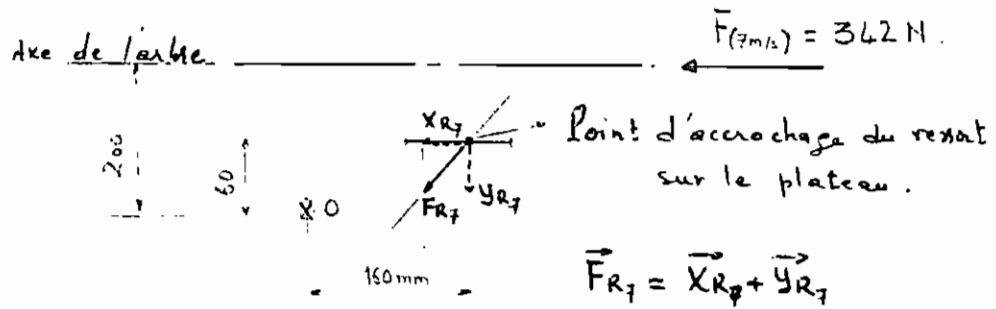
• Pour être en accord avec nos exigences, nous prendrons nos câbles en :

$$\begin{aligned} \text{XC 32} & \text{ avec } S_y = 320 \text{ MPa} \\ S_u & = 560 \text{ MPa} \end{aligned}$$

## 2.9. Ressorts :

Ils sont au nombre de deux (2), ils servent à la régulation du système. Notre objectif est d'en déterminer les caractéristiques physiques et mécaniques.

• A priori, notons que la vitesse normale de notre système se situe au vent de 7 m/s. Aussi, à cette vitesse de vent, nos ressorts devraient opposer une résistance de façon à compenser les moments créés par la force de BETZ à l'axe de régulation.



La force développée dans le ressort est telle qu'aucun moment n'existe au tour de O : ( $X_{R7} = Y_{R7} = .707 F_{R7}$ )

$$\sum M_O = 0 = 342 \times 200 + 2 F_{R7} \times .707 \times 60 - 2 F_{R7} \times .707 \times 160$$

$$\rightarrow F_{R7} = 484 \text{ N}$$

La longueur du ressort est alors :  $l_{(7m/s)} = 110 \text{ mm}$ .

• Sous une seconde approche, nous considérons qu'à la vitesse de 20 m/s, notre système devrait se mettre à l'arrêt pour fuier à d'éventuelles vibrations et au dépassement de la limite de l'alternateur ou dynamos : Orsin, l'effort de vent ainsi développé sur l'hélice devrait faire s'allonger le ressort tel que sa longueur finale soient

$$l_{(20)} = 240 \text{ mm}.$$

À 20 m/s de vitesse du vent :

$$\text{La force sur l'hélice} = F_{(20)} = 2792.5 \text{ N}$$

$$\text{La force des deux ressorts} = 2 F_{R20} = 4188.75 \text{ N}$$

- Nous obtenons ainsi une caractéristique des ressorts : la raideur

$$\text{avec } \Delta l_{(20/7)} = 240 - 110 = 130 \text{ mm}$$

$$\Delta F_{R(20/7)} = (2094.37 \text{ N}) - 484 = 1610.37 \text{ N}$$

$$\text{la raideur } K = \frac{2094.37 - 484}{.130} = 12.4 \text{ kN/m}$$

- Nous pouvons maintenant déterminer la longueur  $\tilde{l}_0$  vide de nos ressorts :

- l'allongement causé à  $v = 7 \text{ m/s}$  :

$$\Delta l_{(0/7)} = \frac{484 \times 10^3}{12.4} = .039 \text{ m} = 39 \text{ mm}$$

- longueur  $\tilde{l}_0$  vide :

$$l_0 = 110 - 39 = 71 \text{ mm}$$

- Pour un ressort dont les dimensions sont :

$$D = 20 \text{ mm}$$

$$d = 6 \text{ mm}, \quad l_0 = 71 \text{ mm} \text{ avec au moins } 11 \text{ spires.}$$

l'effort  $F_{R20} = 2094.37 \text{ N}$  induit un cisaillement et des contraintes de flexion au crochet :

$$\tau = \frac{4 F_{R20}}{\pi d^3} (2D + d) = \frac{4 \times 2094.37 (46)}{\pi \times 6 \times 6 \times 6} = 568 \text{ MPa}$$

$$\sigma = 1.1 \cdot \frac{16 F d}{\pi d^3} + \frac{4 F}{\pi d^2} = 1160 \text{ MPa}$$



- Pour que les ressorts résistent à la fatigue, on doit avoir

$$\tau \leq S_{sy}$$

Donc, nos ressorts devraient avoir les caractéristiques suivantes :

lesquelles :

- limite d'écoulement en cisaillement  $S_{sy} \geq 568 \text{ MPa}$
- limite d'écoulement en tension  $S_y \geq 984.4 \text{ MPa}$
- limite ultime de rupture en tension  $S_{ut} \geq 1312.5 \text{ MPa}$

- Nous choisissons donc pour matériau constituant les ressorts :

- Fil à piano :  $S_{ut} = 1671 \text{ MPa}$

$$S_y = 1252.88 \text{ MPa}$$

$$S_{sy} = 723 \text{ MPa}$$

pour un facteur de sécurité :

$$n = \left( \frac{568}{723} \right)^{-1} = 1.27$$

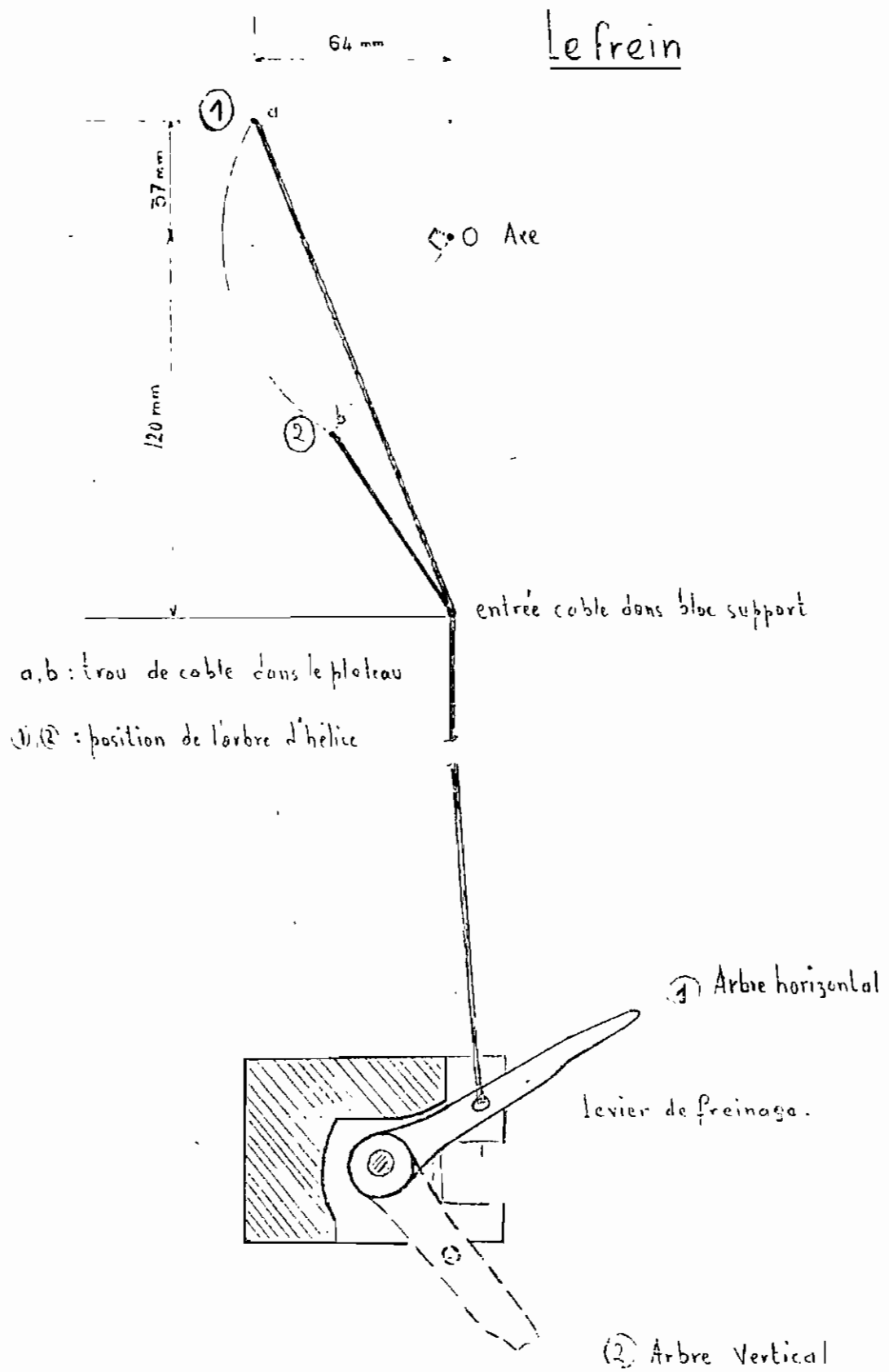
## 2.10 - Le frein :

### 2.10-1 Le câble de frein :

$$d = 6 \text{ mm} \quad ; \quad l = 15 \text{ m}$$

- Sollicitation en traction :  $\sigma = 294 \text{ MPa}$

- Matériau : fil souple  $S_y = 400 \text{ MPa}$



## 2.10-2 : Axe de manivelle :

### • Sollicitations :

- Cisaillement :  $\tau = 15 \text{ MPa}$

- Flexion :  $\sigma = 60 \text{ MPa}$

• Facteur de sécurité  $n = 3.33$  en flexion.

### • Matériau choisi :

C 10 :  $S_{ut} = 330 \text{ MPa}$

$S_y = 210 \text{ MPa}$

## 2.10-3 : Manivelle

### • Sollicitations au point d'accrochage du câble de frein :

- Cisaillement dû à l'effort tranchant :

$$\tau_{\text{max}} = 106.36 \text{ MPa}$$

• Facteur de sécurité  $n = 1.5$  en cisaillement

### • Matériau choisi :

C 35 :  $S_y = 320 \text{ MPa}$

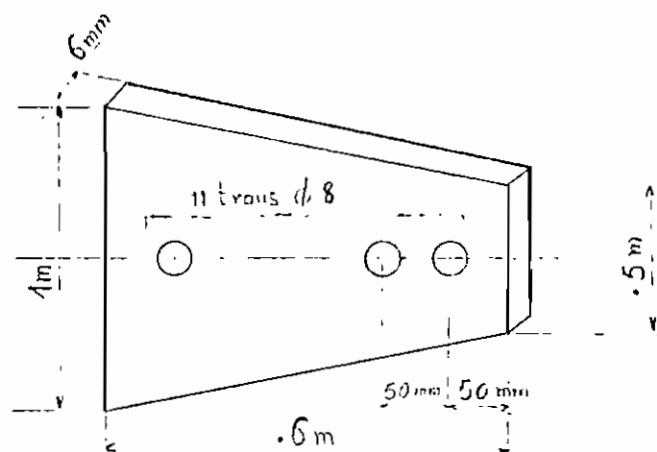
## 2.11 . L'empennage

Il s'agit de l'élément où s'applique la force du vent. quand il y a changement de sa direction; l'empennage, fixé au bloc support, par l'effort qui lui est appliqué, crée le moment qui met l'hélice dans le lit du vent.

Selon les renseignements tirés de la référence que nous avons utilisée, notre élément doit avoir une surface  $S$  :

$$S = .16 \times \pi \times 4 \times \frac{310}{650} = .96 \text{ m}^2$$

Nous décidons de prendre comme matériau constitutif du bois et de l'acier.  
- Contre plaque dont la forme et la dimension suivent.



- de l'acier pour la fixation de la poulie au bloc support : profilé en L. (Voir figure)

## 2.12 : La génératrice :

. Pour la puissance susceptible d'être recueillie, nous utiliserons une dynamo (de voiture éventuellement) dont les caractéristiques seraient :

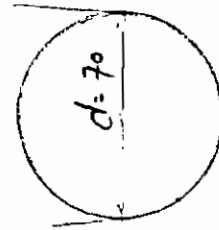
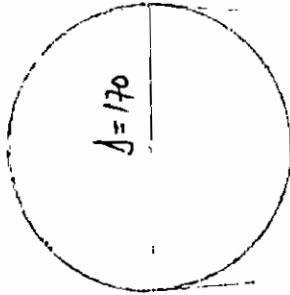
- Puissance nominale 500 W
- Intervalle de vitesses efficaces : 300 @ 750 rpm.
- Tension de sortie 12 Volts

. La génératrice servirait à recharger des batteries de 12V (une à la fois) et comporterait un régulateur de tension

## 2.13 : Poulies et Courroie :

. Nous utilisons pour la transmission de la puissance deux poulies en fonte et une courroie trapézoïdale. L'utilisation de ce mode de transmission est simplement justifiée par le fait que la puissance tirée de la machine n'est pas très importante et que dans ce cas, la courroie est largement suffisante :

Caractéristiques :



$$S = 1.68 = 255 \text{ mm}$$

- Vitesse de la courroie :  $v = \bar{n} \times r_0 \times \frac{500}{60 \times 10^3} = 1.83 \text{ m/s}$

- Puissance transmissible : 634 W

Courroie 13x8

- Longueur développée de la courroie :

$$L = 2S + \frac{\pi}{2}(D+d) + \frac{(D-d)^2}{4S}$$

$$= 2 \times 255 + \frac{\pi}{2}(170+70) + \frac{(170-70)^2}{4 \times 255} = 896.8 \text{ mm}$$

CONCLUSION

Nous pouvons, après cette étude, dire que notre objectif est atteint pour l'essentiel; avec nos relations qui ont permis une orientation de l'étude (Annexe B)

• Enfin, nous avons pu avec l'expérience de BABAK, PEYKOU et FANSENE et avec la théorie sur l'énergie eolienne, estimer la puissance de notre machine (1.597KW) et décider de procéder à l'essai avec l'hélice de "broussard" accouplée à une petite dynamo pour charger une batterie 12V. Nous avons noté que cette étape n'est un essai; il est prévu une utilisation plus importante de cette puissance recueillie.

• Dans le sens de notre montage, nous signifions simplement que nous l'avons élaboré en vue qu'il soit accessible et facilement compréhensible à toute personne qui serait appelée à l'entretenir: Les éléments que nous avons proposés se relient facilement avec les machines outils dont dispose l'EPT. L'entretien n'est pas très difficile puisque n'est constitué que de deux éléments:

- Vérification des éléments du système: roulements, dynamo
- Lubrification (hebdomadaire) des roulements et de l'axe de régulation.

• Enfin, nous souhaitons que l'étude du socle soit réalisée et que, s'il est possible, de conduire un projet pour l'an prochain sur le sujet: "Programmes AERO en BASIC avec application sur une hélice d'avion de type broussard".

Il s'agit de traduire les programmes en Annexe C (FORTRAN)



au langage Basic et de mesurer les caractéristiques de l'édifice de 'broussard' que l'on intégrera pour obtenir les coefficients de traînée, de moment, de portance et de puissance d'une telle configuration de fêle.

Pour terminer, nous exprimons le souhait d'évaluer le coût du montage de vos propositions (par principe, nous avons choisi notre système avec les matériaux le plus abordables...)

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] : Energie eolienne : Théorie, conception et calcul  
pratique des installations  
par Désiré LE GOURIERES -  
Editions EYROLLES 1980
- [2] : LES EOLIENNES : vue d'ensemble de leur utilisation  
par Energie et Ressources du Québec
- [3] Les eoliennes à l'EPT : Présentation au colloque  
du 20 Mars 1976 sur les différentes sources d'énergie  
au Sénégal  
par FRANÇOIS HOUMAIRE, technicien.
- [4] Metric structural steel design data  
- Canadian Institute of steel construction, 1979.  
pages 1.49, 3.17, 3.18, 3.19.
- [5] Supplement n° 4 : Code Canadien du  
Bâtiment 1977

[6] : CAN S.16.1M78 par C.M.R du Canada

[7] : Quelques analyses des mesures de vitesse du vent à thies ; effectuées à l'aide d'un anémomètre à coupelles :

Projet de fin d'Etudes de Mr René HDOUR  
1978.

[8] : Structures 411 : Notes de cours de Mr Roger Lupien  
EPT :

Chapitres 1, 2, 3.

[9] Mecanical Engineering Design par J.E. Shigley  
McGraw Hill book Company. 1972

[10] Engineering Design : Stephenson & Calander  
John Wiley & Sons 1974

[11] Organes de machines par G. Broin, R. Doré, R. Gauvin  
M. Poupart, P. Thiry & H. Yelle.  
Ecole Polytechnique de Montréal

[12] Dessin Industriel : Jensen - McGraw Hill Edition 1972

# ANNEXES

A : vitesse moyennée du vent

B : Information sur la col.

C : Programmes de calcul en FORTRAN.

D : dessins.

## Vitesse moyenne journalières en m/s (1977)

Jour	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février
1	-	3,44	1,29	1,72	2,37	3,44	3,87	3,87
2	-	2,80	2,15	1,72	2,58	3,44	3,01	3,01
3	-	3,87	1,72	2,15	3,01	3,01	6,02	3,41
4	3,23	3,44	1,72	2,15	2,37	3,87	5,59	3,01
5	1,51	2,58	1,72	2,58	1,29	3,41	6,45	2,58
6	2,15	2,58	2,15	2,15	-	3,01	5,16	3,01
7	2,58	2,37	2,15	3,44	2,58	3,41	5,16	3,41
8	1,72	2,37	1,72	3,01	2,58	4,30	4,73	3,41
9	3,23	2,80	1,72	2,37	2,58	3,01	4,73	2,58
10	3,66	2,80	1,29	2,58	2,15	3,01	4,73	3,41
11	2,80	3,23	1,72	3,01	2,15	3,41	6,02	4,30

12	3,01	2,80	1,72	2,15	3,01	4,73	3,41	3,87
13	3,44	3,01	1,51	2,58	3,01	5,16	3,41	3,87
14	3,66	3,23	1,72	2,58	3,44	3,87	-	3,41
15	2,37	2,37	1,94	1,72	3,44	4,30	4,30	3,41
16	2,58	1,94	2,15	2,15	3,23	2,58	5,16	
17	3,01	2,58	1,94	2,15	3,01	3,87	5,16	
18	2,15	1,51	1,51	1,94	3,01	3,87	4,30	
19	2,15	3,01	2,58	3,01	3,01	3,01	3,41	
20	-	1,72	1,29	3,44	3,44	2,58	4,30	
21	-	2,37	2,15	2,80	3,44	2,15	5,16	
22	3,87	3,01	1,72	2,58	2,58	2,15	4,73	
23	3,87	2,37	2,15	2,15	3,44	3,87	5,16	
24	3,23	2,58	1,72	3,01	3,44	3,01	4,30	
25	1,72	3,87	1,72	3,87	3,44	2,58	3,41	

26	1,72	4,52	3,01	4,30	2,58	2,58	3,01
27	—	2,58	1,94	3,01	2,15	3,01	3,41
28	—	3,87	1,72	2,58	2,15	2,58	3,87
29	3,44	2,58	2,15	4,30	3,01	2,15	4,30
30	3,23	2,58	2,15	3,44	8,44	2,15	5,16
31	3,66	3,23	—	2,15	—	2,58	4,73

A4

THIEB

Vitesse  
du vent  
m/s

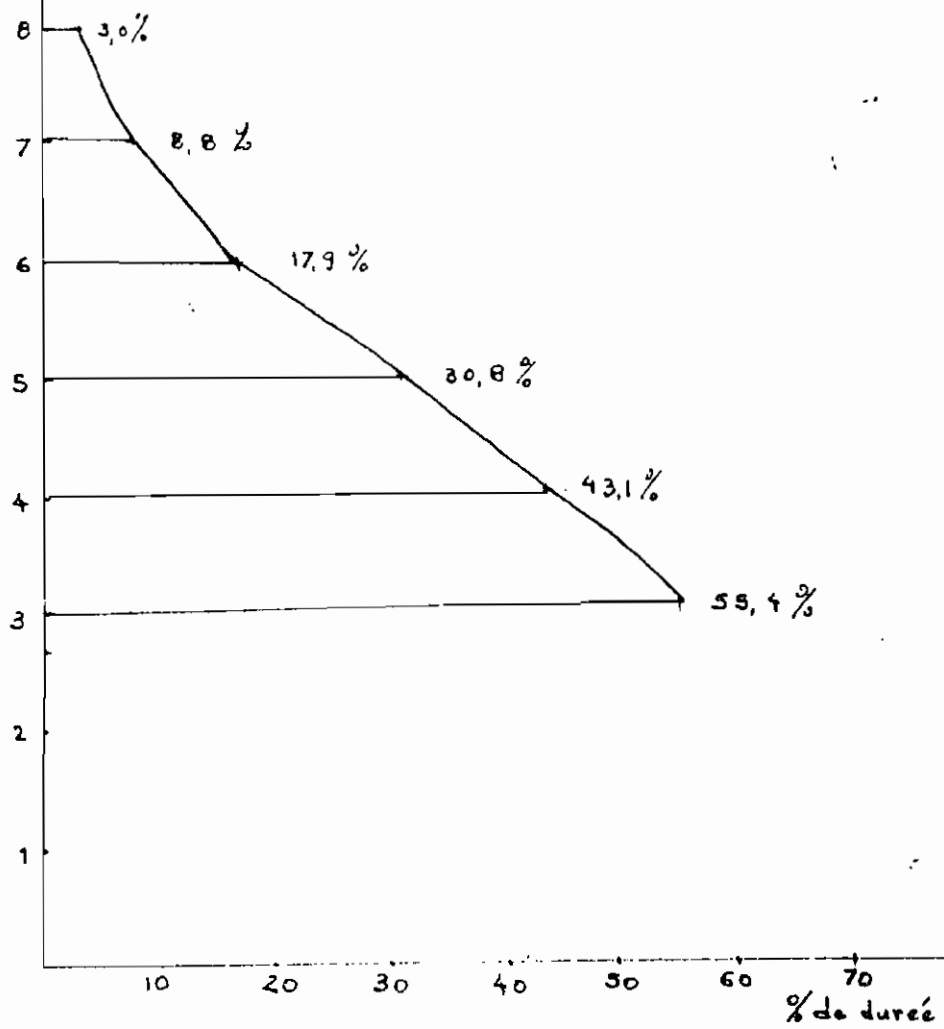


Fig. C-10

Courbe vitesse-durée des stations du service  
météorologique (Ref. 2)



## Annexe B

### Energie éolienne

L'éolienne présente un rendement maximal pour :

$$\lambda_0 = \frac{\pi DN}{60V} = 6,$$

ce qui correspond à une vitesse de rotation  $N = 115 \frac{V}{D}$  et à une valeur de  $C_p$  égale à 0,4.

D'après les tests effectués, la puissance maximale de l'éolienne étudiée et des éoliennes similaires peut être obtenue en appliquant la relation :

$$P = 0,20 D^2 V^3$$

P étant exprimé en watts D et V en mètres et m/s.

C'est cette expression que l'on utilise en pratique pour déterminer, en première approximation, la puissance maximale susceptible d'être fournie par les éoliennes rapides qu'elles soient à 2, 3 ou 4 pales.

En appliquant les relations précédentes à des machines de diamètre compris entre 2 et 30 m, on obtient les résultats rassemblés dans le tableau 6 pour des vents de 7 et 10 m/s.

TABLEAU 6

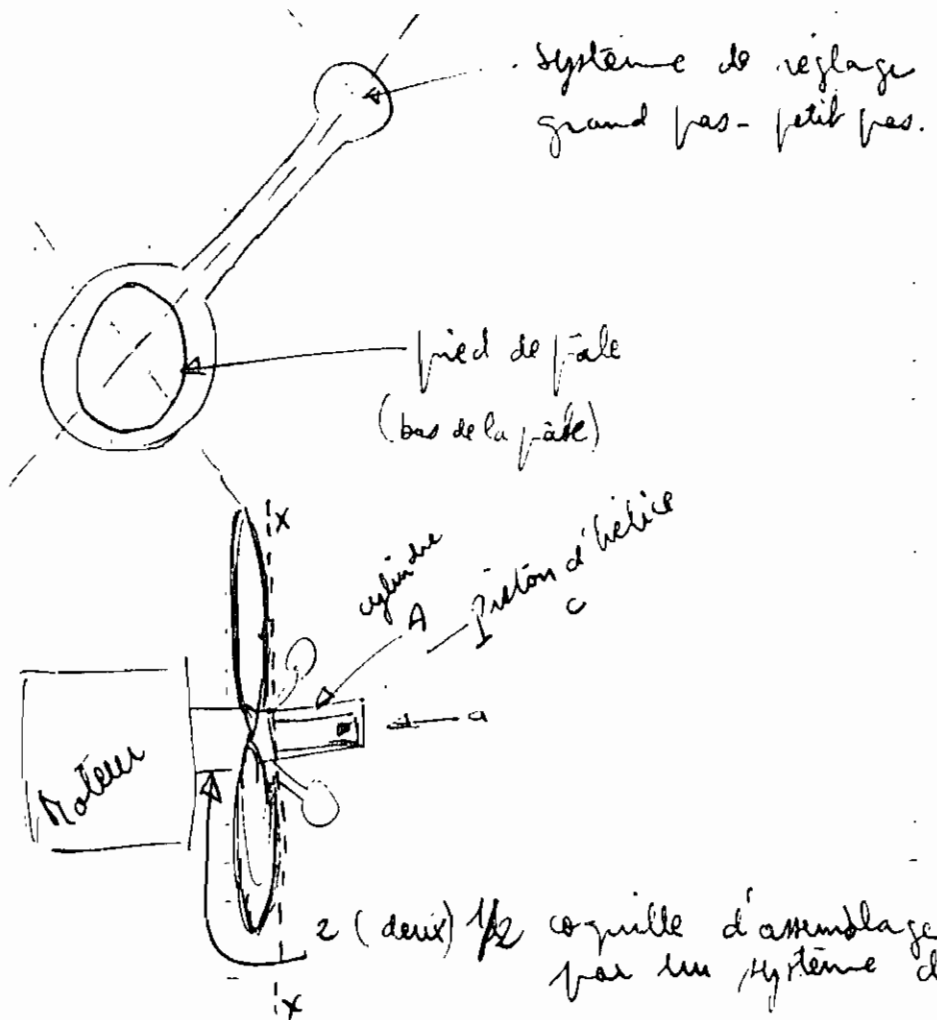
D en m	Vitesse de rotation en t/min		$P_{max}$ en kW	
	V = 7 m/s	V = 10 m/s	V = 7 m/s	V = 10 m/s
1	935	1 340	0,07	0,2
2	470	670	0,27	0,8
3	310	450	0,60	1,8
4	235	335	1,07	3,2
5	190	270	1,7	5
6	155	220	2,4	7,2
8	120	168	4,4	12,8
10	95	134	6,7	20
15	62	90	15	45
20	47	67	26,8	80
30	31	45	60	180
40	23	33	107	320
50	19	27	168	500

### Helice.

Au moment où j'étais à Paris, je suis qui en principe devait t'apporter les renseignements et déjà parti de Jakarta. Il te faudra donc attendre la semaine prochaine ou alors une occasion.

Je n'ai pas eu la chance de retrouver le T.C.I. (livre) qui parle de l'hélice, je me suis alors adressé aux spécialistes.

Les deux pièces dont tu parlais constituent un ensemble de contre-poids et servent aussi au changement de pas.



Poids de l'hélice
environ 100 kg
la pale = 40 kg
environ

Pour déviter l'ensemble, il faut ouvrir (a) en  
enlevant au préalable le frein. Lorsque (a) ouvert, il faut  
une clé spéciale pour déviter le piston d'hélice (c)

devient l'ensemble (A), enlever une rondelle frein retenue par  
goupille et un circlip à l'intérieur de (a).

Faire faire  $1/2$  de tour à chaque pôle dans le sens démontage  
(inverse sens de marche des aiguilles d'un montre) et l'ensemble  
est dissocié.

Au cours du démontage, tu trouveras des bouts de joints en  
caoutchouc qu'il faut simplement enlever avec un fin tournevis. Tu fais comme  
pour le frein, tu n'as pas besoin de changement de pas, l'ensemble des  
pièces servant à fixer les pôles et le moyeu te suffira.

Il faut dire que j'ai vu au garage de l'E.P.T. si par hasard l'équipe  
de mécaniques qui était allée assembler le Broussard a laissé des clés spéciales,  
le cas échéant, m'en informer pour que j'en cherche ici (si tu as amez  
de muscles, tu peux toujours essayer dans le sens (x), la partie avant me te  
servant à rien, mais ce sera très difficile).

## PROGRAMME AERO

```

C  CALCUL EOLIENNE PROFIL NACA 23015
DIMENSION CZ(40),CX(40),PR(10),RR(10),EL(10),T(10),
PI(10),GI(40),ALFA(10),PIP(40),C(20),AL(10,40),
IAF(10,40),AF1(10,40),AM(10,40),AM1(10,40)
PPI = 3.141593
CO = 180. / PPI
GR = 5.
PAL = 3.
ALO = 7.
CTE = 8. * PPI / PAL
DO 2 I = 1, 10
  AI = I
  RR(I) = 0.1 * AI
  PR(I) = RR(I) * GR
  ALS = 1. / SQRT(1. + (ALO * RR(I)) ** 2)
  TETA = PPI / 3. * (ATAN(((1. - ALS * ALS) ** 0.5) / ALS)) / 3.
  AK = (COS(TETA)) / ALS
  AH = SQRT(1. + (1. - AK ** 2) / ((ALO * RR(I)) ** 2))
  ALER = ALO * RR(I) * (1. * AH) / (1. * AK)
  T(I) = 1. / ALER
  GIR = ATAN(T(I))
  GI(I) = GIR * CO
  PI(I) = -0.75 * AI + 12.75
  ALFA(I) = GI(I) - PI(I)
  CZ(I) = 0.1 + 0.11 * PI(I)
  IF (PI(I) - 10. ) 16, 16, 17
  CZ(I) = 1.5 - 0.0188 * (PI(I) - 14. ) ** 2
16  EL(I) = CTE * PR(I) * (1. - AK) / ((1. * AK) * ALER * SQRT(ALER ** 2 + 1. ) * CZ(I))
  2  WRITE(3,3) I, ALFA(I), PR(I), RR(I), GI(I), PI(I), CZ(I), EL(I)
  3  FORMAT(2X, I2, 10F7.3)
C  DETERMINATION DES CARACTERISTIQUES
DO 6 I = 1, 10
  DO 6 J = 1, 40
    L = 40 - J + 1
    BL = L
    CT = BL * RR(I)
    GIR = ATAN(1. / CT)
    GI(J) = GIR * CO
    PIP(J) = GI(J) - ALFA(I)
    IF (PIP(J) - 10. ) 4, 4, 2
  4  CZ(J) = 0.1 + 0.11 * PIP(J)
    CX(J) = 0.007 + 0.0055 * (CZ(J) - 0.2) ** 2
    GO TO 9
  5  IF (PIP(J) - 19. ) 20, 20, 21
  20  CZ(J) = 1.5 - 0.0188 * (PIP(J) - 14. ) ** 2
    CX(J) = 0.0125 + 0.16 * (CZ(J) - 1.2) ** 2
    GO TO 9
  21  CZ(J) = 1.
    CX(J) = 0.0125 + 0.16 * (CZ(J) - 1.2) ** 2
  9  TGEPS = CX(J) / CZ(J)
    G = CZ(J) * PAL * EL(I) * (CT + TGEPS) * SQRT(1 + CT ** 2) / (8. * PPI * PR(I))
    AK = (L - G) / (1. * G)
    E = CZ(J) * PAL * EL(I) * (1 / CT - TGEPS) * SQRT(1 + CT ** 2) / (8. * PPI * PR(I))
    AH = (1. + E) / (1. - E)
    AL(I, J) = (1. * AK) * CT / (RR(I) * (1. * AH))
    AF(I, J) = (1. - AK ** 2) * RR(I)
    AM(I, J) = RR(I) * RR(I) * ((1. * AK) ** 2) * E * CT

```

## Suite AERO

```

IF ((AL (1, J)) * (AL (1, J) - 30.)) 19, 6, 6
19 WRITE (3, 7) I, J, PIP (J), GI (J), AK, AL (1, J), AM (1, J), G, E, AH, AF (1, J),
  1 CZ (J), TGEPS, CT, PR (1), EL (1)
6 CONTINUE
7 FORMAT (2X, 12, 2X, 12, 2X, 8F10.5, /, 2X, 8F9.4)
DO 15 I = 1, 10
DO 15 N = 1, 20
  AF1 (I, N) = 0.
15 AM1 (I, N) = 0.
DO 8 I = 1, 10
DO 8 J = 1, 39
  IF ((AL (I, J)) * (AL (I, J) - 21.)) 18, 8, 8
18 N = AL (I, J)
  N1 = AL (I, J + 1)
  IF (N - N1) 8, 8, 10
10 AM1 (I, N) = AM (I, J) + (AM (I, J + 1) - AM (I, J)) *
  1 (N - AL (I, J)) / (AL (I, J + 1) - AL (I, J))
  AF1 (I, N) = AF (I, J) + (AF (I, J + 1) - AF (I, J)) *
  1 (N - AL (I, J)) / (AL (I, J + 1) - AL (I, J))
  WRITE (3, 14) I, N, AM1 (I, N), AF1 (I, N)
14 FORMAT (214, 2F10.5)
  N = N - 1
  IF (N - N1) 8, 8, 10
8 CONTINUE
DO 12 N = 1, 20
  CF = AF1 (1, N) * (RR (2) - RR (1)) + AF1 (10, N) * (1. - RR (9))
  C (N) = AM1 (1, N) * (RR (2) - RR (1)) + AM1 (10, N) * (1. - RR (9))
DO 13 I = 2, 9
  CF = CF * AF1 (I, N) * (RR (I + 1) - RR (I - 1))
  C (N) = C (N) * AM1 (I, N) * (RR (I + 1) - RR (I - 1))
13 CONTINUE
  ALO = N
  ETAP = (1. - 0.93 / (PAL * SQRT (ALO ** 2 + 0.445))) ** 2
  CM = C (N) * ETAP
  CP = ALO * CM
12 WRITE (3, 11) ALO, CF, CM, CP
11 FORMAT ( 2X, 4F10.5)
STOP
END

```

## PROGRAMME EOLE

```

C  CALCUL EOLIENNE PROFIL NACA 23015
DIMENSION T (10), CZ (40), CX (40), PR (10), X (10), Y (10), AF (10, 40),
IRR (10), PI (10), GI (40), EL (10), ELI (10), TALFA (10), AF1 (10, 40),
IPIP (40), AM (10, 40), AM1 (10, 40), AL (10, 40), ALFA (10), C (20)
GR = 5.
ALO = 7.
PAL = 3
PPI = 3.141593
CO = 180. / PPI
CTE = 8. * PPI / PAL
I1 = 2
I2 = 5
I3 = 9
DO 2 I=1, 10
AI = I
RR(I) = 0.1 * AI
PR(I) = 0.1 * AI * GR
ALS = 1. / SQRT (1. + (ALO * RR(I)) ** 2)
TETA = PPI / 3. * (ATAN ( ((1. - ALS * ALS) ** 0.5) / ALS )) / 3.
AK = (COS (TETA)) / ALS
AH = SQRT (1. + (1. - AK ** 2) / ((ALO * RR(I)) ** 2)
ALER = ALO * RR(I) * (1. + AH) / (1. + AK)
T(I) = 1. / ALER
GIR = ATAN (T(I))
GI(I) = GIR * CO
PI(I) = -0.75 * AI + 12.75
ALFA(I) = GI(I) - PI(I)
ALFAR = ALFA(I) / CO
IF (PI(I) - 10.) 6, 6, 7
6 CZ(I) = 0.1 + 0.11 * PI(I)
GO TO 8
7 CZ(I) = 1.5 - 0.0188 * (PI(I) - 14.) ** 2
8 EL(I) = CTE * PR(I) * (1. - AK) / ((1. + AK) * ALER * SQRT (ALER ** 2 + 1.) * CZ(I))
X(I) = EL(I) * COS (ALFAR)
Y(I) = EL(I) * SIN (ALFAR)
2 WRITE (3, 5) I, GI(I), ALFA(I), PI(I), EL(I), PR(I), X(I), Y(I)
5 FORMAT (2X, I2, 2X, 9F7.3)
DO 9 I=1, 10
IF (I - 12) 10, 10, 11
10 X(I) = X(I1) + (X(I2) - X(I1)) * (PR(I) - PR(I1)) / (PR(I2) - PR(I1))
Y(I) = Y(I1) + (Y(I2) - Y(I1)) * (PR(I) - PR(I1)) / (PR(I2) - PR(I1))
GO TO 12
11 X(I) = X(I2) + (X(I3) - X(I2)) * (PR(I) - PR(I2)) / (PR(I3) - PR(I2))
Y(I) = Y(I2) + (Y(I3) - Y(I2)) * (PR(I) - PR(I2)) / (PR(I3) - PR(I2))
TALFA(I) = Y(I) / X(I)
ALFAR = ATAN (TALFA(I))
ALFA(I) = ALFAR * CO
PI(I) = GI(I) - ALFA(I)
12 ELI(I) = SQRT (X(I) ** 2 + Y(I) ** 2)
9 WRITE (3, 5) I, GI(I), ALFA(I), PI(I), CZ(I), PR(I), EL(I), X(I), Y(I), ELI(I)
C  DETERMINATION DES CARACTERISTIQUES
DO 13 I=1, 10
DO 13 J=1, 40
L=40 - J + 1

```

## Suite E OLE

```

BL=L
CT=BL*RR(1)
GIR=ATAN(1./CT)
GI(J)=GIR*CO
PIP(J)=GI(J)-ALFA(1)
IF(PIP(J)-10.)14,14,15
14 CZ(J)=0.1*0.11*PIP(J)
CX(J)=0.007*0.0055*(CZ(J)-0.2)**2
GO TO 16
15 IF(PIP(J)-19.)26,27,27
26 CZ(J)=1.5-0.0188*(PIP(J)-14.)*2
CX(J)=0.0125*0.16*(CZ(J)-1.2)**2
GO TO 16
27 CZ(J)=1.
CX(J)=0.0125*0.16*(CZ(J)-1.2)**2
16 TGEPS=CX(J)/CZ(J)
G=CZ(J)*PAL*EL1(1)*(CT+TGEPS)*SQRT(1+CT**2)/(8.*PPI*PR(1))
AK=(1-G)/(1+G)
E=CZ(J)*PAL*EL1(1)*(1./CT-TGEPS)*SQRT(1+CT**2)/(8.*PPI*PR(1))
AH=(1.+E)/(1.-E)
AL(I,J)=(1.+AK)*CT/(RR(1)*(1.+AH))
AF(I,J)=(1.-AK**2)*RR(1)
AM(I,J)=RR(1)*RR(1)*((1.+AK)**2)*E*CT
IF((AL(I,J))*(AL(I,J)-30.))29,13,13
29 WRITE(3,24)I,J,PIP(J),GI(J),AK,AL(I,J),AM(I,J),G,E,AH,AF(I,J),
1 CZ(J),CX(J),TGEPS,CT,PR(1),EL1(1)
13 CONTINUE
24 FORMAT(2X,12,2X,12,2X,9F10.5,/,2X,6F10.5)
DO 28 I=1,10
DO 28 N=1,20
AF1(I,N)=0.
28 AM1(I,N)=0.
DO 17 I=1,10
DO 18 J=1,39
IF((AL(I,J))*(AL(I,J)-21.))30,18,18
30 N=AL(I,J)
N1=AL(I,J+1)
IF(N-N1)18,18,19
19 AF1(I,N)=AF(I,J)*(AF(I,J+1)-AF(I,J))*
1(N-AL(I,J))/(AL(I,J+1)-AL(I,J))
AM1(I,N)=AM(I,J)*(AM(I,J+1)-AM(I,J))*
1(N-AL(I,J))/(AL(I,J+1)-AL(I,J))
WRITE(3,20)I,N,AM1(I,N),AF1(I,N)
20 FORMAT(2I4,2F12.6)
N=N-1
IF(N)17,17,25
25 IF(N-N1)18,18,19
18 CONTINUE
17 CONTINUE
DO 21 N=1,20
CF=AF1(1,N)*(RR(2)-RR(1))+AF1(10,N)*(1-RR(9))
C(N)=AM1(1,N)*(RR(2)-RR(1))+AM1(10,N)*(1-RR(9))
DO 22 I=2,9
CF=CF*AF1(I,N)*(RR(I+1)-RR(I-1))
C(N)=C(N)*AM1(I,N)*(RR(I+1)-RR(I-1))
22 CONTINUE
ALO=N
ETAP=(1.-0.93/(PAL*SQRT(ALO**2*0.445)))*2
CM=C(N)*ETAP
CP=ALO*CM
21 WRITE(3,23)ALO,CF,CM,CP
23 FORMAT(4F10.4)
STOP
END

```