

RÉPUBLIQUE DU SENEGAL

UNIVERSITE CHEIKH ANTA DIOP DE DAKAR

ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE

CENTRE DE THIÈS

*Jm, 0089*



DÉPARTEMENT DU GÉNIE ELECTROMÉCANIQUE



**PROJET DE FIN D'ÉTUDES**

En vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur de conception

Sujet:

**RECONCEPTION  
D'UNE EOLIENNE DE POMPAGE  
POUR LA SOCIETE SELMEG AU SENEGAL**

Réalisé et présenté par:

**M. Saër DIOP**

Sous la direction de :

**M. Fadel NIANG**

Enseignant Ecole Supérieure Polytechnique de Thiès

**M. Samuel GOMES**

Enseignant Université de technologie de Belfort Montbéliard

**Année universitaire 2000/2001**

## **REMERCIEMENTS**

Je tiens à remercier M. Fadel NIANG Enseignant à l'Ecole Supérieure Polytechnique de Thiès et M. Samuel GOMES enseignant à l'Université Technologique de Belfort Montbéliard pour leurs aides et leurs conseils qu'ils nous ont apportés lors de l'étude.

De plus je remercie la société SELMEG, la SSM de Thiès et le GIE VEV de Thiès.

Pour finir nous sommes reconnaissants aux personnes ayant donné quelques heures de leurs temps pour observer nos réflexions<sup>vous</sup> nous donner d'autres pistes de réflexion.

## **DÉDICACES**

Je rends grâce au tout puissant « ALLAH » et je dédie ce modeste travail à :

- ❖ Mes parents
- ❖ Mes frères, sœurs, cousins et cousines.
- ❖ Mes amis

**TABLE DES MATIERES**

REMERCIEMENTS .....	I
DÉDICACES .....	II
TABLE DES MATIERES .....	III
SOMMAIRE .....	VI
INTRODUCTION GENERALE .....	1
METHODES/OUTILS .....	3
1. Comment aborder le projet ? .....	4
1.1 Un groupe de travail multidisciplinaire .....	4
1.2 Organisation du projet .....	5
1.3 L'environnement ACSP .....	6
1.4 Analyse fonctionnelle .....	11
1.4.1 La recherche du besoin fondamental : .....	11
1.4.2 L'analyse fonctionnelle externe : .....	13
1.4.3 L'analyse fonctionnelle interne : .....	14
1.4.4 L'analyse des coûts : .....	14
1.5 Découpage rationnel .....	14
2. Conditions météorologiques et puissances théoriques de l'éolienne .....	16
2.1 Conditions météorologiques .....	16
2.2 Puissances théoriques de l'éolienne .....	16
3. Etude de l'orientation .....	24
3.1 Fonction à réaliser .....	24
3.1.1 Système existant .....	24
3.1.2 Pourquoi orienté l'éolienne .....	24
3.1.3 Modélisation de l'existant .....	24
3.2 Orientation de l'éolienne .....	24
3.2.1 Le gouvernail .....	26
3.2.2 Le support .....	27
3.2.2.1 calcul des efforts externes .....	28
3.2.2.2 Calcul des efforts internes .....	28
3.2.3 Etude de la résistance de notre structure .....	29
3.2.3.1 Résistance à la traction .....	29
3.2.3.2 Résistance à la compression .....	30

3.2.4	Caractéristiques de l'empennage .....	31
3.2.5	Fixation de l'empennage sur la nacelle .....	31
4.	<b>Etude de la régulation</b> .....	31
4.1	<b>Fonction à réaliser</b> .....	33
4.1.1	Système existant .....	33
4.1.2	Fonction principale de la régulation .....	34
4.2	<b>Nouveau système de régulation</b> .....	34
4.2.1	Principe de fonctionnement.....	34
4.2.2	La plaque latérale .....	36
4.2.3	Calcul du ressort.....	37
4.2.3.1	Raideur du ressort .....	39
4.2.3.2	Longueur à vide .....	39
4.2.3.3	Autres caractéristiques du ressort.....	39
5.	<b>Etude de la structure porteuse</b> .....	42
5.1	<b>Treillis actuel</b> .....	42
5.1.1	Dimensions générales .....	42
5.1.2	Conception .....	43
5.2	<b>Reconception du pylône</b> .....	43
5.2.1	Etude de différents autres pylônes .....	43
5.2.2	Le nouveau pylône .....	44
5.3	<b>Détails de calcul de la structure</b> .....	44
5.3.1	Efforts externes .....	45
5.3.1.1	Poids total .....	45
5.3.1.2	Sur l'hélice .....	46
5.3.1.3	Effet du vent sur la structure .....	47
5.3.2	Réactions aux appuis .....	51
5.3.3	Efforts internes .....	51
5.3.4	Facteur de pondération des charges internes: $\alpha_R$ .....	59
5.3.5	Résistance.....	59
5.3.5.1	Résistance à la traction.....	60
5.3.5.2	Résistance à la compression .....	61
5.3.6	Conclusion.....	67
5.3.6.1	Choix des profilés .....	67
5.3.6.2	Le montage des profilés.....	67
6.	<b>Etude du freinage de l'éolienne</b> .....	69

<b>6.1 Fonction à réaliser</b> .....	69
6.1.1 Analyse de l'existant.....	69
<b>6.2 Conception du nouveau frein</b> .....	69
6.2.1 Objectifs .....	69
6.2.2 Principe de fonctionnement.....	69
6.2.3 Dimensionnement du frein.....	70
6.2.3.1 Calcul de la largeur du sabot .....	72
6.2.3.2 Calcul de la force maximale F.....	73
6.2.3.3 Propriétés de masse du frein .....	74
6.2.4 Le frein obtenu .....	75
6.2.5 Le câble de frein.....	76
6.2.6 Calcul de la raideur du ressort de rappel.....	77
6.2.7 La commande du frein.....	78
<b>RESULTATS OBTENUS</b> .....	80
<b>CONCLUSION GENERALE</b> .....	81
<b>BIBLIOGRAPHIE</b> .....	82
<b>ANNEXES</b> .....	83
❖ Généralités sur les dispositifs de régulation et d'orientation. ....	83
❖ Les relevés météorologiques. ....	83
❖ La liasse de plans (CD ROM). ....	83
<b>Généralités sur les dispositifs de régulations et d'orientation</b> .....	84
▪ <b>Dispositifs d'orientation</b> .....	84
○ Empennage .....	84
○ Eolienne auxiliaire .....	86
○ Eolienne auto-orientable.....	87
○ Orientation par servomoteur.....	88
▪ <b>Dispositif de régulation</b> .....	90
○ Régulation à pales fixes : .....	91
▪ Dispositifs à empennage articulé.....	91
▪ Dispositif à empennage fixe et axe de rotation inclinable .....	93
▪ Dispositif à empennage fixe et frein aérodynamique .....	94
▪ Régulateur à pales creuses.....	101

## **SOMMAIRE**

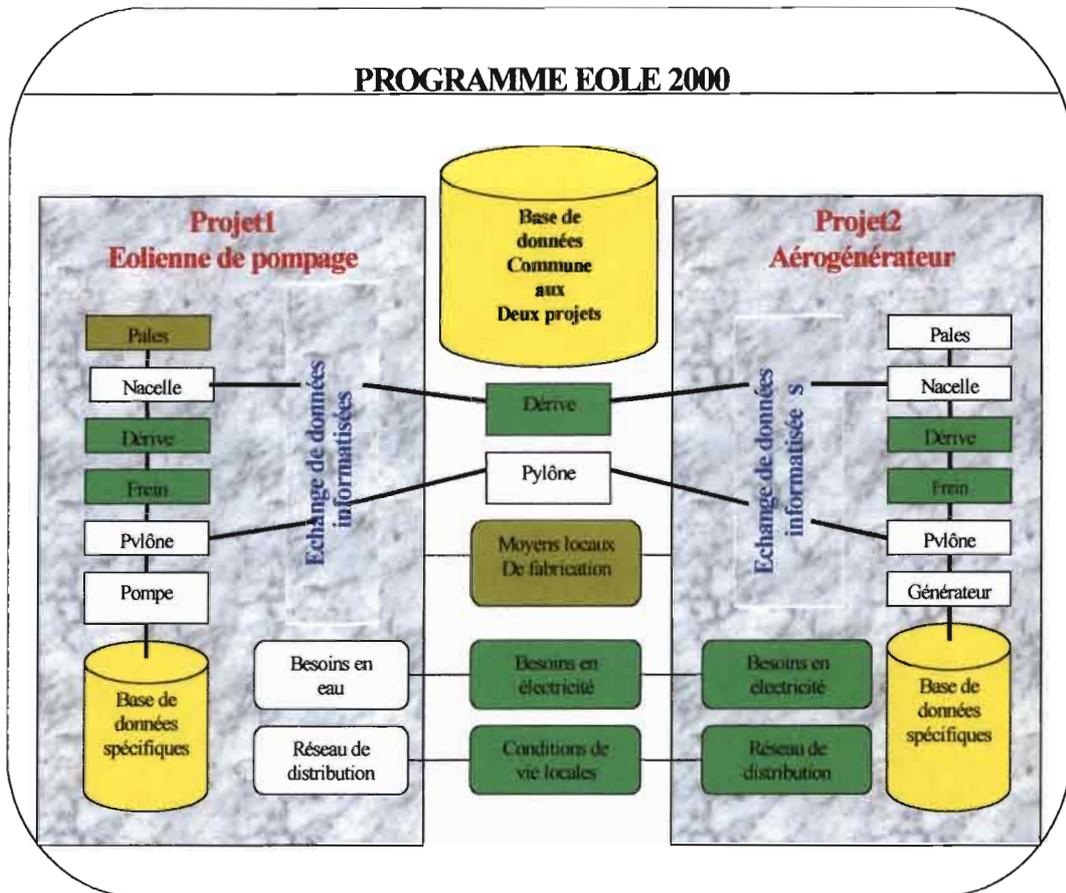
Le projet Eolienne SHADOK a pour but de reconcevoir une éolienne de pompage développée par la société sénégalaise SELMEG. La société SELMEG s'était inspirée des réalisations italiennes en matière d'éolienne pour créer un modèle artisanal qui est destiné à être installé dans les villages.

Actuellement, il a été mis en place une éolienne de pompage. La société SELMEG désire réaliser un dossier précis (Analyse de la Valeur, Procédures, plans...) permettant la réalisation d'éolienne de pompage « en série ». Ces éoliennes devront être fabriquées avec les moyens techniques locaux. Ce dossier servira de référentiel de conception dans le cas de séries et donnera les axes directeurs d'une étude pour un cas particulier.

Pour le groupe d'étudiants, l'objectif était de reprendre une éolienne existante pour la reconcevoir et l'améliorer en effectuant une démarche analyse de la valeur sur les éléments ainsi que des calculs de résistance des matériaux permettant d'optimiser certaines pièces. Le but ultime est de mener un projet de conception en ingénierie simultanée à l'aide des outils de la chaîne XAO intégrée et de l'atelier coopératif de suivi de projet.

Nous pouvons définir un objectif général à l'étude:

**Permettre à un groupe d'étudiants d'appliquer les méthodes d'ingénierie simultanée en réalisant une étude pour une société à l'aide des différents outils de la chaîne XAO intégrée.**



Legende :  Activité ESP  Activité entreprises locales  Activité UTBM.

## INTRODUCTION GENERALE

L'énergie source de tout mouvement se présente dans la nature sous diverses formes. Comme sources d'énergie, l'homme dispose du pétrole, du charbon, du soleil, de l'eau, des atomes et enfin du vent qui fait l'objet de ce projet.

L'énergie éolienne, gratuite et exploitée à ciel ouvert existait déjà dès la haute antiquité en Perse, en Egypte etc...

La puissance disponible dans l'atmosphère a été estimée par différents chercheurs; c'est ainsi que Brunt l'a estimée à  $3.10^{17}$  kilowatts.

De nombreuses études dont celles-ci furent menées pour une meilleure utilisation de cette puissance.

A l'heure actuelle où les réserves de pétrole s'épuisent, où nous sommes en pleine crise énergétique, la question sur l'utilisation de l'énergie éolienne se pose avec acuité. Il est cependant important de noter que, jusqu'à présent, l'énergie éolienne n'est qu'une source d'appoint. Elle peut constituer, dans les pays en voie de développement, un moyen de fournir de l'énergie aux communautés rurales éloignées du réseau électrique national du fait de la faible densité de la population.

Dans le cadre des recherches menées pour le développement de notre pays et pour le bien être de l'homme, nous étudions la reconception d'une éolienne de pompage d'eau pour la société SELMEG. Nous allons la comparer à celle des éoliennes de même type qui existent dans d'autres pays afin de pouvoir apporter les améliorations mécaniques et aérodynamiques nécessaires.

En collaboration avec l'Université Technologique de Belfort Montbéliard (Six élèves ingénieur et un enseignant du département Génie Mécanique et Conception), l'Ecole Supérieure Polytechnique de Thiès (Un élève Ingénieur et un enseignant du département Génie Mécanique) a pour activité tout ce qui est dérive, freinage de l'éolienne, de l'étude des besoins en eau et du réseau de distribution.

Cette collaboration est possible grâce à l'utilisation d'un environnement de travail particulier: Atelier de Coopératif de Suivi de projet, un site Internet servant d'interface aux différents participants, mais aussi de gestionnaire de la base de données créée au fur et à mesure que des parties du projet sont réalisées.

## METHODES/OUTILS

Pour réaliser cette étude, nous avons utilisé l'ensemble des outils de la chaîne XAO intégrée reliés entre eux par l'environnement de travail ACSP.

Nous verrons ici quelles ont été les étapes, méthodes et outils nécessaires pour assurer le succès de l'étude.

# 1. Comment aborder le projet ?

## 1.1 Un groupe de travail multidisciplinaire

En premier lieu, nous avons formé un groupe de travail multidisciplinaire comprenant un chef de projet, un ingénieur qualité - méthode, et des ingénieurs études, calculs, process,... composé d'un élève ingénieur de l'Ecole Supérieure Polytechnique de Thiès au Sénégal et de huit étudiants de l'UTBM provenant des filières CDP et CSMI. Ce groupe, noyau du projet, était donc chargé de l'étude à proprement dite.

A ce noyau s'est greffé un certain nombre d'observateurs et de conseiller tout au long de l'année permettant d'avancer dans le projet de manière plus ouverte sur l'extérieur.

Le tableau suivant montre les différents acteurs du projet. Il est équipé d'un lien direct pour leur envoyer des Mails. Les valeurs de coûts sont purement arbitraires et permettent de repérer les étudiants travaillant sur le projet.

E-Mail	Personne	Inclu	Coût journée
	COUJURIER Matthieu	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="text"/> F
	DAVID Julien	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="text" value="100"/> F
	DE ALMEIDA Paulo	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="text" value="100"/> F
	DELAFOY Pierre-Antoine	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="text"/> F
	DIOP Saër	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="text" value="100"/> F
	DURIF Ghislain	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="text"/> F
	GETE Eric	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="text"/> F
	GOMES Samuel	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="text"/> F
	GORSKA Yoann	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="text"/> F
	LITZLER Pascal	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="text" value="100"/> F
	NIANG Fadel	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="text"/> F
	PRIEUR Patrick	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="text"/> F
	RIETSCH Thierry	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="text" value="100"/> F
	SANTA Emmanuel	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="text"/> F
	THIRION Jean-Baptiste	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="text" value="100"/> F
	WEST Sébastien	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="text" value="100"/> F

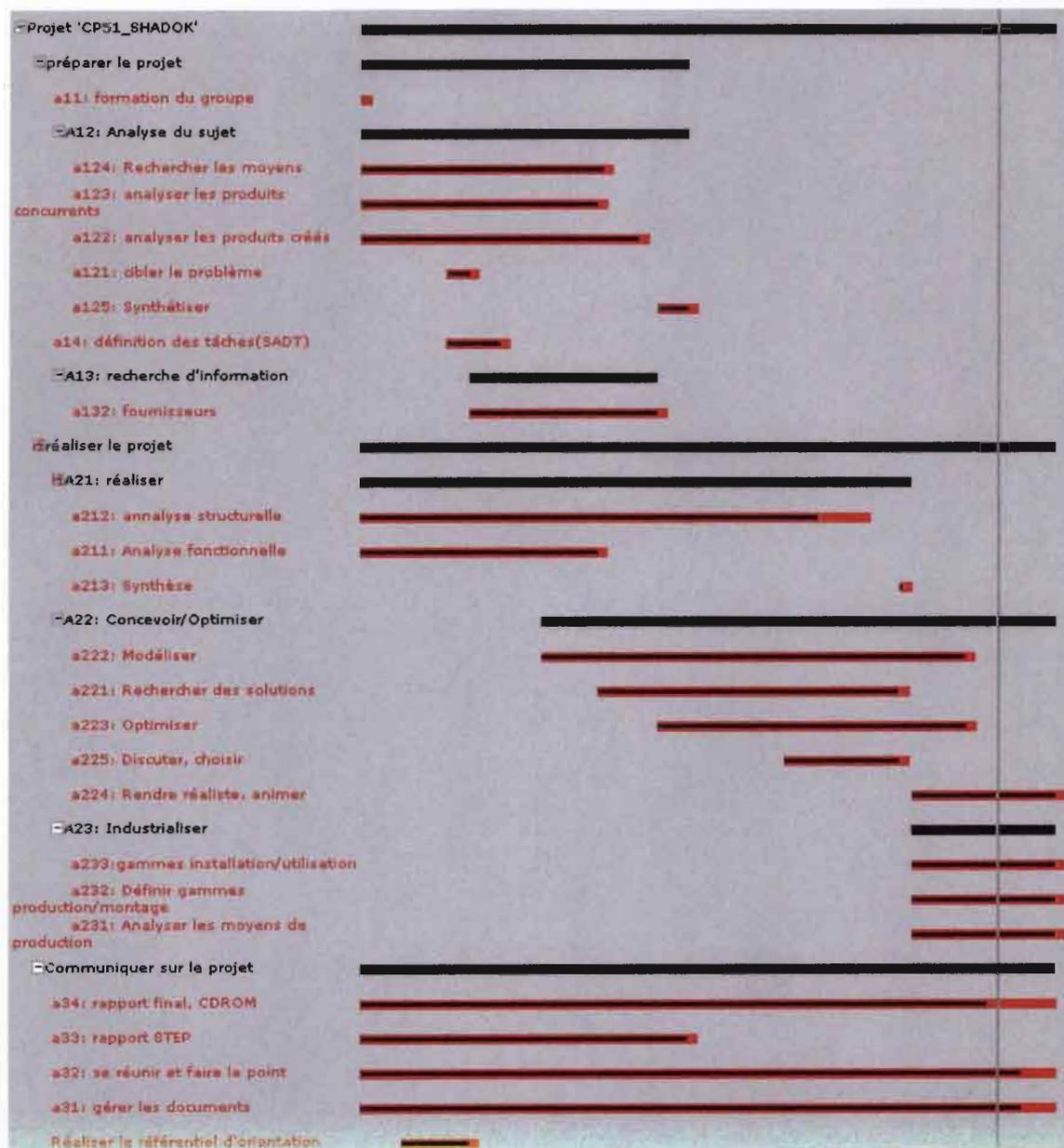
## 1.2 Organisation du projet

Après avoir formé le groupe, il nous a fallu déterminer l'objectif comme nous l'avons vu précédemment et surtout organiser le projet dans le temps sous forme de tâches à réaliser par les acteurs.

L'outil utilisé pour ordonner les tâches est le diagramme SADT.

Le SADT terminé, les cases ont servi à créer les tâches récapitulatives ou non du projet dans l'environnement ACSP. Le diagramme des tâches de l'ACSP permet de voir au premier coup d'œil l'état d'avancement des travaux.

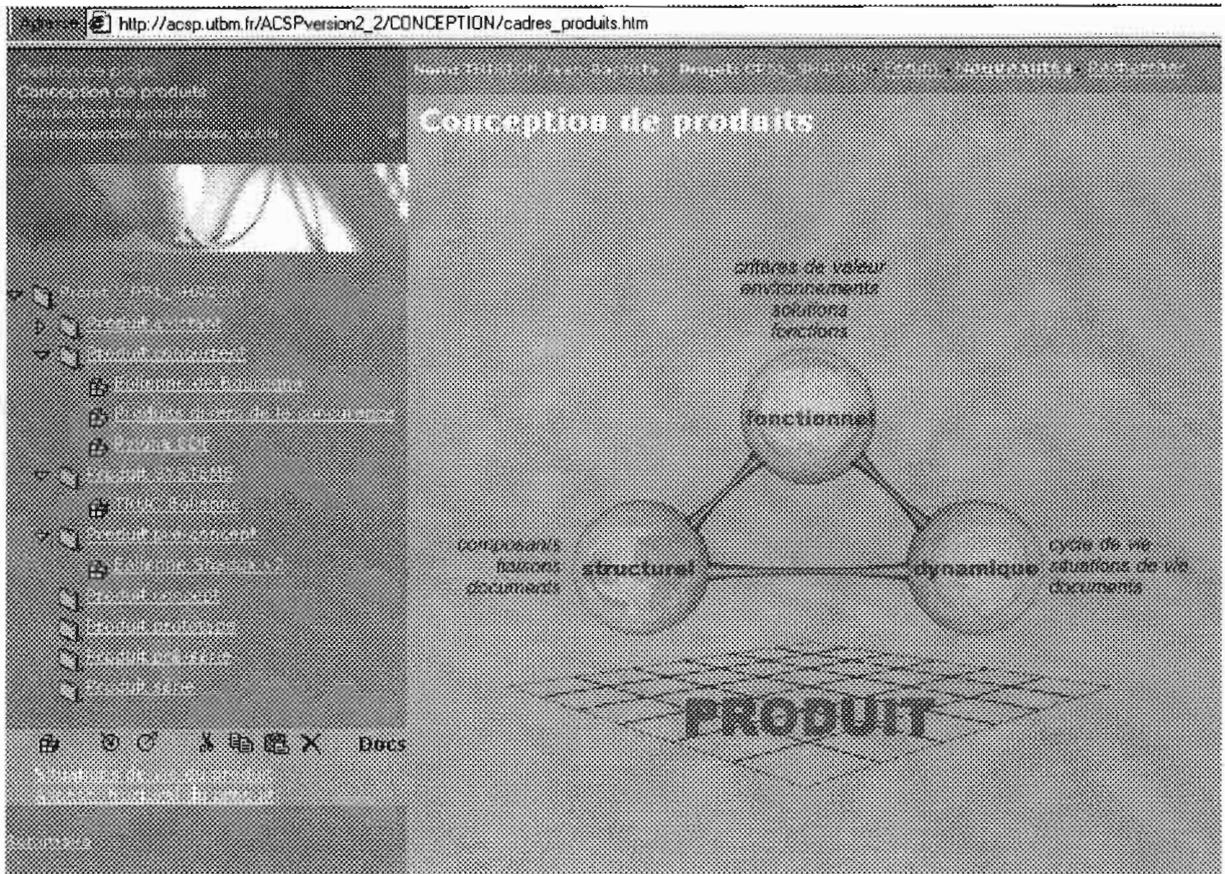
Le diagramme du projet éolienne de pompage est le suivant.



Le concept de tâches propre à l'environnement de travail permettait à chaque acteur se connectant au site de prendre connaissance du travail à réaliser ainsi que son rôle dans la tâche et ses partenaires.

### 1.3 L'environnement ACSP

#### Présentation de l'ACSP :



ACSP signifie : « Atelier Coopératif de Suivi de Projet », par ses fonctionnalités, il permet de faciliter la tâche d'un groupe de travail souhaitant travailler suivant la philosophie de l'ingénierie simultanée.

En effet, plus qu'un outil jouant le rôle d'interface entre les différentes applications nécessaires au bon déroulement d'un projet (cf. figure 1), il a la vertu de créer, par son mode de fonctionnement, une structure de travail : parce qu'il permet d'utiliser efficacement et simplement des méthodes diverses, il permet de rendre un projet dynamique, parce que dense et en perpétuelle évolution.

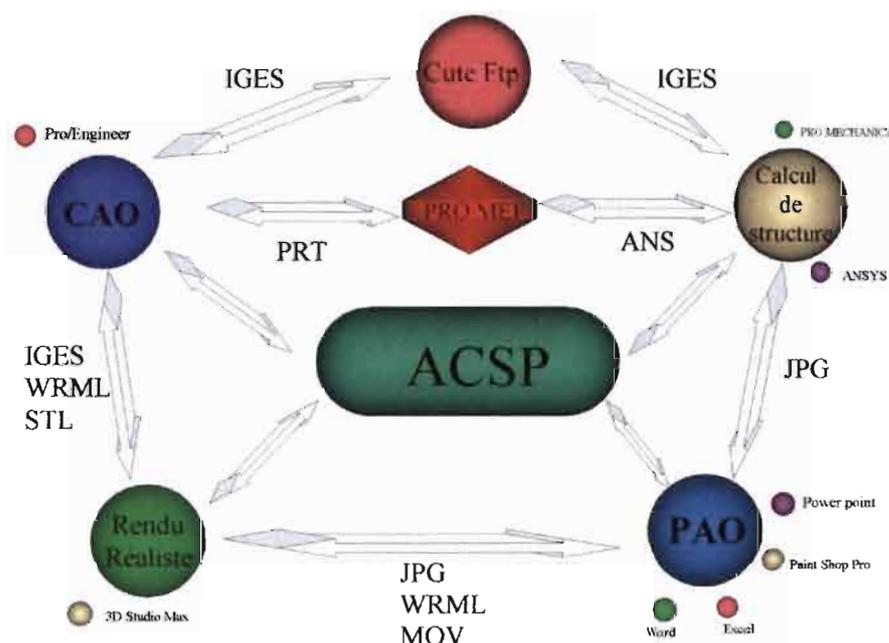
Plus concrètement, l'ACSP permet la gestion :

- Des tâches
- Des documents
- Des données
- +Des procédures...

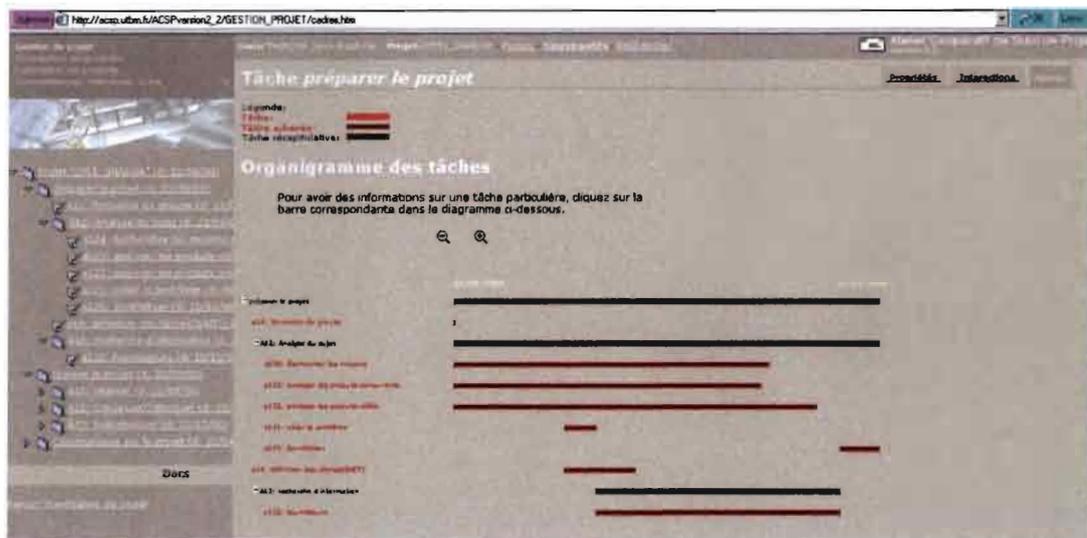
D'autre part, il permet l'application aisée de la méthodologie d'Analyse de la Valeur. En effet, l'analyse fonctionnelle, interne et externe, la structure du produit, l'étude des coûts,... sont prises en compte dans l'ACSP, afin de permettre à l'utilisateur de fournir les informations nécessaires à la création des cahiers des charges du projet.

A ce propos, du fait de sa structuration, l'ACSP permet de générer des documents de synthèse des différentes phases d'un projet.

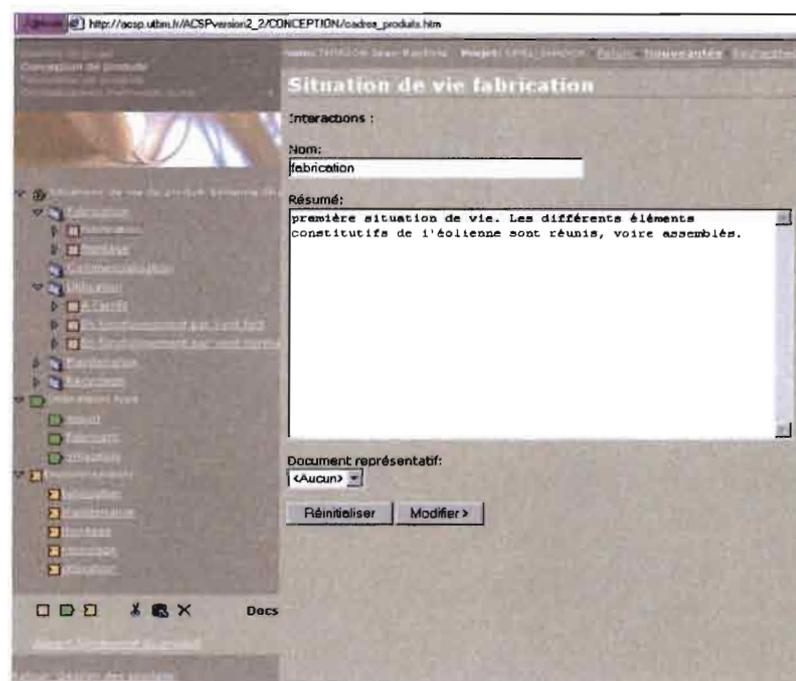
Fig. 1 : l'ACSP et ses interactions avec les autres applications utilisées :



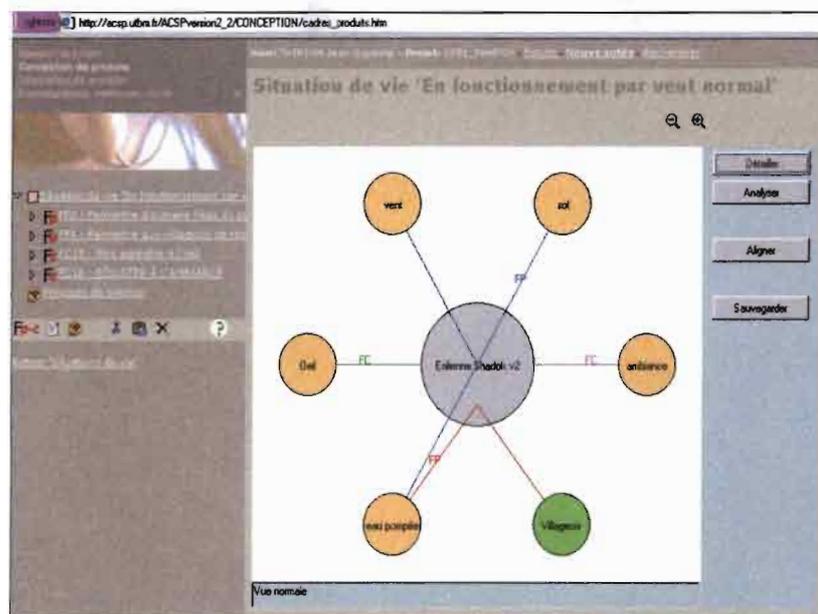
Voici, dans notre cas, quels furent les fonctionnalités de l'ACSP les plus exploitées :



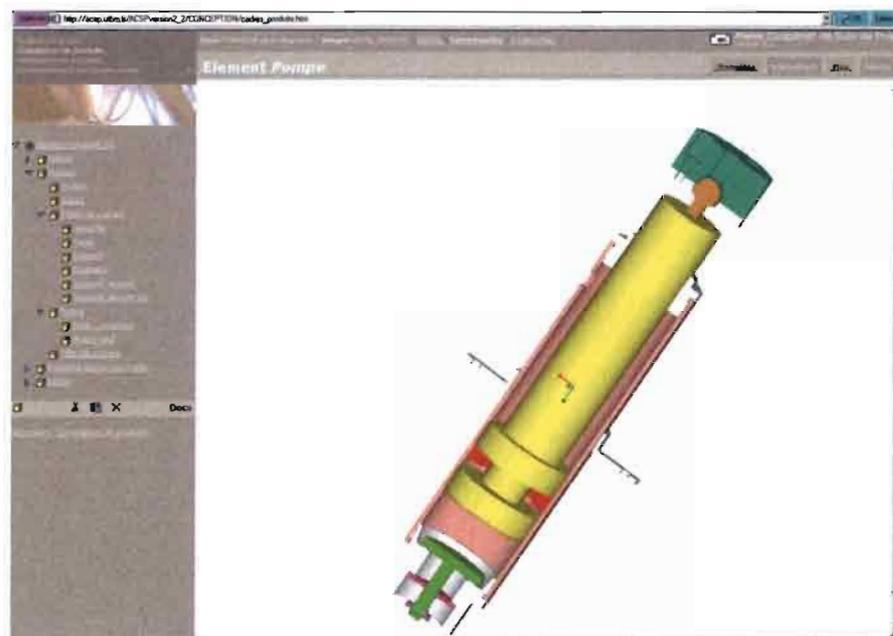
La gestion des tâches, permettant à tout moment de savoir l'avancement du projet, étape par étape, et la personne responsable de chaque étape.



L'étude de la vie du produit, à travers ses différents stades, et ses différents utilisateurs.

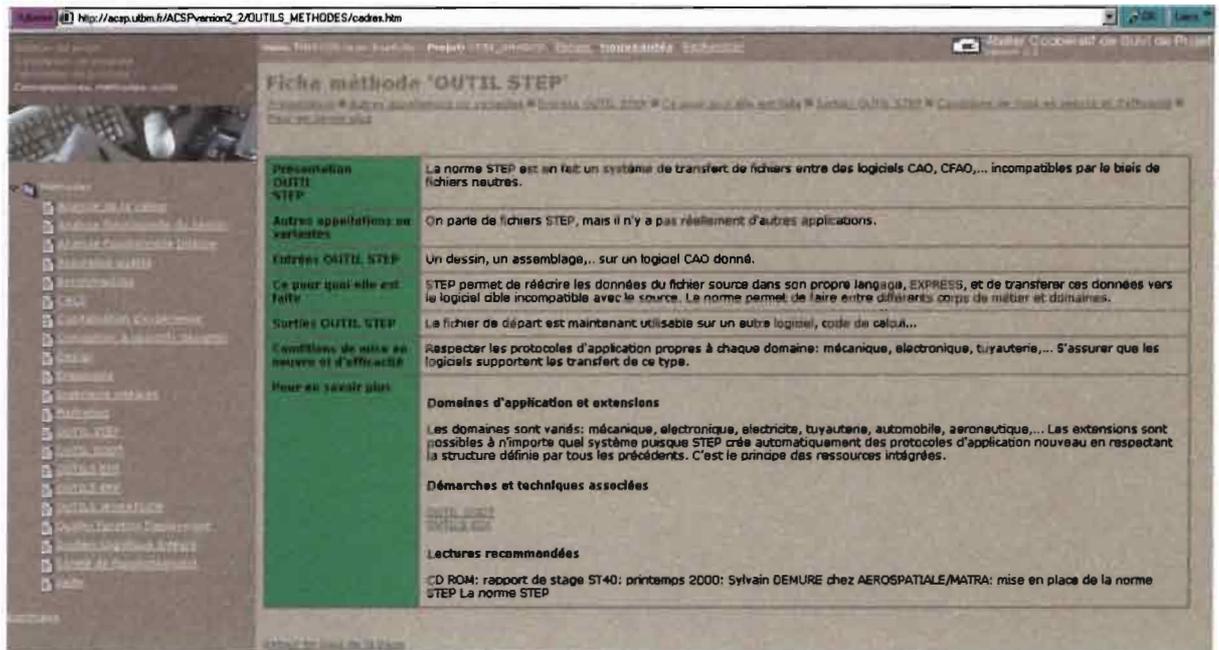


L'aspect fonctionnel qui en résulte permet une étude détaillée des fonctions, hiérarchisées, auxquelles doit répondre le produit



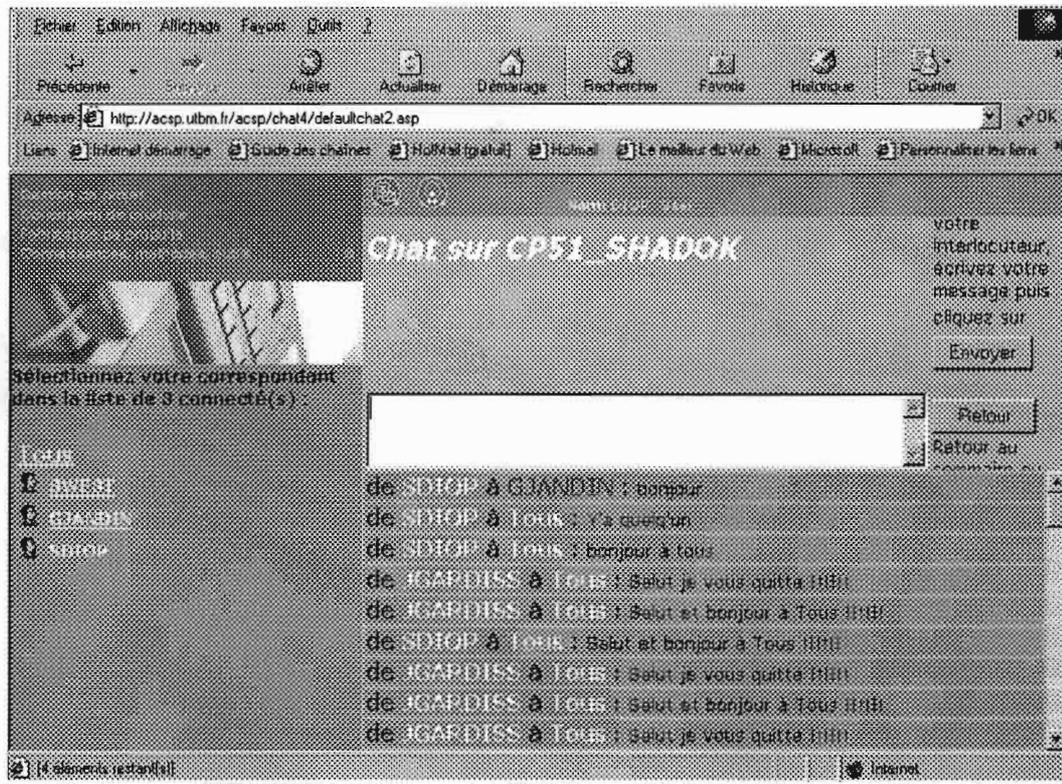
L'étude des process, référencée dans la partie « fabrication de produit », ainsi que la possibilité de créer une arborescence du produit a permis une conception efficace, suivie, ordonnée et accessible à tout membre du groupe de travail.

Cet accessibilité est aussi due à la souplesse que permet l'ACSP (ouverture de documents VRML,...)



Enfin, l'ACSP permettant la capitalisation de données et de connaissances entre des acteurs de projets différents, elle facilite la circulation de l'information (le forum en est un autre exemple).

Le Tchat (discussion en directe) permet aux acteurs du projet de faire des réunions.



## 1.4 Analyse fonctionnelle

### L'analyse fonctionnelle :

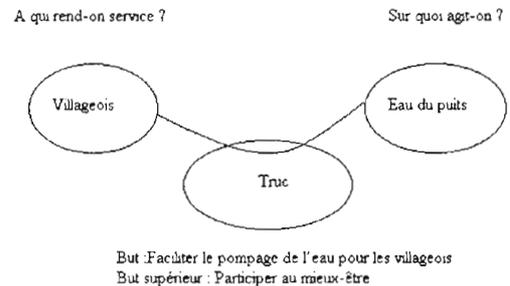
Elle a pour rôle d'exprimer le besoin de l'utilisateur en terme de fonctions puis de le matérialiser sous forme de produit. Pour effectuer notre analyse fonctionnelle, nous avons suivi la méthode APTE, dont l'application concorde avec la structure de l'ACSP en terme de conception de produit.

Voici le déroulement de cette méthode :

### 1.4.1 La recherche du besoin fondamental :

Le but est ici de déterminer le besoin que doit satisfaire le système : pour aboutir au résultat, il est nécessaire de se demander :

- A qui rend service le système ?
- Sur quoi agit le système ?
- Dans quel but existe-t-il ?



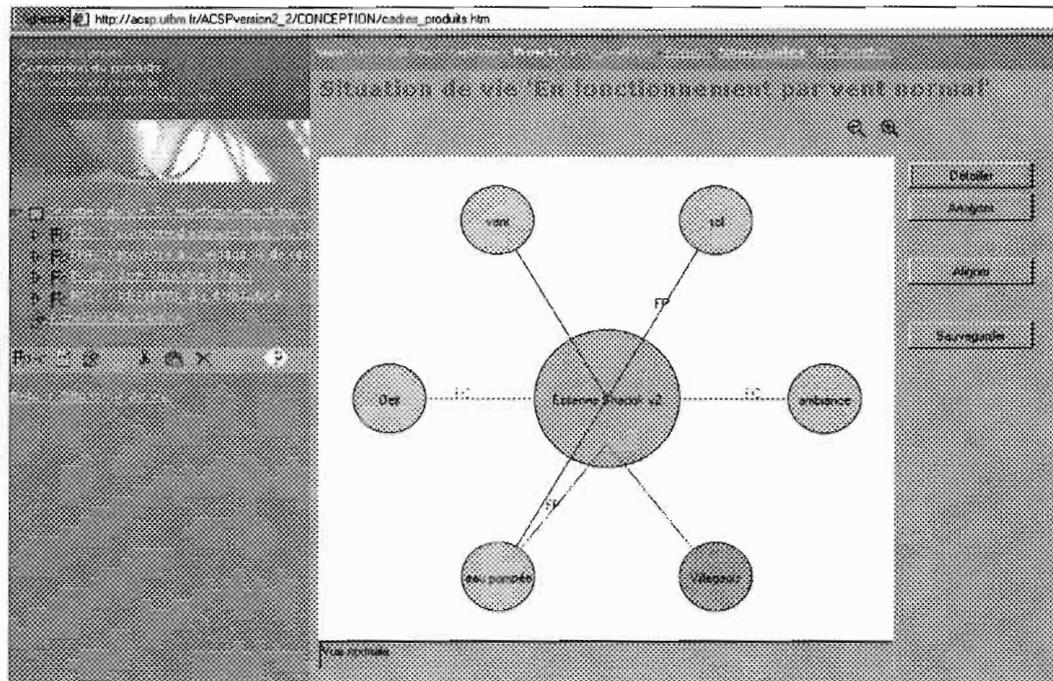
La mise en graphique de ce processus de réflexion se nomme « bête à corne ». N'étant pas schématisé dans l'ACSP, un document au format jpeg a été intégré.

### 1.4.2 L'analyse fonctionnelle externe :

Elle se réalise à travers plusieurs étapes :

- La recherche des différentes situations de vie que connaîtra le système
- La recherche d'un utilisateur type et d'un environnement type pour chaque situation de vie.
- la recherche des différentes fonctions remplies par le produit, leur hiérarchisation en fonctions principales et secondaires

Cette recherche est généralement matérialisée par un schéma appelé « pieuvre » ou « marguerite ».



### 1.4.3 L'analyse fonctionnelle interne :

Elle a pour rôle de permettre au concepteur de traduire techniquement la demande effectuée à travers le Cahier Des Charges Fonctionnel.

Dans notre cas, qui est une reconception, elle se matérialise par la création d'un bloc diagramme de l'existant, puis d'une simplification de celui-ci par élimination des éléments « parasites », qui ne répondent pas explicitement à une fonction du cahier des charges.

### 1.4.4 L'analyse des coûts :

Elle fait partie intégrante de la méthode APTE, et l'ACSP permet parfaitement son application. Toutefois, pour notre étude, l'analyse de l'existant été fortement contrarié par l'impossibilité d'accéder à certaines informations.

## 1.5 Découpage rationnel

Pour mener à bien cette étude, nous avons donc découpé le produit en sous-ensembles intéressants à étudier.

Nous trouvons donc :

Un sous-ensemble **empennage** comprenant le gouvernail et son support fixé sur le support de la nacelle pour l'orientation de l'éolienne.

Un sous-ensemble **plaque latérale** fixé sur la nacelle pour la régulation de l'éolienne.

Un sous-ensemble **structure porteuse** étant la structure porteuse de l'éolienne.

Un sous-ensemble **frein** composé du frein et de sa commande.

Ces quatre sous-ensembles ont été étudiés et optimisés de manière à valoriser le produit dans sa solidité, sa longévité et rendre sa réalisation plus simple.

Une part importante a été accordée à la diminution du nombre de pièces permettant de simplifier et d'optimiser le produit en terme d'efficacité.

Dorénavant, nous allons observer chaque sous-ensemble séparément.

## 2. Conditions météorologiques et puissances théoriques de l'éolienne

### 2.1 Conditions météorologiques

Dans notre pays, on assiste rarement à de violentes tempêtes et des ouragans. Les tableaux ci-après donnent la vitesse moyenne du vent dans diverses localités du pays.

Vous verrez aussi en annexe les détails climatologiques du pays.

### 2.2 Puissances théoriques de l'éolienne

Des essais effectués au laboratoire ont montré que la puissance maximale susceptible d'être recueillie sur les éoliennes lentes s'exprime approximativement en fonction du diamètre de la roue (D) et de la vitesse du vent (V) par la relation:

$$P_{\max} = 0,15 * D^2 * V^3$$

Le diamètre de la roue étant de 6m, on aura:

$$P_{\max} = 5,4 * V^3$$

La puissance théorique développée par la pompe sera égale à la puissance fournie par l'éolienne:

$$P_{\max} = P_{pth} = Q * \gamma_e * h$$

avec  $\gamma_e = 9800\text{N/m}^3$  poids volumique de l'eau

Donc de cette équation on déduit le débit correspondant.

Le tableau suivant donne les puissances et débits théoriques de notre éolienne pour différentes villes du Sénégal en considérant les vitesses moyennes annuelles du vent.

Localité	Vitesse du vent (m/s)	Puissance (Watts)	Profondeur du puits (m)	Débit (L/H)
KOLDA	1,31	12,1396914	10	445,9478473
	1,31	12,1396914	20	222,9739237
	1,31	12,1396914	30	148,6492824
	1,31	12,1396914	35	127,4136707
	1,31	12,1396914	40	111,4869618
	1,31	12,1396914	45	99,09952163
	1,31	12,1396914	50	89,18956947
	1,31	12,1396914	55	81,08142679
	1,31	12,1396914	60	74,32464122
	1,31	12,1396914	65	68,60736113
	1,31	12,1396914	70	63,70683534
	1,31	12,1396914	75	59,45971298
	1,31	12,1396914	80	55,74348092
	1,31	12,1396914	85	52,46445263
	1,31	12,1396914	90	49,54976082
	1,31	12,1396914	95	46,94187867
1,31	12,1396914	100	44,59478473	

Localité	Vitesse du vent (m/s)	Puissance (Watts)	Profondeur du puits (m)	Débit (L/H)
LINGUERE	1,87	35,3116962	10	1297,16435
	1,87	35,3116962	20	648,5821751
	1,87	35,3116962	30	432,3881167
	1,87	35,3116962	35	370,6183858
	1,87	35,3116962	40	324,2910876
	1,87	35,3116962	45	288,2587445
	1,87	35,3116962	50	259,43287
	1,87	35,3116962	55	235,8480637
	1,87	35,3116962	60	216,1940584
	1,87	35,3116962	65	199,5637462
	1,87	35,3116962	70	185,3091929

	1,87	35,3116962	75	172,9552467
	1,87	35,3116962	80	162,1455438
	1,87	35,3116962	85	152,6075706
	1,87	35,3116962	90	144,1293722
	1,87	35,3116962	95	136,5436158
	1,87	35,3116962	100	129,716435

Localité	Vitesse du vent (m/s)	Puissance (Watts)	Profondeur du puits (m)	Débit (L/H)
MATAM	1,01	5,5636254	10	204,3780759
	1,01	5,5636254	20	102,189038
	1,01	5,5636254	30	68,12602531
	1,01	5,5636254	35	58,39373598
	1,01	5,5636254	40	51,09451898
	1,01	5,5636254	45	45,4173502
	1,01	5,5636254	50	40,87561518
	1,01	5,5636254	55	37,15965017
	1,01	5,5636254	60	34,06301265
	1,01	5,5636254	65	31,44278091
	1,01	5,5636254	70	29,19686799
	1,01	5,5636254	75	27,25041012
	1,01	5,5636254	80	25,54725949
	1,01	5,5636254	85	24,04447952
	1,01	5,5636254	90	22,7086751
1,01	5,5636254	95	21,51348168	
1,01	5,5636254	100	20,43780759	

Localité	Vitesse du vent (m/s)	Puissance (Watts)	Profondeur du puits (m)	Débit (L/H)
PODOR	2,66	101,6339184	10	3733,49088
	2,66	101,6339184	20	1866,74544
	2,66	101,6339184	30	1244,49696
	2,66	101,6339184	35	1066,71168
	2,66	101,6339184	40	933,37272
	2,66	101,6339184	45	829,66464
	2,66	101,6339184	50	746,698176
	2,66	101,6339184	55	678,8165236
	2,66	101,6339184	60	622,24848

	2,66	101,6339184	65	574,3832123
	2,66	101,6339184	70	533,35584
	2,66	101,6339184	75	497,798784
	2,66	101,6339184	80	466,68636
	2,66	101,6339184	85	439,2342212
	2,66	101,6339184	90	414,83232
	2,66	101,6339184	95	392,99904
	2,66	101,6339184	100	373,349088

Localité	Vitesse du vent (m/s)	Puissance (Watts)	Profondeur du puits (m)	Débit (L/H)
TAMBA	2,24	60,6928896	10	2229,53472
	2,24	60,6928896	20	1114,76736
	2,24	60,6928896	30	743,17824
	2,24	60,6928896	35	637,00992
	2,24	60,6928896	40	557,38368
	2,24	60,6928896	45	495,45216
	2,24	60,6928896	50	445,906944
	2,24	60,6928896	55	405,3699491
	2,24	60,6928896	60	371,58912
	2,24	60,6928896	65	343,0053415
	2,24	60,6928896	70	318,50496
	2,24	60,6928896	75	297,271296
	2,24	60,6928896	80	278,69184
	2,24	60,6928896	85	262,2982024
	2,24	60,6928896	90	247,72608
	2,24	60,6928896	95	234,6878653
2,24	60,6928896	100	222,953472	

Localité	Vitesse du vent (m/s)	Puissance (Watts)	Profondeur du puits (m)	Débit (L/H)
	3,66	264,7506384	10	9725,533656
	3,66	264,7506384	20	4862,766828
	3,66	264,7506384	30	3241,844552
	3,66	264,7506384	35	2778,723902
	3,66	264,7506384	40	2431,383414
	3,66	264,7506384	45	2161,229701
	3,66	264,7506384	50	1945,106731

ROSSO	3,66	264,7506384	55	1768,278846
	3,66	264,7506384	60	1620,922276
	3,66	264,7506384	65	1496,235947
	3,66	264,7506384	70	1389,361951
	3,66	264,7506384	75	1296,737821
	3,66	264,7506384	80	1215,691707
	3,66	264,7506384	85	1144,18043
	3,66	264,7506384	90	1080,614851
	3,66	264,7506384	95	1023,740385
	3,66	264,7506384	100	972,5533656

Localité	Vitesse du vent (m/s)	Puissance (Watts)	Profondeur du puits (m)	Débit (L/H)
ZIGUINCHOR	2,06	47,2058064	10	1734,090847
	2,06	47,2058064	20	867,0454237
	2,06	47,2058064	30	578,0302824
	2,06	47,2058064	35	495,4545278
	2,06	47,2058064	40	433,5227118
	2,06	47,2058064	45	385,3535216
	2,06	47,2058064	50	346,8181695
	2,06	47,2058064	55	315,289245
	2,06	47,2058064	60	289,0151412
	2,06	47,2058064	65	266,7832073
	2,06	47,2058064	70	247,7272639
	2,06	47,2058064	75	231,212113
	2,06	47,2058064	80	216,7613559
	2,06	47,2058064	85	204,0106879
	2,06	47,2058064	90	192,6767608
2,06	47,2058064	95	182,5358787	
2,06	47,2058064	100	173,4090847	

Localité	Vitesse du vent (m/s)	Puissance (Watts)	Profondeur du puits (m)	Débit (L/H)
	4,88	627,5570688	10	23053,11681
	4,88	627,5570688	20	11526,55841
	4,88	627,5570688	30	7684,372271
	4,88	627,5570688	35	6586,604804
	4,88	627,5570688	40	5763,279203

DAKAR	4,88	627,5570688	45	5122,914847
	4,88	627,5570688	50	4610,623363
	4,88	627,5570688	55	4191,475784
	4,88	627,5570688	60	3842,186136
	4,88	627,5570688	65	3546,633356
	4,88	627,5570688	70	3293,302402
	4,88	627,5570688	75	3073,748908
	4,88	627,5570688	80	2881,639602
	4,88	627,5570688	85	2712,13139
	4,88	627,5570688	90	2561,457424
	4,88	627,5570688	95	2426,643875
	4,88	627,5570688	100	2305,311681

Localité	Vitesse du vent (m/s)	Puissance (Watts)	Profondeur du puits (m)	Débit (L/H)
ST-LOUIS	4,55	508,660425	10	18685,485
	4,55	508,660425	20	9342,7425
	4,55	508,660425	30	6228,495
	4,55	508,660425	35	5338,71
	4,55	508,660425	40	4671,37125
	4,55	508,660425	45	4152,33
	4,55	508,660425	50	3737,097
	4,55	508,660425	55	3397,360909
	4,55	508,660425	60	3114,2475
	4,55	508,660425	65	2874,69
	4,55	508,660425	70	2669,355
	4,55	508,660425	75	2491,398
	4,55	508,660425	80	2335,685625
	4,55	508,660425	85	2198,292353
	4,55	508,660425	90	2076,165
	4,55	508,660425	95	1966,893158
4,55	508,660425	100	1868,5485	

Localité	Vitesse du vent (m/s)	Puissance (Watts)	Profondeur du puits (m)	Débit (L/H)
	1,59	21,7062666	10	797,3730588
	1,59	21,7062666	20	398,6865294
	1,59	21,7062666	30	265,7910196

DIOURBEL	1,59	21,7062666	35	227,8208739
	1,59	21,7062666	40	199,3432647
	1,59	21,7062666	45	177,1940131
	1,59	21,7062666	50	159,4746118
	1,59	21,7062666	55	144,9769198
	1,59	21,7062666	60	132,8955098
	1,59	21,7062666	65	122,6727783
	1,59	21,7062666	70	113,910437
	1,59	21,7062666	75	106,3164078
	1,59	21,7062666	80	99,67163235
	1,59	21,7062666	85	93,80859515
	1,59	21,7062666	90	88,59700653
	1,59	21,7062666	95	83,93400619
	1,59	21,7062666	100	79,73730588

Localité	Vitesse du vent (m/s)	Puissance (Watts)	Profondeur du puits (m)	Débit (L/H)
KAOLACK	2,82	121,0991472	10	4448,540101
	2,82	121,0991472	20	2224,270051
	2,82	121,0991472	30	1482,8467
	2,82	121,0991472	35	1271,011457
	2,82	121,0991472	40	1112,135025
	2,82	121,0991472	45	988,5644669
	2,82	121,0991472	50	889,7080202
	2,82	121,0991472	55	808,8254729
	2,82	121,0991472	60	741,4233502
	2,82	121,0991472	65	684,3907848
	2,82	121,0991472	70	635,5057287
	2,82	121,0991472	75	593,1386802
	2,82	121,0991472	80	556,0675127
	2,82	121,0991472	85	523,357659
	2,82	121,0991472	90	494,2822335
	2,82	121,0991472	95	468,2673791
2,82	121,0991472	100	444,8540101	

Localité	Vitesse du vent (m/s)	Puissance (Watts)	Profondeur du puits (m)	Débit (L/H)
	1,51	18,5919354	10	682,9690555

THIES	1,51	18,5919354	20	341,4845278
	1,51	18,5919354	30	227,6563518
	1,51	18,5919354	35	195,1340159
	1,51	18,5919354	40	170,7422639
	1,51	18,5919354	45	151,7709012
	1,51	18,5919354	50	136,5938111
	1,51	18,5919354	55	124,1761919
	1,51	18,5919354	60	113,8281759
	1,51	18,5919354	65	105,0721624
	1,51	18,5919354	70	97,56700793
	1,51	18,5919354	75	91,06254073
	1,51	18,5919354	80	85,37113194
	1,51	18,5919354	85	80,34930065
	1,51	18,5919354	90	75,88545061
	1,51	18,5919354	95	71,89147953
	1,51	18,5919354	100	68,29690555

Localité	Vitesse du vent (m/s)	Puissance (Watts)	Profondeur du puits (m)	Débit (L/H)
KEDOUGOU	1,59	21,7062666	10	797,3730588
	1,59	21,7062666	20	398,6865294
	1,59	21,7062666	30	265,7910196
	1,59	21,7062666	35	227,8208739
	1,59	21,7062666	40	199,3432647
	1,59	21,7062666	45	177,1940131
	1,59	21,7062666	50	159,4746118
	1,59	21,7062666	55	144,9769198
	1,59	21,7062666	60	132,8955098
	1,59	21,7062666	65	122,6727783
	1,59	21,7062666	70	113,910437
	1,59	21,7062666	75	106,3164078
	1,59	21,7062666	80	99,67163235
	1,59	21,7062666	85	93,80859515
	1,59	21,7062666	90	88,59700653
	1,59	21,7062666	95	83,93400619
1,59	21,7062666	100	79,73730588	

### **3. Etude de l'orientation**

#### **3.1 Fonction à réaliser**

##### **3.1.1 Système existant**

La société SELMEG utilise le dispositif de l'empennage pour l'orientation de l'éolienne.

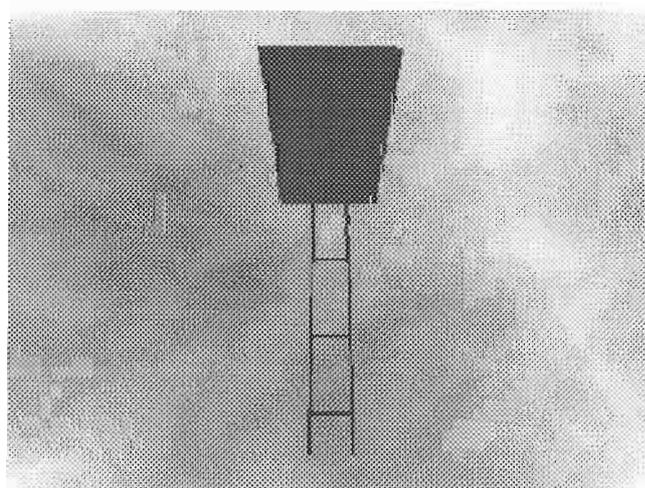
##### **3.1.2 Pourquoi orienté l'éolienne**

La fonction de principale de l'orientation est de maintenir toujours l'hélice en face de la direction du vent.

##### **3.1.3 Modélisation de l'existant**

Une grande partie des pièces n'a pas pu être modélisé pour la simple et bonne raison que nous n'étions pas en possession de leurs plans, ni schéma ni même une courte nomenclature.

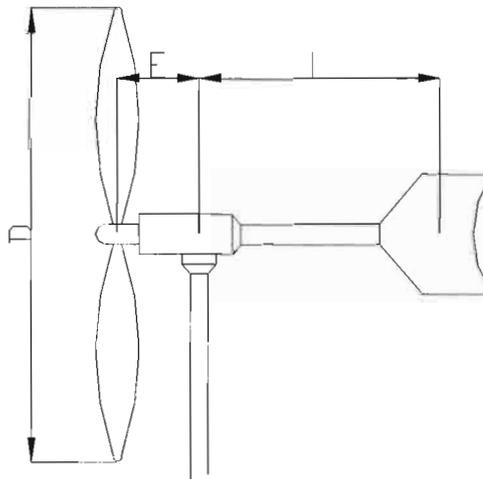
### **3.2 Orientation de l'éolienne**



Nous allons adopter le système de l'empennage pour faire l'orientation de notre éolienne.

Cette solution est utilisée principalement pour orienter des éoliennes lentes jusqu'à 6m de diamètre, ce qui correspond exactement avec notre éolienne.

Pour que le fonctionnement soit satisfaisant, certaines conditions doivent être observées :



Si on donne à la distance axe d'orientation - centre de l'empennage, une valeur  $L$  égale à  $4 E$ ,  $E$  désignant la distance entre l'axe d'orientation et le plan de rotation de l'hélice, la surface  $s$  de l'empennage doit avoir une relation en fonction  $S$  (aire balayée par l'hélice).

Pour une éolienne multipales  $s = 0,10 S$  (réf : énergie éolienne, Désiré LE GOURIERES)

On a :

$$s = 0.1 * S = 0.1 * \pi * \frac{36}{4} = 2.82$$

D'où la surface de l'empennage est de:

$$s=2.82 \text{ m}^2$$

En pratique, on donne souvent à L une valeur voisine de  $0,6 \cdot D$ .

$$\text{Soit: } L=0.6 \cdot 6=3.6 \text{ m}$$

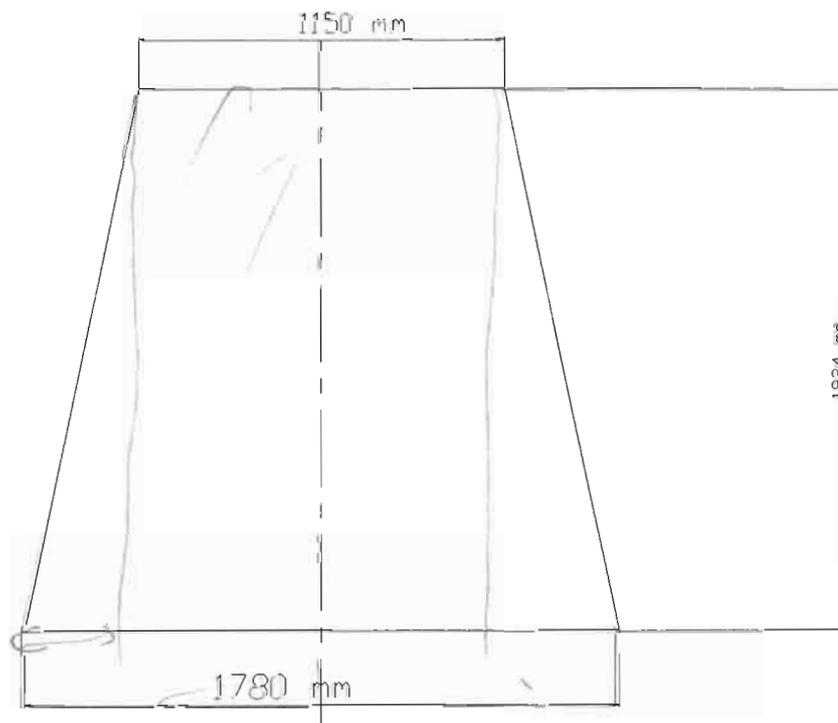
$$L=3.6 \text{ m}$$

Ce qui donne

$$E=\frac{L}{4}=\frac{3.6}{4}=0.9$$

$$E=0.9 \text{ m}$$

### 3.2.1 Le gouvernail



Il est fait en tôle d'acier laminée à chaud de qualité XC d'épaisseur 2 mm:

Masse volumique :  $\rho=8000 \text{ Kg/m}^3$

Volume :  $V=3.992610^{-3} \text{ m}^3$

Donc la masse est de :

Masse :  $m=31.94 \text{ Kg}$

Il est encadré par des cornières à ailes égales L40x40x4 de longueur totale  $L=6.83 \text{ m}$ .

Masse linéique= $2.42 \text{ kg/m}$

Soit une masse de :

$M=6.83*2.42=16.53 \text{ kg}$

Donc la masse totale du gouvernail est de :

$M_{\text{tot}}=16.53+31.94=48.47 \text{ kg}$

**$M_{\text{tot}}=48.47 \text{ kg}$**

### **3.2.2 Le support**

Soit  $P=48.47*9.81=475.5 \text{ N}$  le poids du gouvernail

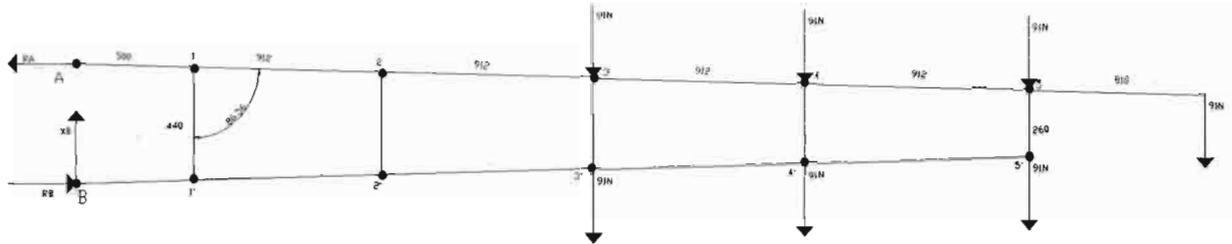
On prend un coefficient de 1.35, ce qui donne une charge globale de 637 N.

Cette force est répartie sur les 07 (sept) boulons de fixation à raison de 91 N sur chaque boulon.

Pour notre structure, nous allons prendre des profilés à ailes égales L40x40x5 avec :

$F_y = 300 \text{ MPa}$

$F_u = 450 \text{ MPa}$



### 3.2.2.1 calcul des efforts externes

$$\sum M_B = 2.32 * 182 + 3.235 * 182 + 4.145 * 182 + 4.938 * 91 - 0.5 * R_A = 0$$

$$R_A = 4.43 \text{ kN}$$

$$R_B = R_A$$

Mais ils sont de sens opposés

$$\sum F_y = 0$$

d'où

$$X_B = 0.637 \text{ kN}$$

### 3.2.2.2 Calcul des efforts internes

Si on isole le nœud A, on a :

$$0.9998 * F_{A1} = R_A$$

d'où

$$F_{A1} = 4.429 \text{ kN}$$

cette membrure est en traction

Si on fait de même avec le nœud B, on a :

$$F_{B1} = 4.429kN$$

Mais cette membrure est soumise à une compression

### 3.2.3 Etude de la résistance de notre structure

#### 3.2.3.1 Résistance à la traction

La section sollicitée à la traction est de :

$$A_n = 40 * 5 + 35 * 5 = 375 mm^2$$

On a:

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

$$F_u = 450 \text{ MPa}$$

Selon le code canadien, la résistance pondérée de l'acier (à la traction) peut de trouver selon l'expression:

$$Tr = \min(\phi * A_n * F_y, 0.85 * \phi * A_n * F_u)$$

$$\phi * A_n * F_y = 0.9 * 375 * 300 * 10^{-3} = 101.25kN$$

$$0.85 * \phi * A_n * F_u = 0.85 * 375 * 450 * 10^{-3} = 143.44kN$$

d'où

$$Tr = 101.25 \text{ kN}$$

Or pour les éléments tendus dans notre structure, la membrure la plus sollicitée est (A-1) avec:

$$F_{A1} = 4.429 \text{ kN}$$

Notre vérification portera donc sur cet élément.

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

Donc, notre profilé résiste bien à la traction.

### 3.2.3.2 Résistance à la compression

Chaque nœud de notre structure constitue une rotule, nos éléments sont donc birotulés.

Soient:

$K=1$  facteur d'appui

$S_y$  = Limite d'écoulement du matériau

$C_r$  = résistance d'un élément en compression

$C_f$  = sollicitation en compression

Longueur de l'élément:  $L=0.5$  m

$$\text{On a: } \lambda = \frac{KL}{r} \sqrt{\frac{S_y}{\pi^2 E}}$$

$$\frac{KL}{r} = \frac{1 \cdot 0.5}{12.03 \cdot 10^{-3}} = 41.56$$

Avec la figure 14.22 (Résistance des matériaux, André BAZERGUI), on obtient la contrainte axiale maximale :

$$S_a = 160 \text{ MPa}$$

$$\text{D'où } C_r = 160 \cdot 375 \cdot 10^{-3} = 60 \text{ kN}$$

$$C_f = 1.5 \cdot F_{B1} = 1.5 \cdot 4.429 = 6.6435 \text{ kN}$$

Avec la figure 14.22 (Résistance des matériaux, André BAZERGUI), on obtient la contrainte axiale maximale :

$$S_a = 160 \text{ MPa}$$

$$D'où C_r = 160 * 375 * 10^{-3} = 60 \text{ kN}$$

$$C_f = 1.5 * F_{B1'} = 1.5 * 4.429 = 6.6435 \text{ kN}$$

$$C_r \gg C_f$$

Notre élément résiste bien au flambage

**Donc notre structure résiste au flambement et à la traction.**

Il est fait avec des cornières L40x40x5 :

Longueur totale :  $L = 13 \text{ m}$

Masse linéique :  $m_l = 2.97 \text{ kg/m}$

Donc la masse totale du support est de :

$$m_t = 13 * 2.97 = 38.61 \text{ kg}$$

$$m_t = 38.61 \text{ kg}$$

### 3.2.4 Caractéristiques de l'empennage

La masse totale de l'empennage est :

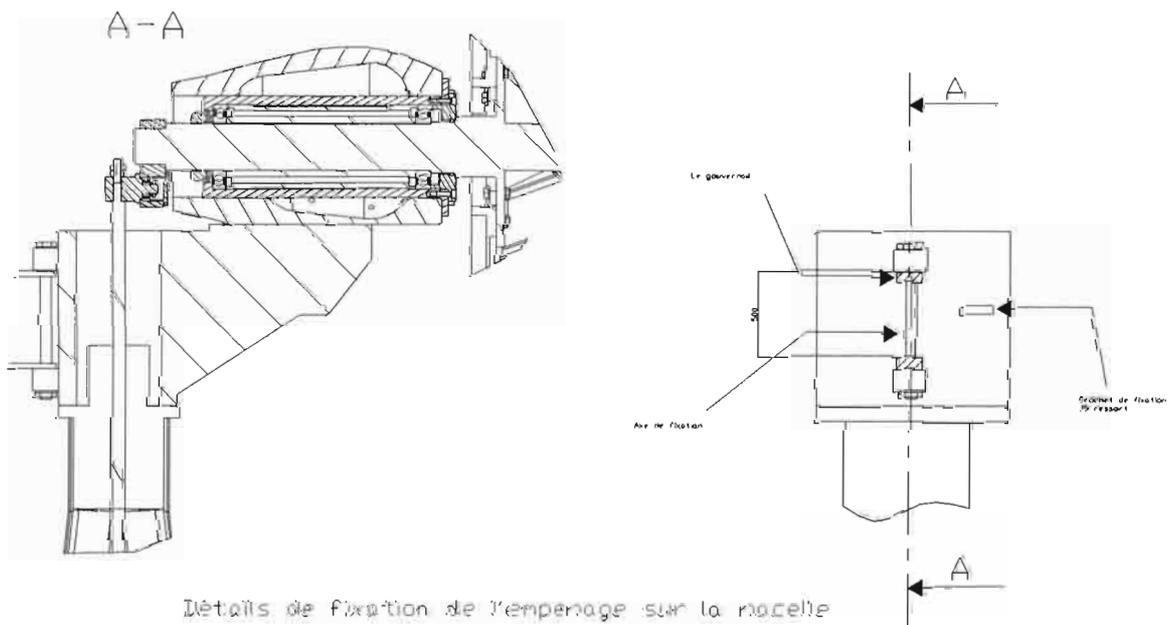
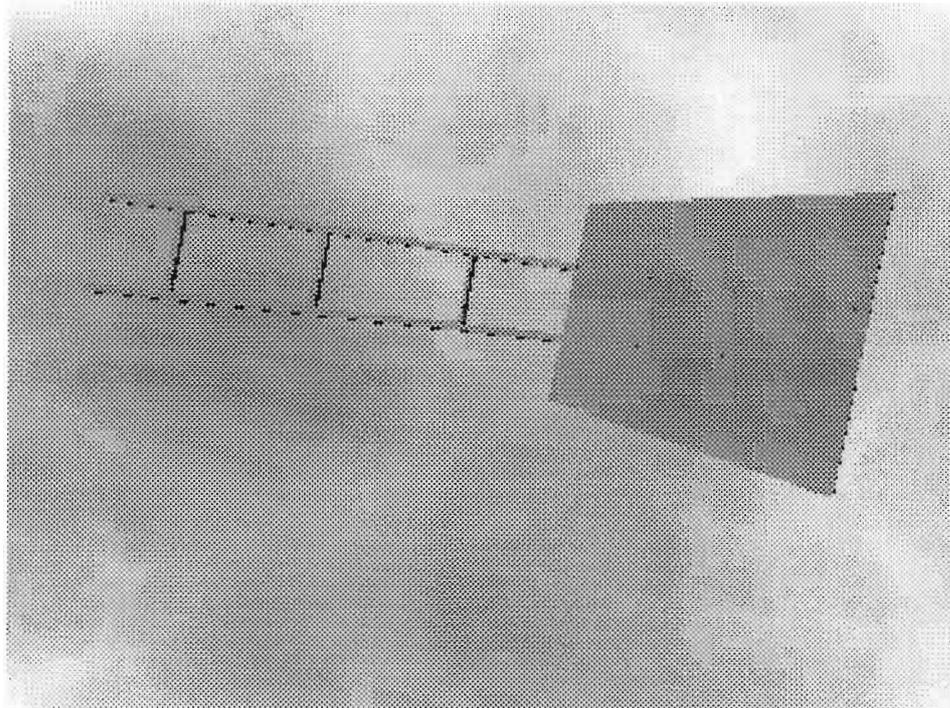
$$m_{tot} = 48.47 + 38.61 = 87.08 \text{ kg}$$

$$m_{tot} = 87.08 \text{ kg}$$

La fixation du gouvernail sur le support se fait par boulonnage, on utilise des boulons M10.

### 3.2.5 Fixation de l'empennage sur la nacelle

## Détails de fixation de l'empennage sur la nacelle

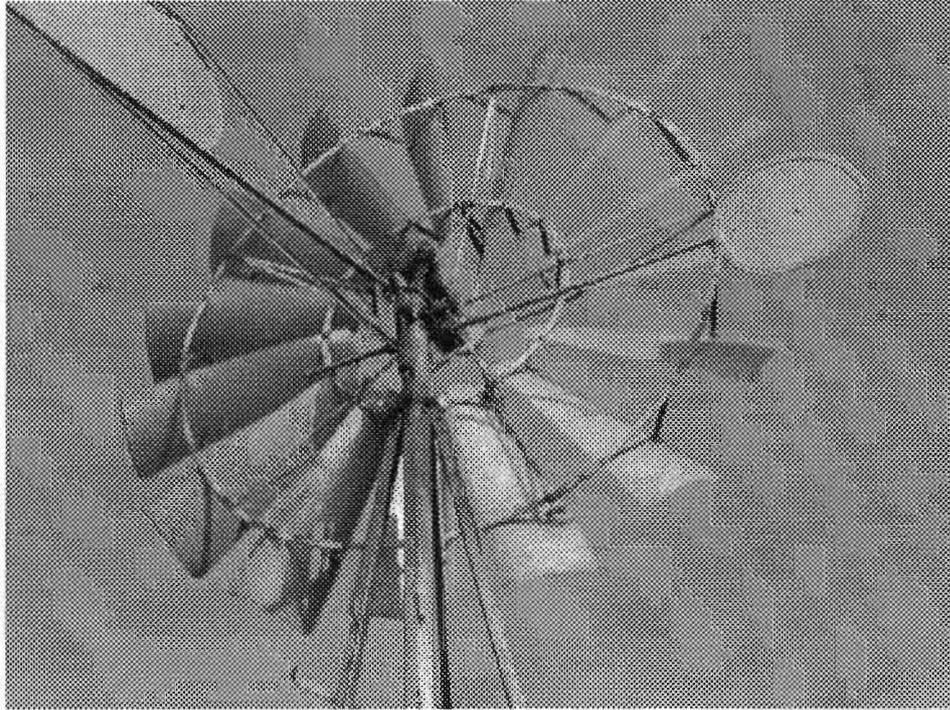


Détails de fixation de l'empennage sur la nacelle

Comme le montre le dessin ci-dessus, la fixation de l'empennage sur la nacelle est assurée par un axe.

Le ressort (non représenté) joue à la fois le rôle de régulateur de vitesse.

## 4. Etude de la régulation

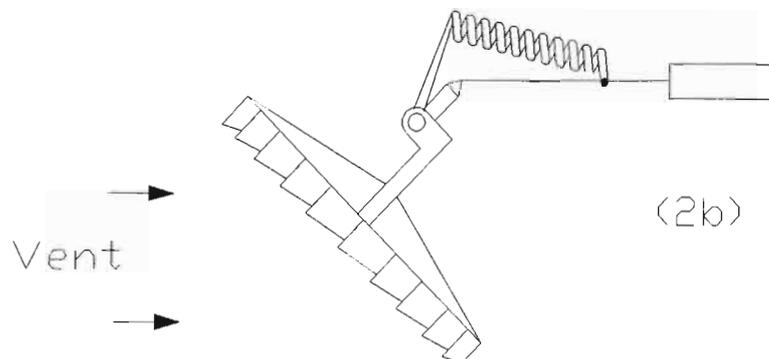
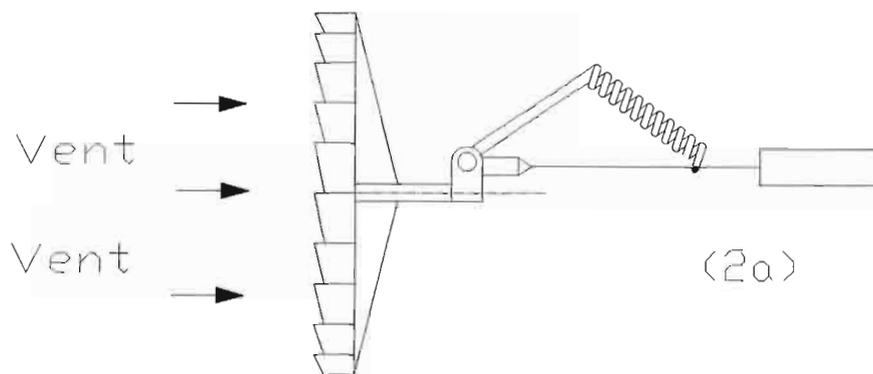


### 4.1 Fonction à réaliser

#### 4.1.1 Système existant

Pour la régulation, l'éolienne SELMEG utilise un dispositif à empennage articulé.

L'axe de la roue est excentré par rapport à l'axe du support. La poussée axiale a un moment non nul par rapport à l'axe d'orientation ; ce qui donne une réduction du flux d'air à travers l'éolienne et donc une diminution de la puissance développée. Ce dispositif est utilisé sur les machines de grand diamètre. Dans la mesure où l'angle  $\phi$  reste inférieur à  $30^\circ$ , la puissance varie proportionnellement au cube de la composante normale  $V_n$  de la vitesse du vent au plan de rotation, c'est à dire comme  $(V \cos \phi)^3$ .



### 4.1.2 Fonction principale de la régulation

Pour de nombreuses utilisations il est souhaitable que la vitesse de l'éolienne reste relativement constante malgré la variation du vent. Dans ce but, on utilise des régulateurs de vitesse. Ces dispositifs servent aussi de limiteurs de puissance et d'effort sur les pales par grand vent.

## 4.2 Nouveau système de régulation

### 4.2.1 Principe de fonctionnement

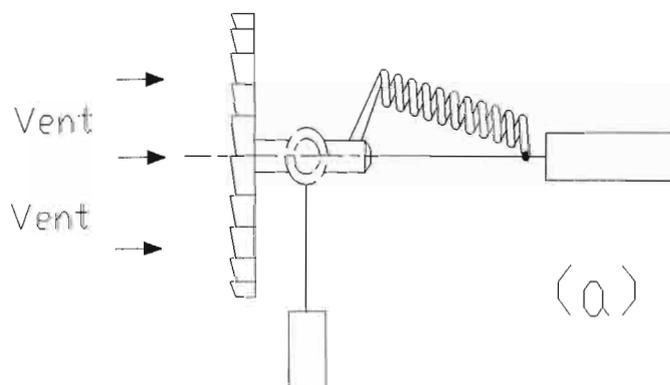
Pour éviter que la machine ne s'emballe, on provoque au fur et à mesure de l'accroissement de la vitesse du vent, une réduction de la surface offerte au vent par l'hélice par l'inclinaison de l'axe de celle-ci sur la direction du courant d'air (diminution du maître couple). La surface offerte au vent devient  $S \cos \phi$ ,  $S$  étant la surface balayée,  $\phi$  l'angle entre la normale au plan de l'hélice et la direction du vent.

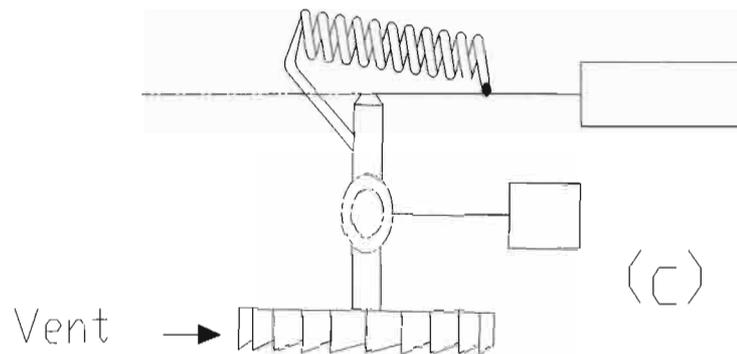
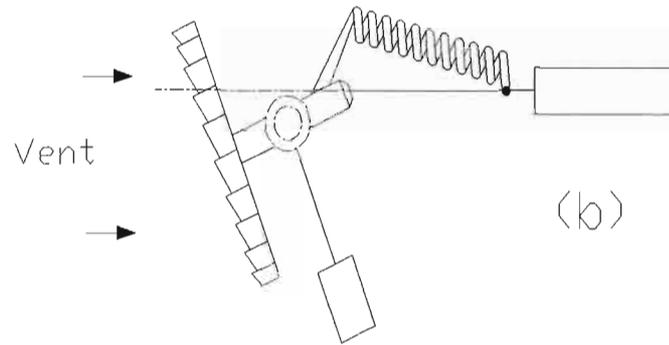
Lorsque la vitesse atteint un certain seuil, l'hélice se met en drapeau. Cette réduction de vitesse et cette mise en drapeau peuvent être obtenue par le dispositif figuré ci-dessous.

L'action du vent agissant sur la plaque latérale liée rigidement au boîtier de l'hélice provoque l'inclinaison de l'axe de l'hélice sur la direction du vent :

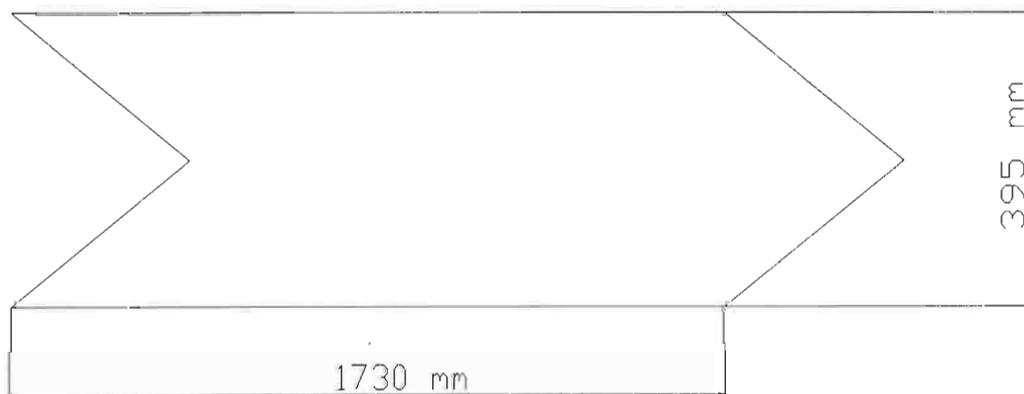
L'équipage s'immobilise dans une position telle que les moments dus aux forces s'exerçant sur la plaque latérale et le gouvernail arrière et le gouvernail arrière par rapport à l'axe du support s'équilibrent.

Pour éviter les à-coups, on monte parfois un amortisseur (d'automobile) sur l'articulation de l'empennage.





### 4.2.2 La plaque latérale



Elle est faite en tôle d'acier laminée à chaud de qualité XC d'épaisseur 2 mm:

Masse volumique :  $\rho=8000 \text{ Kg/m}^3$

La surface est de  $683350 \text{ mm}^2$

Volume :  $V=1.37.10^{-3} \text{ m}^3$

Donc la masse est de :

Masse :  $m=10.93 \text{ Kg}$

Il est encadré par des fers plats.

### 4.2.3 Calcul du ressort

Fixé sur l'empennage et la nacelle, le ressort sert à la régulation du système. Nous allons déterminer les caractéristiques physiques et mécaniques.

Notons que la vitesse normale de notre système est obtenue pour des vitesses de vent allant jusqu'à 8 m/s.

A la vitesse de 8 m/s, notre ressort doit opposer une résistance de façon à compenser les moments créés par la force de Betz à l'axe de régulation.

Des essais ont montré que pour une surface métallique plane perpendiculaire au, la pression de l'air est en effet donnée en fonction de la vitesse du vent par

$$p = 1.25 * v^2$$

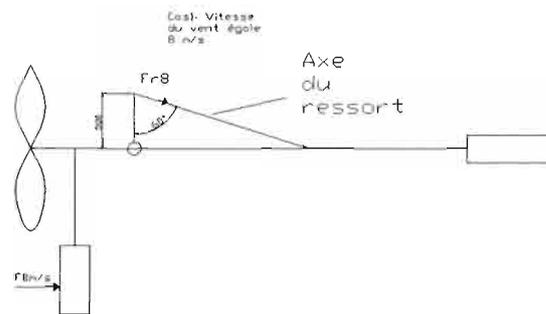
Donc à 8 m/s, on a :

$$P = 1.25 * 8^2 = 80 \text{ N} / \text{m}^2$$

$$F = P \times S = 0.68335 * 80 = 54.668 \text{ N}$$

$$\text{Donc } F_{8\text{m/s}} = 54.668 \text{ N}$$

La distance entre le centre de gravité de la plaque latérale et l'axe de l'hélice est prise égale à 3 m



La force développée dans le ressort est-elle qu'aucun moment n'existe au point O.

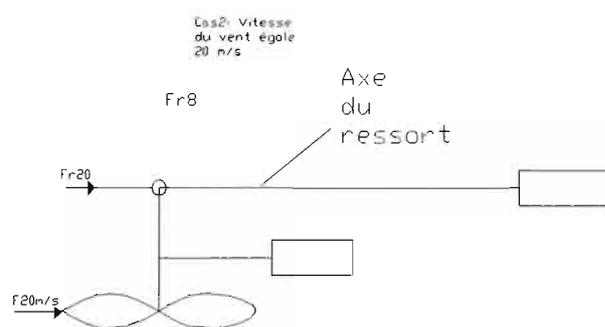
$$\Sigma M_o = 0 = 54.668 \times 3 - Fr_8 \cdot \sin 60^\circ \times 0.5$$

$$Fr_8 = \frac{54.668 \times 3}{0.5 \cdot \sin 60^\circ} = 378.75 N$$

La longueur du ressort est de :

$$L_8 = \frac{500}{\cos 60^\circ} = 577.35 mm$$

Dans une seconde approche, nous considérons qu'à une vitesse de 20 m/s, notre système doit se mettre complètement en drapeau pour parer à d'éventuelles vibrations et au dépassement des limites de la pompe.



La longueur du ressort est de :

$$L_{20} = 866.03 + 500 = 1366.03 mm$$

L'énergie cinétique du vent en unité de pression s'exprime par la relation

$$E_c = \rho V^2 / 2$$

Avec  $\rho$  air à 20°C égale 1.17 kg/m<sup>3</sup>

$$E_c = 1.17 \times 20^2 / 2 = 234 \text{ Pa}$$

Donc la force sur l'hélice est de :

$$F = P \times S = 16 \times 234 \times 0.68335 = 2558.46 \text{ N}$$

$$F_{20 \text{ m/s}} = 2558.46 \text{ N}$$

La force dans le ressort est donc égale à  $F_{20 \text{ m/s}}$

$$\text{Soit } F_{r20} = 2558.46 \text{ N}$$

#### 4.2.3.1 Raideur du ressort

Nous pouvons maintenant calculer la raideur du ressort.

On a :

$$\Delta L(20/8) = 1366.03 - 577.35 = 788.68 \text{ mm}$$

$$\Delta F_r(20/8) = 2558.46 - 378.75 = 2179.71 \text{ N}$$

La raideur est donc :

$$K = 2179.71 / 0.78868 = 2763.75 \text{ N/m}$$

#### 4.2.3.2 Longueur à vide

L'allongement causé à  $V=8\text{m/s}$  est de :

$$\Delta L(0/8) = 378.75 / 2763.75 = 0.137 \text{ m}$$

$$\text{Soit } L_0 = L_8 - \Delta L(0/8) = 577.35 - 137 = 440.3 \text{ mm}$$

$$L_0 = 440.31 \text{ mm}$$

#### 4.2.3.3 Autres caractéristiques du ressort

Pour un ressort dont les dimensions sont :

D : diamètre moyen = 20 mm

d : diamètre fil = 6 mm

L0 : longueur libre = 440.31 mm

NT : nombre de spires = 20

L'effort  $F_{r20}=2558.46$  N induit un cisaillement et des contraintes de flexion au crochet.

$$\tau = K_s \frac{8FD}{\pi D^3} = \frac{8FD}{\pi D^3} \left[ 1 + \frac{0.5}{C} \right]$$

Avec  $C = \frac{D}{d}$

$$\tau = \frac{4F}{\pi d^3} (2D + d) = \frac{4 * 2558.46}{\pi * 6^3} (2 * 20 + 6) = 693.73 \text{ MPa}$$

$$\sigma = Kb \frac{16FD}{\pi d^3} + \frac{4F}{\pi d^2}$$

Kb étant le rapport du rayon de courbure moyen sur le rayon à la fibre interne

Pour Kb=1.1

On a :

$$\sigma = 1.1 \frac{16 * 2558.46 * 20}{\pi 6^3} + \frac{4 * 2558.46}{\pi 6^2} = 1417.63 \text{ MPa}$$

Pour que notre ressort résiste à la fatigue, il faut que :

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

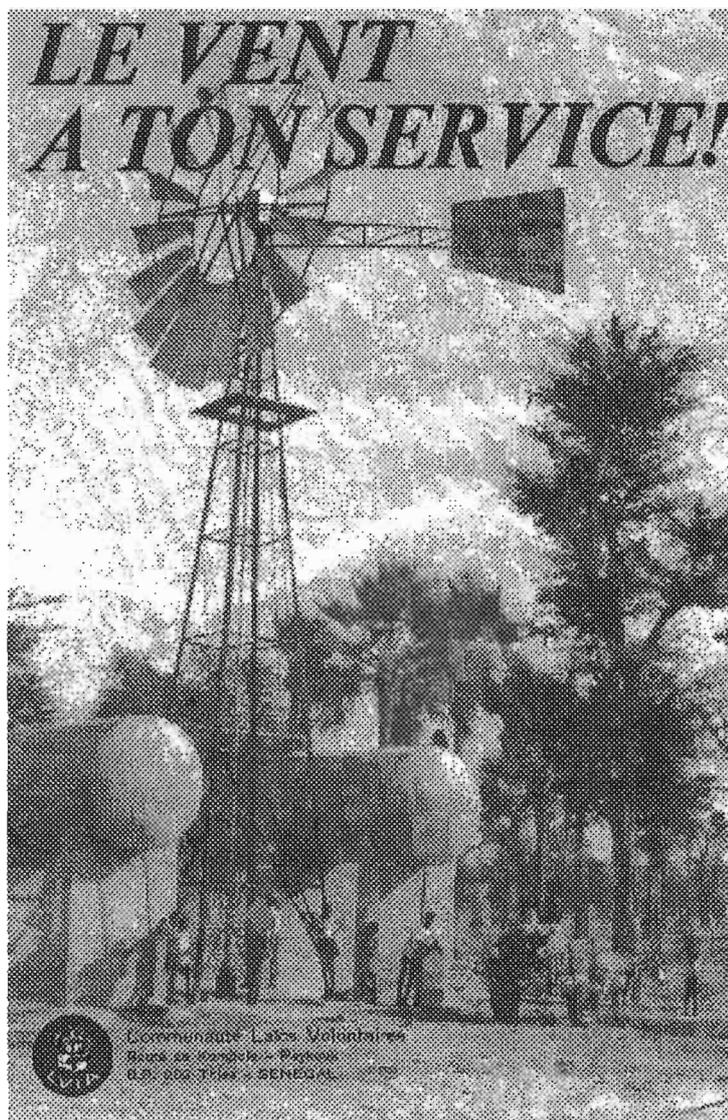
Donc notre ressort doit avoir les caractéristiques suivantes :

- Limite d'écoulement en cisaillement  $S_{sy} \geq 693.73 \text{MPa}$
- Limite d'écoulement en tension  $S_y \geq 1202.31 \text{MPa}$
- Limite ultime de rupture en tension  $S_{ut} \geq 1603.08 \text{MPa}$

## 5. Etude de la structure porteuse

### 5.1 Treillis actuel

Voici une photo représentant une vue d'ensemble de l'éolienne et sur laquelle on voit bien la structure du treillis actuellement en place



#### 5.1.1 Dimensions générales

La structure actuelle du pylône est composée de profilés en L de dimensions 80x4 pour les montants et 70x4 pour les traverses. La longueur des profilés est de 16 mètres maximum.

La hauteur du pylône est donc déterminée par la longueur maximale des barres.

En mesurant sur la photo, on trouve une surface au sol occupée par le pylône d'environ 3m70 x 3m70.

### **5.1.2 Conception**

Des traverses sont placées tous les 2m environ.

Sur les 4 premiers mètres ont également été placées des traverses « obliques ».

Pour renforcer la partie supérieure du pylône (au-delà de 5 mètres), on utilise des câbles.

## **5.2 Reconception du pylône**

### **5.2.1 Etude de différents autres pylônes**

Pour la conception du nouveau pylône, nous nous sommes inspirés de la structure des pylônes EDF (voir photo 2) et de celle d'une éolienne de pompage située à Bourogne

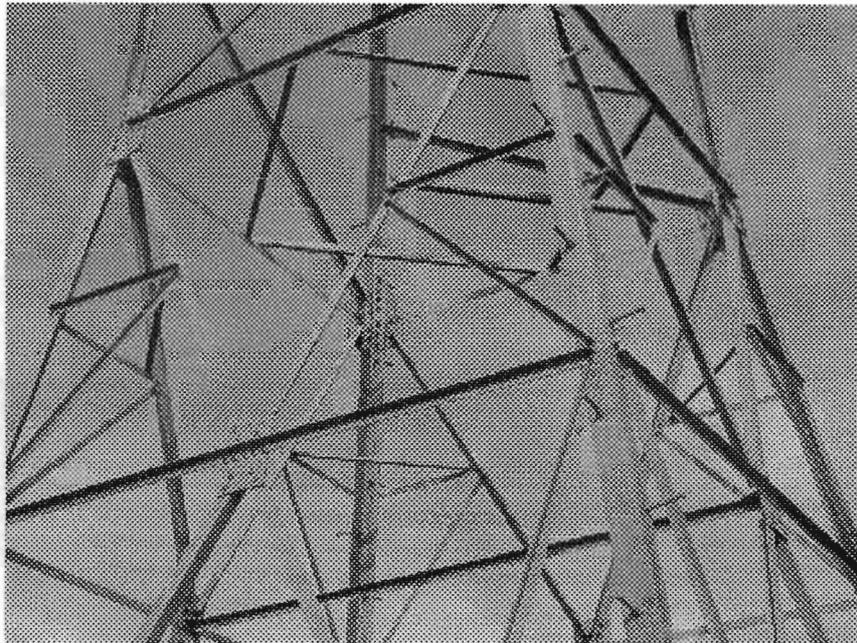


Photo 2

### 5.2.2 Le nouveau pylône

La tour ou support est un élément important pour notre installation. Il existe 2 types de supports:

- Un poteau portant à son sommet la machine. Il est rotulé au bas sur un socle en béton et soutenu par des câbles contre les coups de vent.
- Un treillis spatial constitué d'une structure de profilés liés par boulonnage ou soudage. La structure porte en sommet la machine et repose à sa base sur un socle en béton.

De manière générale, pour les éoliennes de pompage, le support est un treillis spatial pour plusieurs raisons:

- Facilité d'accès au moteur en cas de besoin de maintenance
- Résistance

### 5.3 Détails de calcul de la structure

Pour la construction de notre pylône, nous faisons l'étude sur un squelette constitué de profilés en L, à ailes égales (cornières).

A priori, nous retenons que notre structure est entièrement constituée de profilé L 45x45x5.

Selon la géométrie du pylône, il nous faudra une longueur de profilés ainsi répartie.

- Colonnes  $14.11\text{m} \times 4 = 64.44\text{m}$
- Traverses  $(0.35+0.85+1.4+1.75+2.2+2.65+3.15)*4 = 49.4\text{ m}$
- Diagonales  $(3.5+3.2+2.8+2.5+2.3+2)*2*4 = 130.4\text{ m}$
- Echelle  $14.5*2+0.2*45 = 38\text{ m}$

Ce qui donne une longueur totale de: **L total = 282.24 m**

Le profilé de notre pré dimensionnement a les caractéristiques suivantes:

- Poids linéaire: 0.033 kN/m
- Section  $A = 425\text{ mm}^2$
- Rayon de giration:  $r = 13.3\text{ mm}$

### **5.3.1 Efforts externes**

#### **5.3.1.1 Poids total**

##### ► Structure

le poids de la structure est égal à:

$$0.033*282.24 = 9.314\text{ kN}$$

donc  **$P_s = 9.314 \text{ kN}$**

Pour les besoins de nos calculs, nous considérons le poids de l'échelle et le poids de la moitié de la structure:

$$P_s = 0.033 * \left( \frac{244.24}{2} + 38 \right) = 5.284 \text{ kN}$$

► Machine et accessoires

nous supposons que nous pouvons installer sur le pylône une machine d'environ 400 Kg, donc on a:

$$P_m = 400 * 9.81 = 3924 \text{ N}$$

Soit:  **$P_m = 3.924 \text{ kN}$**

Donc le poids mort total est de:

$$P_{tot} = P_s + P_m = 9.314 + 3.924$$

Soit  **$P_{tot} = 13.238 \text{ kN}$**

### 5.3.1.2 Sur l'hélice

Nous évaluons les efforts les plus élevés qui puissent s'appliquer sur l'hélice:

Pour cela, nous prenons la vitesse la plus élevée qui susceptible de se produire dans notre région.

Dans notre pays, on n'assiste pas à des ouragans mais il peut se produire de violentes tempêtes; donc pour être sécuritaire, nous utilisons une vitesse maximale de:

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

qui correspond dans l'échelle Beaufort à de violentes tempêtes.

Ainsi, à partir de la théorie de BetZ, nous pouvons donc déterminer la force exercée par le vent sur notre hélice.

$$F_{\max} = \frac{4}{9} \rho S V^3$$

avec:

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

$$V = \text{vitesse du vent} = 30 \text{ m/s}$$

S = surface balayée par l'hélice

$$S = \pi D^2/4$$

Or nous disposons d'une roue de diamètre D = 6m

$$S = 9\pi \text{ m}^2$$

$$\text{Donc } F_{\max} = \frac{4}{9} * 1.25 * 9 * \pi * 30^2$$

$$\text{Soit } F_{\max} = 14.137 \text{ kN}$$

### 5.3.1.3 Effet du vent sur la structure

Selon le code national du bâtiment canadien, nous pouvons déterminer la traînée sur notre structure.

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

avec:

k = coefficient de réduction de la ferme

$C_{n\infty}$  = coefficient de traînée de la ferme

$q$  = pression de référence (dynamique) due au vent

$C_g$  = coefficient de rafale

$C_e$  = coefficient d'exposition

$A_s$  = surface occupée par les profilés sur une face

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

$$\text{On a: } A = \frac{3.7 * 16}{2} = 29.6 \text{ m}^2$$

$$A_s = (16.11 * 2 + 12.35 + 32.6) * \frac{45}{1000} = 3.473 \text{ m}^2$$

◆ Coefficient de traînée et de réduction

$$C_{n\infty} = 1.8$$

$$k = 1$$

◆ Pression de référence

$$q = C.V^2$$

avec

$V$  = vitesse de référence à 10m au-dessus du sol ( $V=108\text{km/h}$ )

$$C = 50.10^{-6}$$

$$\text{Donc: } q = 50.10^{-6} * 108^2 = 0.583 \text{ kN/m}^2$$

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

◆ Coefficient de rafale et d'exposition

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

$$C_g = 2$$

$$C_e = 1.1$$

pour une hauteur  $h=16\text{m}$

Ainsi, sur la face directement attaquée, la charge du vent est de:

$$Q_1 = 1 * 1.8 * 583.2 * 2 * 1.1 * 3.473 = 8020.78 \text{ N}$$

Or le vent attaque deux faces: celle qui est directement opposée et celle située derrière la première.

Selon la norme canadienne, la face marquée subit 90% de la pression exercée sur première face:

$$\text{Soit } Q_2 = 0.9 * 8020.78 = 7218.72 \text{ N}$$

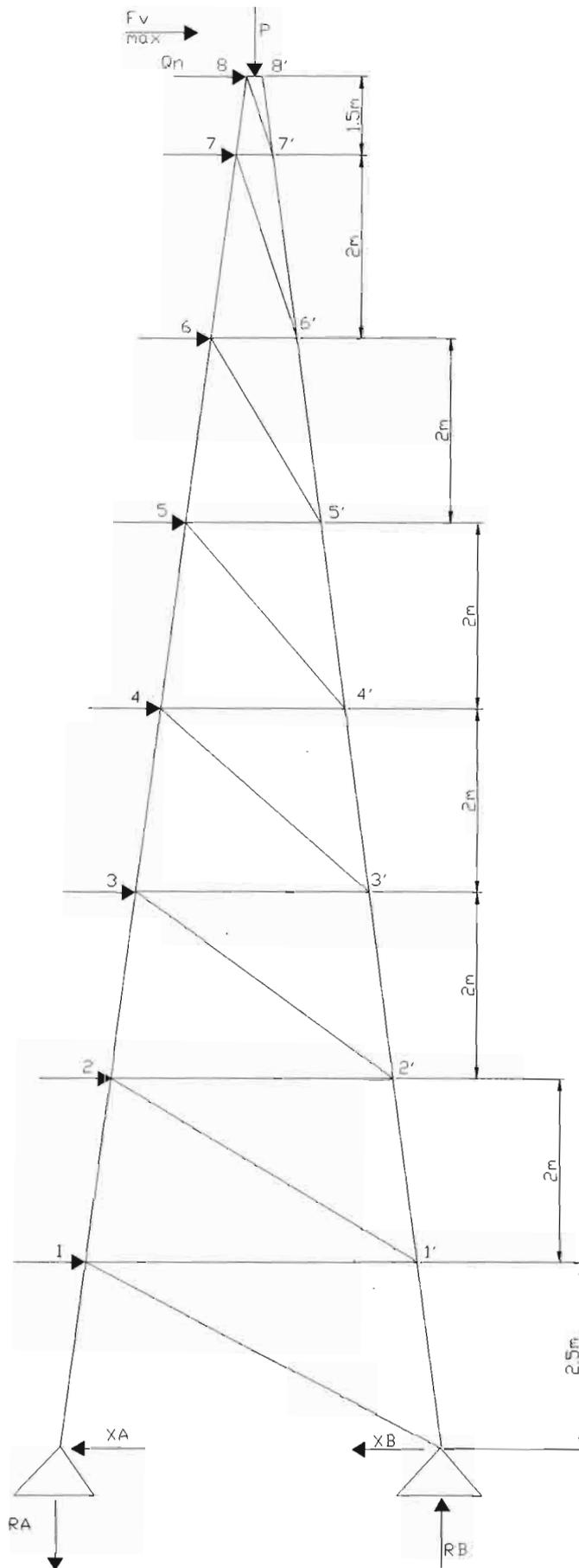
D'où on obtient un effort maximum du vent sur la structure de:

$$Q_v = Q_1 + Q_2 = 15239.50 \text{ N}$$

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

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

$$Q_n = \frac{15239.50 * 1}{2 * 8} = 952.47 \text{ N}$$



### 5.3.2 Réactions aux appuis

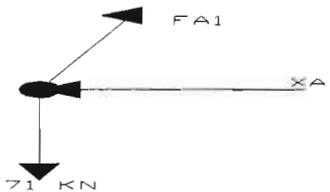
$$\Sigma M_A = 0 = 13.238 * 1.85 + 14.137 * 16 + 7.62 * 8 - RB * 3.70$$

$$RB = 84.23 \text{ kN}$$

$$\Sigma F_y = 0 = RB - RA - P \text{ d'où } RA = RB - P$$

$$RA = 71 \text{ kN}$$

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



$$\text{On a: } 0.95 * FA1 = 71$$

$$FA1 = 70.645 \text{ kN}$$

$$XA = 7.029 \text{ kN}$$

$$XB = 14.728 \text{ kN}$$

### 5.3.3 Efforts internes

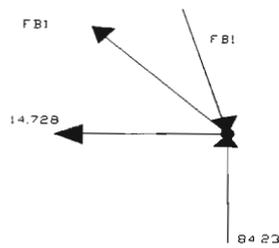
Nous procédons aux calculs des efforts dans les membrures par la méthode des nœuds:

Chaque nœud isolé devra satisfaire à l'équilibre statique.

✓ Nœud A

$$FA1 = 70.645 \text{ kN}$$

✓ Nœud B



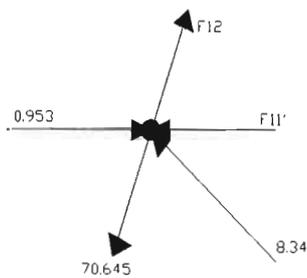
$$0.995 \cdot FB1' + 0.581 \cdot FB1 = 84.23$$

$$0.0995 \cdot FB1' + 0.814 \cdot FB1 = 14.728$$

$$FB1' = 79.78 \text{ kN}$$

$$FB1 = 08.34 \text{ kN}$$

✓ Nœud 1



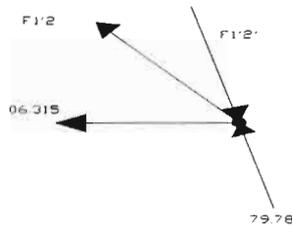
$$0.995 \cdot F12 + 0.581 \cdot 8.34 - 70.645 \cdot 0.995 = 0$$

$$F11' - 0.0995 \cdot F12 - 0.953 + 0.814 \cdot 8.34 + 0.0995 \cdot 70.645 = 0$$

$$F12 = 65.78 \text{ kN}$$

$$F11' = 06.315 \text{ kN}$$

## ✓ Nœud 1'



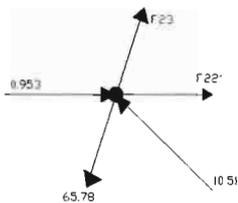
$$0.995 \cdot F1'2' + 0.64 \cdot F1'2' = 79.38$$

$$0.0995 \cdot F1'2' + 0.76 \cdot F1'2' = 15.25$$

$$F1'2' = 73.02 \text{ kN}$$

$$F1'2' = 10.51 \text{ kN}$$

## ✓ Nœud 2



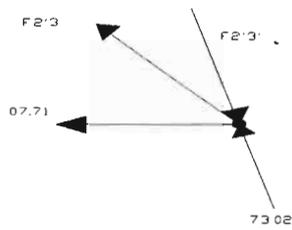
$$0.995 \cdot F23 + 0.64 \cdot 10.51 - 0.995 \cdot 65.78 = 0$$

$$F22' + 0.953 - 65.78 + 0.0995 - 0.76 \cdot 10.51 + 0.0995 \cdot F23 = 0$$

$$F23 = 59.02 \text{ kN}$$

$$F22' = 7.71 \text{ kN}$$

✓ Nœud 2'



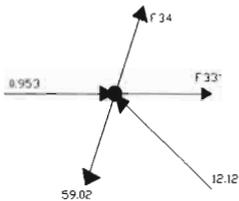
$$0.995 \cdot F2'3' + 0.707 \cdot F2'3 = 72.66$$

$$0.0995 \cdot F2'3' + 0.707 \cdot F2'3 = 14.98$$

$$F2'3' = 64.41 \text{ kN}$$

$$F2'3 = 12.12 \text{ kN}$$

✓ Nœud 3



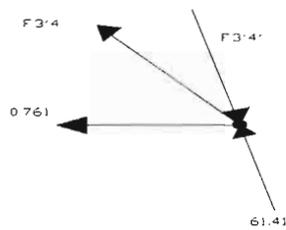
$$0.995 \cdot F34 + 0.707 \cdot 12.12 - 0.995 \cdot 59.02 = 0$$

$$F33' + 0.953 - 59.02 \cdot 0.0995 - 0.707 \cdot 12.12 + 0.0995 \cdot F34 = 0$$

$$F34 = 50.41 \text{ kN}$$

$$F33' = 0.761 \text{ kN}$$

✓ Nœud 3'



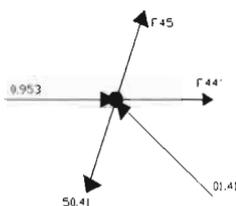
$$0.995 \cdot F_{3'4'} + 0.78 \cdot F_{3'4} = 0.995 \cdot 61.41$$

$$0.0995 \cdot F_{3'4'} + 0.62 \cdot F_{3'4} = 0.761 + 61.41 \cdot 0.0995$$

$$F_{3'4'} = 60.31 \text{ kN}$$

$$F_{3'4} = 0.141 \text{ kN}$$

✓ Nœud 4



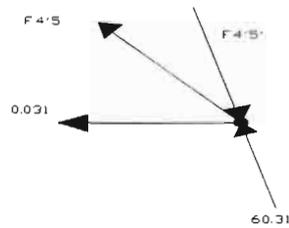
$$0.995 \cdot F_{45} + 0.78 \cdot 0.141 - 0.995 \cdot 50.41 = 0$$

$$F_{44'} + 0.953 - 50.41 \cdot 0.0995 - 0.62 \cdot 0.141 + 0.0995 \cdot F_{45} = 0$$

$$F_{45} = 49.31 \text{ kN}$$

$$F_{44'} = 0.031 \text{ kN}$$

## ✓ Nœud 4'



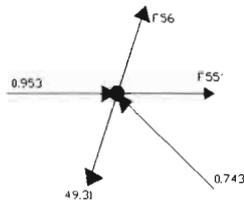
$$0.995 \cdot F4'5 + 0.837 \cdot F4'5 = 0.995 \cdot 60.31$$

$$0.0995 \cdot F4'5 + 0.514 \cdot F4'5 = 0.071 + 60.31 \cdot 0.0995$$

$$F4'5 = 59.67 \text{ kN}$$

$$F4'5 = 0.745 \text{ kN}$$

## ✓ Nœud 5



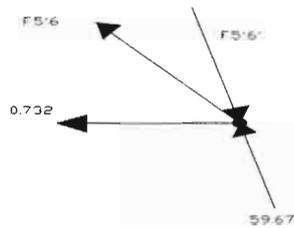
$$0.995 \cdot F56 + 0.587 \cdot 0.745 - 0.995 \cdot 49.31 = 0$$

$$F55' + 0.953 - 50.41 \cdot 0.0995 - 0.514 \cdot 0.745 + 0.0995 \cdot F56 = 0$$

$$F56 = 50.97 \text{ kN}$$

$$F55' = 0.732 \text{ kN}$$

✓ Nœud 5'



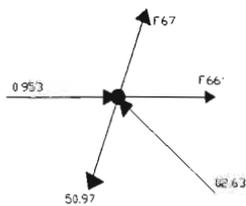
$$0.995 \cdot F5'6 + 0.928 \cdot F5'6 = 0.995 \cdot 59.67$$

$$0.0995 \cdot F5'6 + 0.371 \cdot F5'6 = 0.732 + 59.67 \cdot 0.0995$$

$$F5'6 = 57.22 \text{ kN}$$

$$F5'6 = 0.63 \text{ kN}$$

✓ Nœud 6



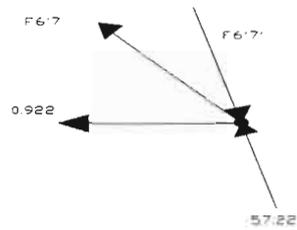
$$0.995 \cdot F67 + 0.928 \cdot 2.63 - 0.995 \cdot 50.97 = 0$$

$$F66' + 0.953 - 50.97 \cdot 0.0995 - 0.62 \cdot 2.63 + 0.0995 \cdot F67 = 0$$

$$F67 = 48.52 \text{ kN}$$

$$F66' = 0.922 \text{ kN}$$

✓ Nœud 6'



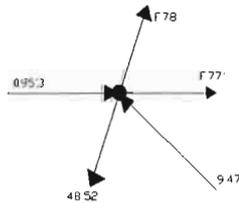
$$0.995 \cdot F6'7' + 0.986 \cdot F6'7 = 0.995 \cdot 57.22$$

$$0.0995 \cdot F6'7' + 0.196 \cdot F6'7 = 0.922 + 57.22 \cdot 0.0995$$

$$F6'7' = 47.84 \text{ kN}$$

$$F6'7 = 09.47 \text{ kN}$$

✓ Nœud 7



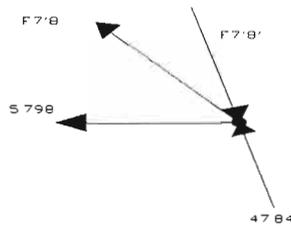
$$0.995 \cdot F78 + 0.928 \cdot 9.47 - 0.995 \cdot 48.52 = 0$$

$$F66' + 0.953 - 48.52 \cdot 0.0995 - 0.62 \cdot 9.47 + 0.0995 \cdot F78 = 0$$

$$F78 = 39.69 \text{ kN}$$

$$F77' = 05.80 \text{ kN}$$

✓ Nœud 7'



$$0.995 \cdot F7'8' + 0.986 \cdot F7'8 = 0.995 \cdot 47.84$$

$$0.0995 \cdot F7'8' + 0.196 \cdot F7'8 = 5.798 + 47.84 \cdot 0.0995$$

$$F7'8' = 11.15 \text{ kN}$$

$$F6'7 = 59.53 \text{ kN}$$

### 5.3.4 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 dû à la charge du vent:  
 $14.137 \cdot 16 + 7.624 \cdot 8 = 287.184 \text{ kN.m}$
- Moment dû au poids mort:  $5.284 \cdot 1.85 = 09.775 \text{ kN.m}$

D'où  $\Sigma M_A = 296.96 \text{ kN.m}$

$$\alpha_R = \frac{287.184}{296.6} \cdot 1.5 + \frac{9.78}{296.6} \cdot 1.25$$

$$\alpha_R = 1.49$$

### 5.3.5 Résistance

L'étude de la résistance de notre tour relève de l'étude des éléments constituants. Nous allons calculer les états limites pour faire la vérification de notre profilé.

Nous prenons à priori de l'acier G40.21M 300W avec:

- $F_y=300$  MPa: Limite d'écoulement
- $F_u=450$  MPa: Limite ultime de rupture en tension

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{F_y}} = \sqrt{\frac{235}{300}} = 0.885$$

et

$$\frac{C}{t_f * \varepsilon} = \frac{40}{5 * 0.885} = 9.04 < 10$$

D'où on a un en L45x45x5 300W de classe 1

Pour assurer la facteur de sécurité de notre structure, nous pondérons les charges effectives sur nos membrures tel que:

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

Avec  $\alpha_R=1.49$

### 5.3.5.1 Résistance à la traction

La section sollicitée à la traction est de:

$$A_n = 45 * 5 + 40 * 5$$

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

On a:

$$F_y = 300 \text{ Mpa}$$

$F_u = 450 \text{ Mpa}$

Selon le code canadien, la résistance pondérée de l'acier (à la traction) peut de trouver selon l'expression:

$$Tr = \min(\phi * An * F_y, 0.85 * \phi * An * F_u)$$

$$\phi * An * F_y = 0.9 * 425 * 300 * 10^{-3} = 114.75 \text{ kN}$$

$$0.85 * \phi * An * F_u = 0.85 * 425 * 450 * 10^{-3} = 146.31 \text{ kN}$$

d'où

$$\mathbf{Tr = 114.75 \text{ kN}}$$

Or pour les éléments tendus dans notre structure, la membrure la plus sollicitée est (A-1) avec:

$$\mathbf{FA1 = 70.645 \text{ kN}}$$

Notre vérification portera donc sur cet élément seul dont la sollicitation pondérée est de:

$$F_{\max}(A-1) = 1.5 * 70.645 = 105.97 \text{ kN}$$

En faisant la comparaison avec la résistance pondérée, on voit que:

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

Donc, notre profilé résiste bien à la traction.

### 5.3.5.2 Résistance à la compression

Chaque nœud de notre structure constitue une rotule, nos éléments sont donc birotulés.

Soient:

$K=1$  facteur d'appui

$C_r$  = résistance d'un élément en compression

$C_f$  = sollicitation en compression

✓ *Élément B-1'*

Longueur de l'élément:  $L=2.4875$  m

$$\text{On a: } \lambda = \frac{KL}{r} \sqrt{\frac{S_y}{\pi^2 E}}$$

$$\frac{kL}{r} = \frac{1 * 2.4875}{13.8 * 10^{-3}} = 180.25$$

Avec la figure 14.22, on obtient la contrainte axiale maximale :

$$S_a = 33 \text{ MPa}$$

$$\text{D'où } C_r = 33 * 425 * 10^{-3} = 14.025 \text{ kN}$$

$$C_f = 1.5 * F_{B1'} = 1.5 * 79.78 = 119.67 \text{ kN}$$

$$C_r < C_f$$

L'élément flambe

Notre élément ne résiste pas à sa charge, nous allons donc essayer de voir quel serait le comportement d'une section  $L \times 60 \times 60 \times 8$  en acier G 40.21M, dont  $A=896 \text{ mm}^2$  et  $r=25.55 \text{ mm}$ . Aussi le système d'assemblage réduit la longueur de l'élément B1' à la moitié de la longueur initiale soit  $L=1.244$  m.

On a:

$$\frac{kL}{r} = \frac{1 * 1.244}{25.55 * 10^{-3}} = 48.68$$

Avec la figure 14.22, on obtient la contrainte axiale maximale :

$$S_a = 150 \text{ MPa}$$

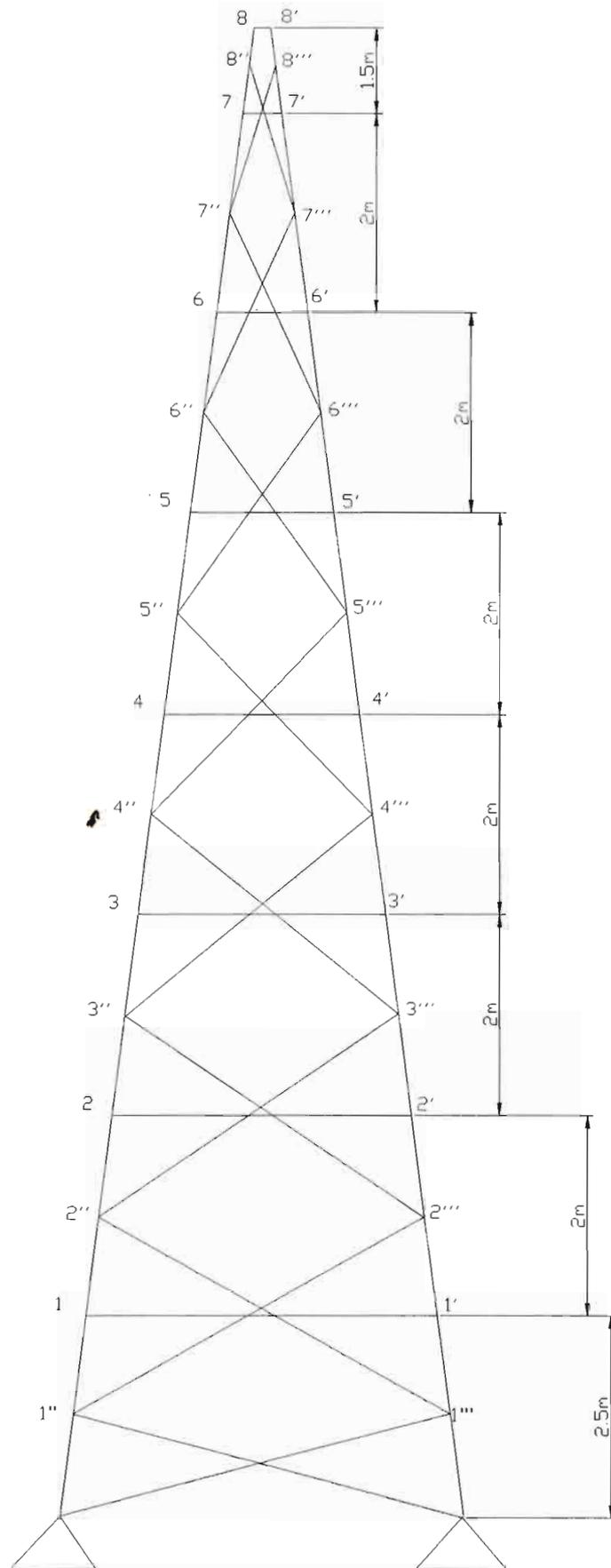
$$\text{D'où } C_r = 150 * 896 * 10^{-3} = 134.4 \text{ kN}$$

$$C_f = 1.5 * F_{B1'} = 1.5 * 79.78 = 119.67 \text{ kN}$$

$$C_r > C_f$$

L'élément résiste bien au flambage.

De même tous les autres éléments 1'2', 2'3', 3'4', 4'5', 5'6', 6'7', 7'8', seront réduits de moitié pour bien supporter les charges qui pourraient leur être appliquées et seront constitués de profilés L\*60\*60\*8 en acier G 40.21M.



Nouveau système de montage de la tour

Puisque la direction du vent change, les éléments soumis à la traction peuvent se retrouver soumis à la compression et inversement, il convient de faire de nos quatre poteaux de profilés de même type et de même résistance.

✓ *Elément B-1''*

Nous maintenons les éléments diagonaux dans le même profilé, le même matériau : L45x45x5 G40 M78 :

Longueur de l'élément :

$$L = \sqrt{(1.237^2 + 3.58^2)} = 3.788 \text{ m}$$

$$\lambda = \frac{KL}{r} * \sqrt{\frac{S_y}{\pi^2 * E}} = \frac{1 * 3.788}{13.8 * 10^{-3}} * \sqrt{\frac{300}{\pi^2 * 20000}} = 3.384$$

on a :

$$2 < \lambda < 3.6$$

d'où

$$C_r = \phi A F_y (0.009 + 0.877 \lambda^{-2}) = 0.9 * 428 * 10^{-6} * 300 * 10^6 * (0.009 + \frac{0.877}{3.384^2})$$

$$C_r = 9.89 \text{ kN}$$

$$C_f = F \max(B-1'') = 1.5 * 8.34 = 12.51 \text{ kN}$$

A la comparaison de la résistance de l'élément à la compression :

$$C_r < C_f$$

Notre élément ne résiste pas à sa charge, nous allons donc essayer de voir quel serait le comportement d'une section Lx55x55x5 en acier G 40.21M dont  $A=525 \text{ mm}^2$  et  $r=17 \text{ mm}$ .

$$\lambda = \frac{KL}{r} * \sqrt{\frac{S_y}{\pi^2 * E}} = \frac{1 * 3.788}{17 * 10^{-3}} * \sqrt{\frac{300}{\pi^2 * 200000}} = 2.747$$

$$C_r = \phi A F_y (0.009 + 0.877 \lambda^{-2}) = 0.9 * 525 * 10^{-6} * 300 * 10^6 * (0.009 + \frac{0.877}{2.747^2}) = 17.75$$

$C_r = 17.75 \text{ kN}$

on a :

$$C_r > C_f$$

Donc notre élément résiste bien au flambage

✓ *Elément 1''2''*

L'élément est un profilé L55x55x5 G40 21M dont la longueur est  $L=4.08 \text{ m}$ .

$$\lambda = \frac{KL}{r} * \sqrt{\frac{S_y}{\pi^2 * E}} = \frac{1 * 4.08}{17 * 10^{-3}} * \sqrt{\frac{300}{\pi^2 * 200000}} = 2.9587$$

on a :

$$2 < \lambda < 3.6$$

d'où

$$C_r = \phi A F_y (0.009 + 0.877 \lambda^{-2}) = 0.9 * 525 * 10^{-6} * 300 * 10^6 * (0.009 + \frac{0.877}{2.9587^2}) = 15.477$$

kN

$$Cr=15.477 \text{ kN}$$

$$Cf=F \max(1'2)=1.5*08.34=15.765 \text{ kN}$$

$$Cr < Cf$$

Notre élément ne résiste pas à sa charge, nous allons donc essayer de voir quel serait le comportement d'une section Lx55x55x en acier G 40.21M dont  $A=620 \text{ mm}^2$

$$Cr = \phi A F_y (0.009 + 0.877 \lambda^{-2}) = 0.9 * 620 * 10^{-6} * 30010^6 * (0.009 + \frac{0.877}{2.9587^2}) = 20.308$$

$$Cr=20.308 \text{ kN}$$

$$Cr > Cf$$

Donc notre élément résiste bien au flambage

### **5.3.6 Conclusion**

Il s'agit donc de faire le choix définitif de nos profilés et de spécifier les détails de construction essentiels.

#### **5.3.6.1 Choix des profilés**

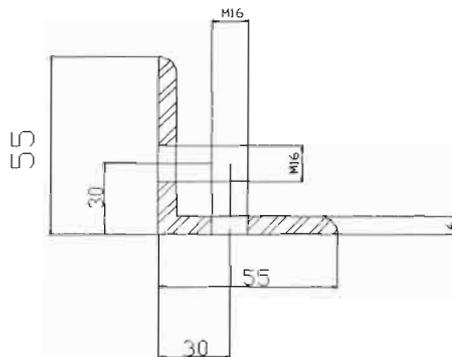
En fonction du profilé calculé, on va choisir le profilé le plus proche et qui existe dans le marché pour une éventuelle étude financière. Ainsi, nous recommandons les profilés suivants :

- L60x60x8 G 40 21M78 pour les colonnes
- L55x55x6 G 40 21M78 pour les diagonales et les barres

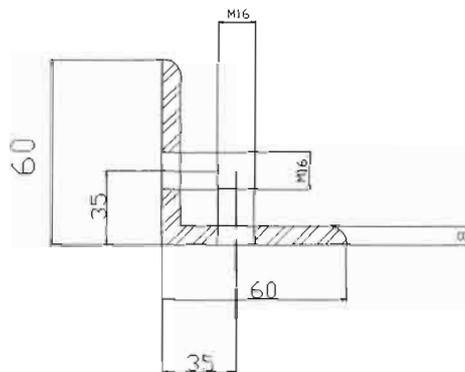
### 5.3.6.2 Le montage des profilés

Le montage se fera par des boulons pour avoir un coût plus faible une grande facilité de démontage.

- L55x55x6



- L60x60x8



## **6. Etude du freinage de l'éolienne**

### **6.1 Fonction à réaliser**

#### **6.1.1 Analyse de l'existant**

L'éolienne SELMEG ne dispose pas d'un système de freinage pour arrêter complètement la rotation de l'hélice. En cas de maintenance, pour arrêter l'hélice, un ouvrier monte sur l'éolienne et attache rigidement l'hélice sur la nacelle. Ceci après avoir mis complètement l'hélice en drapeau.

Pour diverses raisons (sécurité en particulier), on a décidé de mettre en place un système de freinage qui permet d'arrêter complètement la machine au moment voulu.

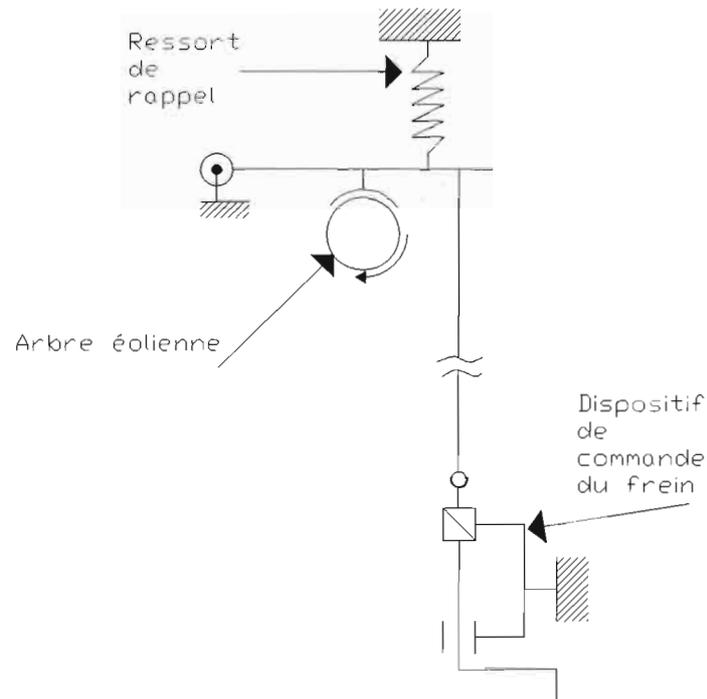
### **6.2 Conception du nouveau frein**

#### **6.2.1 Objectifs**

Il s'agit aussi de réussir à concevoir un nouveau système qui soit simple à réaliser, moins complexe sans augmenter le prix de revient et tout aussi efficace.

Nous allons utiliser un frein à sabot qui sera placé sur l'arbre de l'hélice, dans la nacelle et qui sera commandé au pied de l'éolienne par l'intermédiaire d'un câble.

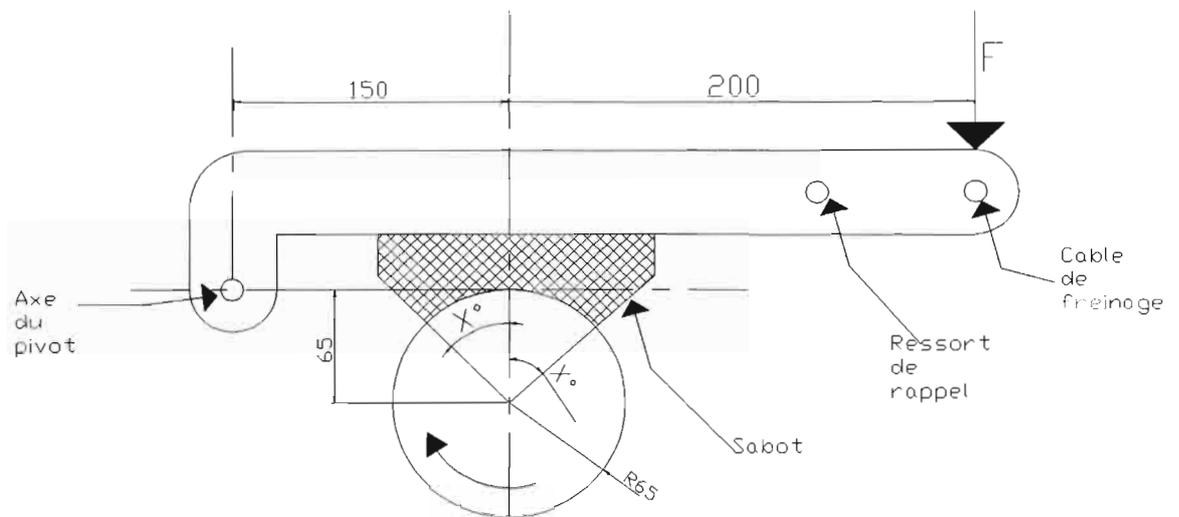
#### **6.2.2 Principe de fonctionnement**



Se trouvant au pied de l'éolienne, l'opérateur fait tourner la manivelle qui par l'intermédiaire du câble va transmettre l'effort de serrage au bras de levier. Ce dernier étant rigidement lié au sabot va transmettre l'effort de serrage à l'arbre de l'éolienne qui va voir sa vitesse diminuer jusqu'à s'annuler.

Pour libérer l'éolienne, l'opérateur fait tourner la manivelle dans le sens inverse et le ressort de rappel tire sur le levier pour libérer l'arbre qui va reprendre son mouvement de rotation.

### 6.2.3 Dimensionnement du frein

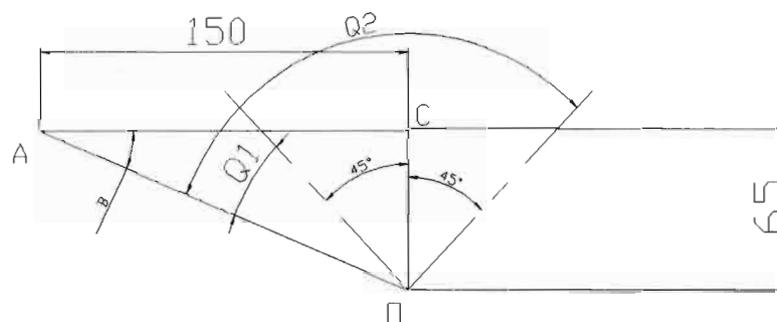


La garniture du sabot étant en amiante moulé et l'arbre en acier, la pression maximale est de  $P_a = 1 \text{ MPa}$  (tableau 13.1 de la page 303, *Éléments de machines*).

Le coefficient de frottement est de  $f = 0.40$

La température maximale :  $T_{\text{max}} = 150^\circ\text{C}$

Calculons la force maximale qui peut être appliquée et le couple maximal de freinage.



On prend  $X = 45^\circ$

d'après la figure, on a :

$$OA = \sqrt{150^2 + 65^2} = 163.48 \text{ mm} = a$$

Dans le triangle AOC, on a :

$$\beta = \arctg \frac{65}{150} = 23.43^\circ$$

$$\gamma = 90^\circ - \beta = 90^\circ - 23.43^\circ = 66.65^\circ$$

d'où

$$\theta_1 = \gamma - 45^\circ = 66.65^\circ - 45^\circ = 21.57^\circ$$

$$\theta_2 = 90^\circ + \theta_1 = 90^\circ + 21.57^\circ = 111.57^\circ$$

### 6.2.3.1 Calcul de la largeur du sabot

L'équation 13.38 de la page 283 (Eléments de machines) nous donne :

$$T = fpabr^2 \frac{(\cos\theta_1 - \cos\theta_2)}{\sin\theta a}$$

avec :

T : couple freinage = 341.1 N.m (cette valeur est calculée par les camarades belfortains).

f : coefficient de frottement = 0.40

pa : pression maximale = 1 MPa

r : rayon de l'arbre = 65 mm

$\theta a = 90^\circ$  car le sabot est long

d'où on tire la valeur de la largeur du sabot :

$$b = \frac{T \sin\theta a}{fpa r^2 (\cos\theta_1 - \cos\theta_2)}$$

$$b = \frac{341.1 * \sin 90^\circ}{0.40 * 1000000 * 0.065^2 * (\cos 21.57^\circ - \cos 111.57^\circ)} = 0.156m$$

$$b=377 \text{ mm}$$

La largeur est trop grande.

Calculons avec  $X=30^\circ$

D'où

$$\theta_1 = \gamma - 30^\circ = 66.65^\circ - 30^\circ = 36.65^\circ$$

$$\theta_2 = 90^\circ + \theta_1 = 90^\circ + 36.65^\circ = 126.65^\circ$$

$$b = \frac{341.1 * \sin 126.65^\circ}{0.40 * 1000000 * 0.065^2 * (\cos 36.65^\circ - \cos 126.65^\circ)} = 0.116m$$

$$b=116 \text{ mm}$$

Cette valeur est acceptable

Donc la largeur du frein sera de **b=116 mm**

### 6.2.3.2 Calcul de la force maximale F

Le moment causé par la force normale est donné par l'équation 13.31 de la page 282 (Eléments de machines) :

$$Mn = \frac{pa * b * r * a}{4 \sin \Theta a} [2(\Theta_2 - \Theta_1) - \sin 2\Theta_2 + \sin 2\Theta_1]$$

avec  $a=OA=163.48 \text{ mm}$

$$Mn = \frac{1000000 * 0.116 * 0.065 * 0.16348}{4 * \sin 126.65^\circ} \left[ 2 * \left( \frac{\pi}{2} \right) - \sin (253.3^\circ) + \sin (73.3^\circ) \right] = 1942 \text{ N.m}$$

Le moment causé par la force de frottement est donné par 13.32c de la page 282 (Eléments de machines) :

$$M_f = \frac{f * p a * b * r}{4 \sin \Theta} \left[ 2r(\cos \Theta_1 - \cos \Theta_2) - a(\sin^2 \Theta_2 - \sin^2 \Theta_1) \right]$$

$$M_f = \frac{0.4 * 1000000 * 0.116 * 0.065}{1.605} [2 * 0.20528 - 0.16348 * 0.28] = 685.48 N.m$$

La rotation du tambour se faisant dans le sens des aiguilles d'une montre, l'équation 13.31 de la page 282 (Eléments de machines) nous donne:

$$F = \frac{M_n - M_f}{c}$$

avec :

$$c = 150 + 200 = 350 \text{ mm}$$

$$F = \frac{1942 - 685.48}{350 \cdot 10^{-3}} = 3590 N$$

Donc la force maximale de serrage pour ne pas dépasser la pression permise est de :

$$\mathbf{F_{max} = 3590 N}$$

### 6.2.3.3 Propriétés de masse du frein

Ces résultats sont donnés par SolidWorks.

Système de coordonnées de sortie : -- par défaut --

Masse = 32420.91 grammes

Volume = 4353975.22 millimètres cube

Superficie = 373720.01 millimètres carrés

Centre de gravité: ( millimètres )

$$X = 6.45$$

$$Y = 118.24$$

$$Z = 0.18$$

Axes d'inertie principaux et moments d'inertie principaux: ( grammes \* millimètres carrés)

$$I_x = (0.99, 0.13, -0.00) \quad P_x = 91064616.42$$

$$I_y = (-0.13, 0.99, -0.03) \quad P_y = 435389047.46$$

$$I_z = (-0.00, 0.03, 1.00) \quad P_z = 448680413.75$$

Moments d'inertie: ( grammes \* millimètres carré )

Pris au système de coordonnées de sortie.

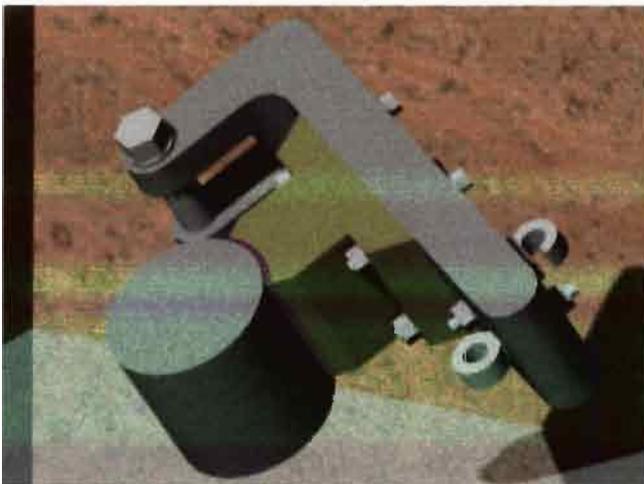
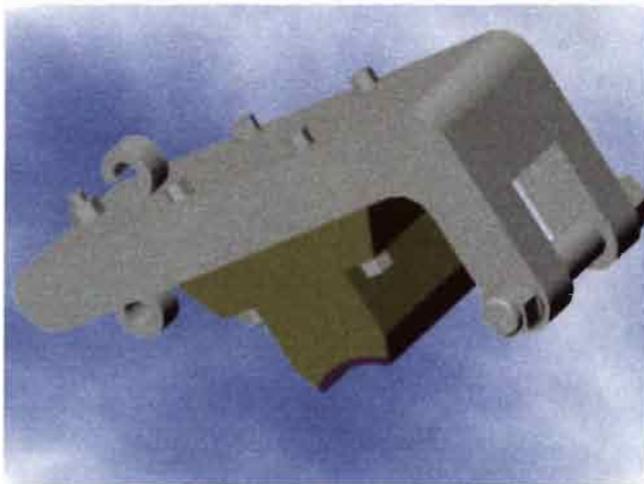
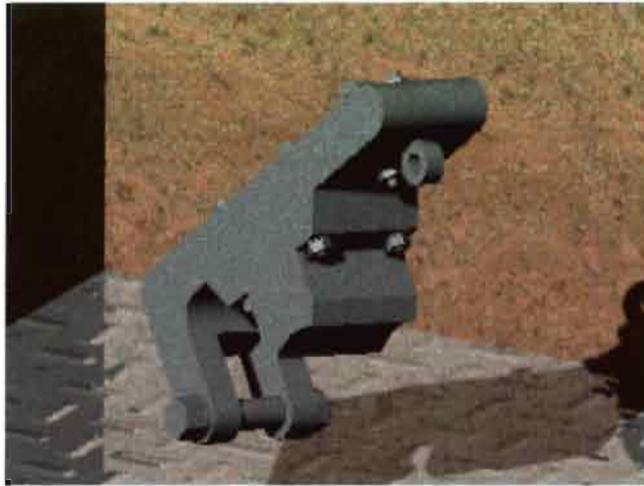
$$I_{xx} = 550504410.07 \quad I_{xy} = -20848154.07 \quad I_{xz} = 924946.72$$

$$I_{yx} = -20848154.07 \quad I_{yy} = 430612406.29 \quad I_{yz} = 1223279.08$$

$$I_{zx} = 924946.72 \quad I_{zy} = 1223279.08 \quad I_{zz} = 903311315.98$$

### 6.2.4 Le frein obtenu

Après conception, voici les images SolidWorks du frein obtenu.



### **6.2.5 Le câble de frein**

Vérifions le comportement d'un fil souple de diamètre  $d=6$  mm.

La limite d'écoulement  $S_y=400$  MPa

Calculons la contrainte dans le câble :

$$\sigma = \frac{F}{S}$$

donc la contrainte maximale dans le câble est de :

$$\sigma_{\max} = \frac{F_{\max}}{S} = \frac{F_{\max}}{\frac{\Pi d^2}{4}} = \frac{3590}{2.83 \cdot 10^{-5}} = 126.97 \text{ MPa}$$

on a :

$$\sigma_{\max} < S_y$$

donc notre câble résiste bien à la traction

La longueur du câble est de :  $L=16$  m

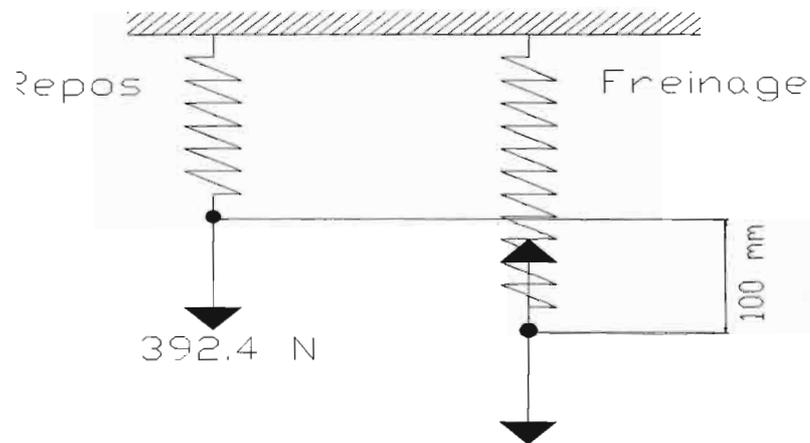
La masse linéique est de 217.7 g/m

Soit une masse totale de 3.48 kg

### 6.2.6 Calcul de la raideur du ressort de rappel

Au repos (sans freinage), le ressort de rappel n'est soumis qu'au poids du câble et du frein.

Le poids total étant de 352.22 N, on prend volontairement 392.4 N soit pour une masse de 40 kg



On a :

$$K = \frac{F}{\Delta L}$$

$$\Delta L = \Delta L_{\max} = 100 \text{ mm}$$

d'où

$$K = K_{\min} = \frac{F}{\Delta L_{\max}}$$

$$K_{\min} = \frac{392.4}{0.1} = 3924$$

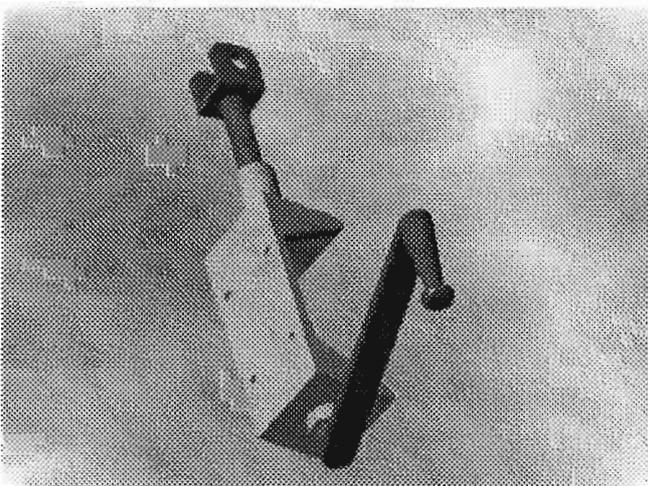
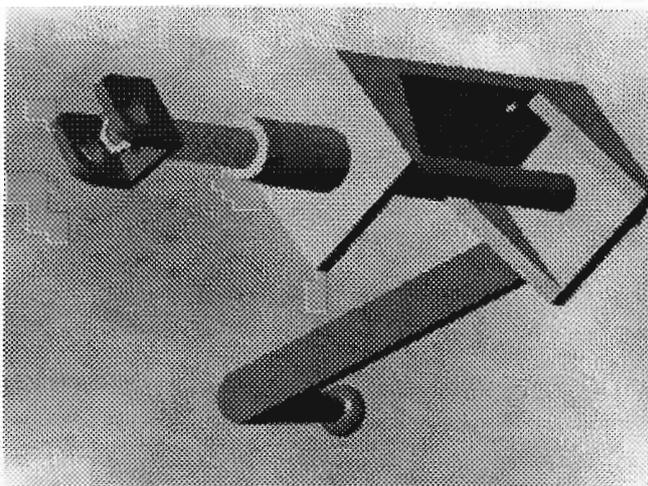
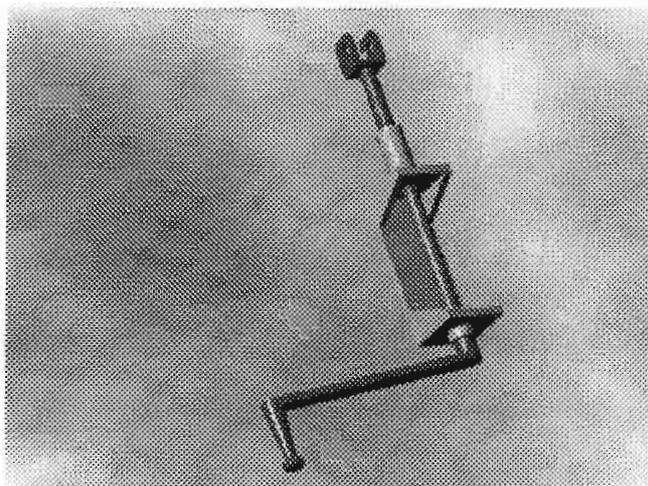
$$K_{\min} = 3924 \text{ N/m}$$

Donc on a :

$$K > 3924 \text{ N/m}$$

### 6.2.7 La commande du frein

Le frein est commandé par une manivelle (système vis écrou) se trouvant au pied de l'éolienne. Elle est fixée sur un poteau du treillis par des boulons M12.



## **RESULTATS OBTENUS**

Les principaux gains réalisés lors de cette reconception se situent au niveau du nombre de pièces économisées dans la réalisation de l'éolienne.

En effet on passe d'une cinquantaine de pièces sur l'éolienne SELMEG à 41 pièces différentes sur l'éolienne SHADOK v2.

Etant donné que le nombre de pièces a été réduit et que des process de fonderie ont été utilisés en lieu et place d'usinage coûteux, on peut affirmer que notre éolienne sera moins chère que l'éolienne SELMEG de départ.

Un gain d'ordre matériel pour la société SELMEG est la liasse de plans papier et numérique d'une qualité autre que ceux réalisés à la main.

## CONCLUSION GENERALE

Cette étude nous a permis de grouper deux actions : la conception d'un produit et la découverte de l'ingénierie simultanée ainsi que la chaîne XAO intégrée.

La vision humanitaire du projet a été un plus lors de la réalisation de l'étude.

Un certain nombre de problèmes ont été rencontré :

Le début du projet était plus consacré à la recherche de l'Internet et à la compréhension du fonctionnement de l'ACSP qu'au démarrage proprement dit de l'étude.

Certaines phases du projet n'ont pas pu être réalisées (estimation des coûts, ...) du fait de l'absence d'informations (ou de la difficulté à les obtenir).

La société SELMEG (SSM) n'a pas été très active durant le projet.

Quelques retards mineurs ont été pris, en raison de l'impossibilité à se connecter à l'ACSP d'un serveur distant (ou à la difficulté de télécharger des fichiers de grandes tailles) ou de la difficulté de communiquer avec les acteurs de l'UTBM.

Néanmoins, ce projet est une bonne base pour réaliser une conception poussée d'éolienne de pompage. Le projet sous sa forme actuelle reste le débroussaillage d'une étude pouvant être approfondie à l'aide d'informations supplémentaires.

## BIBLIOGRAPHIE

- Cours: l'énergie nouvelle et renouvelable de M. Pape Mody NDIAYE
- Livre : ENERGIE EOLIENNE - Désiré LE GOURIERES - Théorie, Conception et Calcul pratique des installations – Editions EYROLLES (1981).
- Livre : ELEMENTS DE MACHINES -
- Livre : RESISTANCE DES MATERIAUX – André BAZERGUI.
- Livre : CONSTRUCTION METALLIQUE – Traité de Génie Civil Volume 10 – Manfred A. Hirt, Rolf Bez.
- PFE : Cheikh Tidiane SAKHO – Juin 1982
- PFE : René NDOUR – Juin 1978.

Livre: WINDERKRAFTANLAGEN - Erich HAU - éditions SPRINGER (1996).

Sites Internet:

<http://www.alizes-eole.com/senegal/>

<http://www.eole.org/>

<http://www.espace-eolien.fr/>

<http://www.inti.be/ecotopie/eole.html>

<http://users.skynet.be/bemco/index.html>

<http://users.swing.be/compagnons-eole/eole/index.htm>

<http://www.uqar.quebec.ca/chaumel/planseoliens.htm>

## **ANNEXES**

Nous trouverons en annexe :

- ❖ **Généralités sur les dispositifs de régulation et d'orientation.**
- ❖ **Les relevés météorologiques.**
- ❖ **La liasse de plans (CD ROM).**

## Généralités sur les dispositifs de régulations et d'orientation

### ▪ Dispositifs d'orientation

Les plus utilisés sont :

- L'empennage
- L'éolienne auxiliaire
- L'éolienne en aval du support
- Les dispositifs à servomoteur
- Les dispositifs manuels

#### ○ Empennage

Cette solution est utilisée principalement pour orienter des éoliennes lentes jusqu'à 6m de diamètre.

Pour que le fonctionnement soit satisfaisant, certaines conditions doivent être observées :

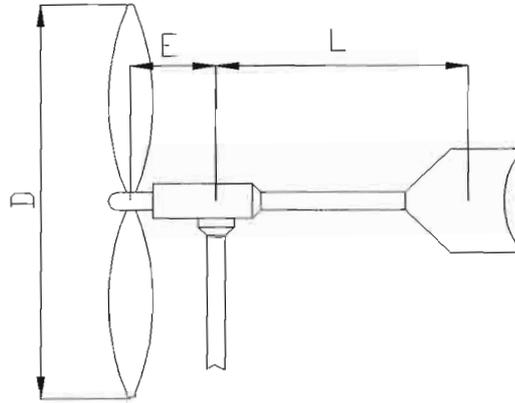


Figure 1

Si on donne à la distance entre l'axe d'orientation et le centre de l'empennage,  $L$  égale à  $4 E$ ,  $E$  désignant la distance entre l'axe d'orientation et le plan de rotation de l'hélice, la surface  $s$  e l'empennage doit avoir en fonction  $S$ , aire balayée par l'hélice, les valeurs suivantes :

Pour une éolienne multipale  $s = 0,10 S$  (notre cas)

Pour une éolienne bipale ou tripale  $s = 0,04 S$

Si  $L$  est différent de  $4 E$  les surfaces d'empennage qui assureront la stabilité seront calculées par les relations suivantes :

$$s = 0.40 S \frac{E}{L} \quad \text{pour une éolienne multipale}$$

$$s = 0.16 S \frac{E}{L} \quad \text{pour une éolienne rapide}$$

En pratique, non donne souvent à  $L$  une valeur voisine de  $0.6D$ .

○ Eolienne auxiliaire

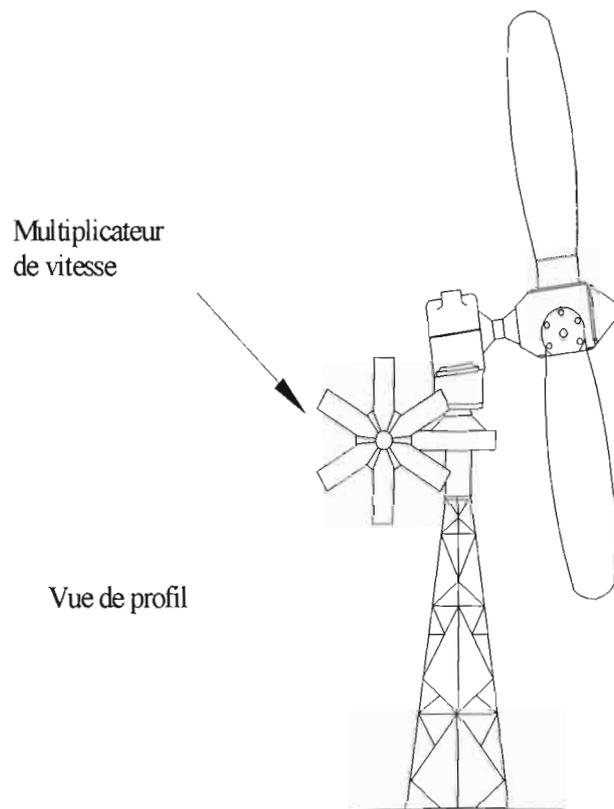


Figure 2

Le principe du système d'orientation est le suivant: On place sur le côté de l'axe de l'éolienne principale une ou deux petites éoliennes dont l'axe ou les axes de rotation sont perpendiculaires à celui de l'éolienne principale.

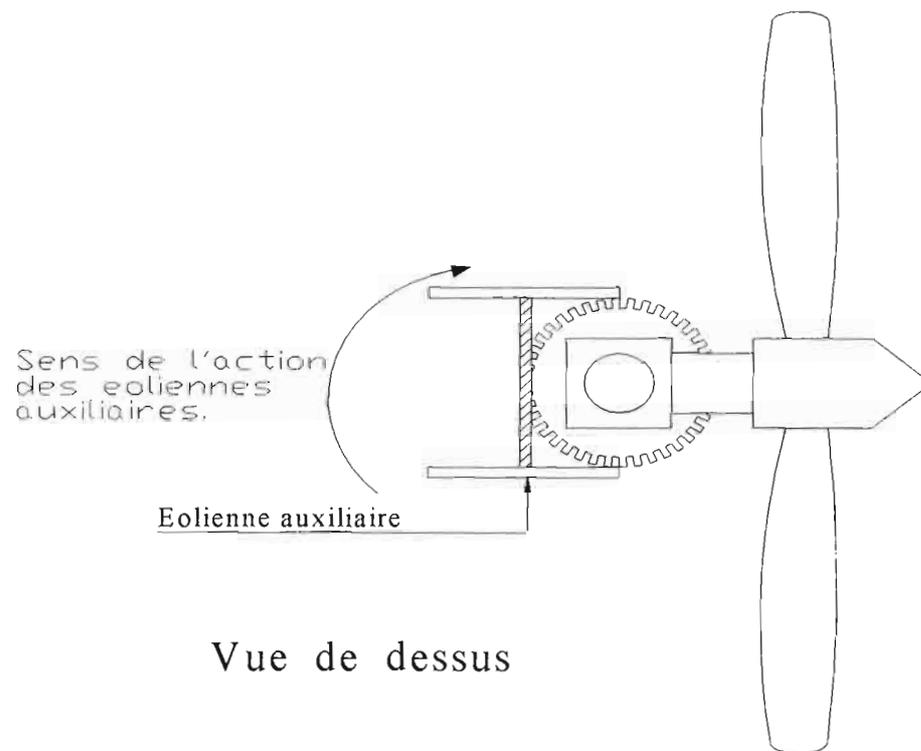


Figure 3

Si l'éolienne principale n'est pas dans le lit du vent, l'éolienne auxiliaire se met en marche en entraînant une vis sans fin qui engrène sur une couronne dentée, concentrique à l'axe du support et solidaire de celui-ci.

L'éolienne auxiliaire s'arrête lorsqu'elle reçoit le vent perpendiculaire à son axe. A ce moment, l'axe de l'éolienne principale est exactement dans le lit du vent. Bien entendu l'inclinaison des pales de l'éolienne auxiliaire doit être telle que la rotation autour de l'axe du support ait lieu dans le sens adéquat.

Précisons que l'orientation par éolienne auxiliaire est utilisée avec l'éolienne principale en amont ou en aval du support. Par rapport au système d'orientation utilisant un empennage le système d'orientation par éolienne auxiliaire présente l'avantage d'être plus progressif et sans-à-coups.

### ○ Eolienne auto-orientable

L'éolienne principale est placée à l'aval du support et s'oriente automatiquement dans le lit du vent comme une girouette. Des études sur ces types d'installations ont montré que pour un support de diamètre  $d=0,22D$ ,  $D$  étant le diamètre de l'éolienne, on observe des vibrations si le plan de l'hélice est à une distance  $x$  inférieure à :

0,25 -0,30D de l'axe du support.

### ○ Orientation par servomoteur

La figure ci dessous représente le schéma de principe d'un dispositif utilisant un servomoteur.

Le servomoteur d'orientation qui peut tourner dans les deux sens, est commandé par une girouette et par une dynamo tachymètre entraînée par l'éolienne.

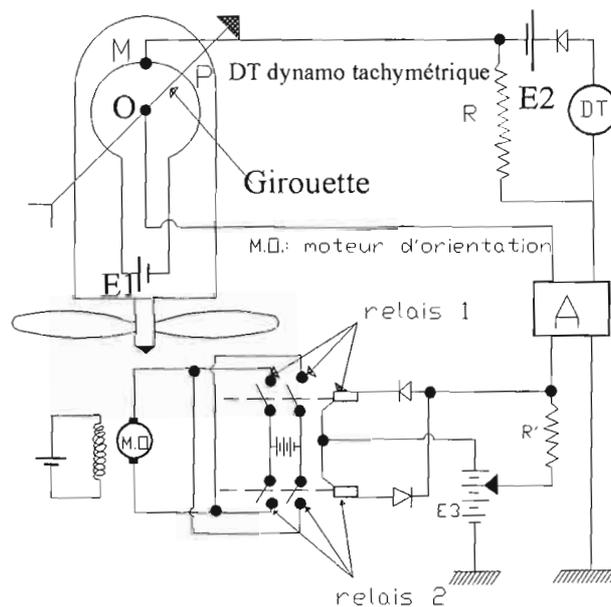


Figure 4

La girouette, fixée sur le corps de l'éolienne à l'amont de l'hélice, porte un bras conducteur qui se déplace sur un rhéostat horizontal solidaire du corps de l'éolienne. La d.d.p. entre le point milieu M de ce rhéostat et le bras conducteur est appliquée à travers une résistance R, à un amplificateur.

La dynamo tachymètre DT qui fournit une tension proportionnelle à la vitesse de rotation, alimente un circuit qui comporte la résistance R précédente, un redresseur et une batterie  $E_2$  placée en opposition.

Tant que la vitesse de l'hélice est inférieure à la vitesse nominale, la tension aux bornes de la dynamo tachymétrique est plus faible que la tension aux bornes de la batterie  $E_2$ . La dynamo ne débite aucun courant. La tension appliquée à l'entrée de l'amplificateur est donc celle qui existe entre le point M et le point P. Le moteur se met en route jusqu'à l'éolienne vienne exactement se placer dans la direction du vent.

Si la vitesse de l'éolienne est trop importante, la dynamo débite un courant qui provoque une chute de potentiel dans R. Le moteur d'orientation entre alors en action. L'axe de l'éolienne s'écarte du lit du vent jusqu'à ce que la somme d.d.p. aux bornes de R MP s'annulent. Il en résulte une limitation de la vitesse de rotation de l'éolienne par suite de la limitation de la surface offerte au vent;

Ce dispositif protège l'éolienne contre l'emballement deb la surpression ou de la réduction de la charge sur l'axe de l'hélice.

Pour éviter que le moteur d'orientation ne soit sollicité en permanence, la girouette liée rigidement au bras conducteur mais peut s'orienter de quelques degrés de part et d'autre sans que la direction de celui ci ne change grâce à un système de butées. C'est seulement lorsque l'écart entre la direction de l'arc de l'éolienne et celle du vent dépasse  $10^\circ$  environ que la girouette entraîne le bras conducteur.

### ▪ Dispositif de régulation

Pour de nombreuses utilisations il est souhaitable que la vitesse de l'éolienne reste relativement constante malgré la variation du vent. Dans ce but, on utilise des régulateurs de vitesse. Ces dispositifs servent aussi de limiteurs de puissance et d'effort sur les pales par grand vent.

On peut classer les solutions adoptées en deux catégories : régulation à pales fixes et régulation à pales orientables.

### ○ Régulation à pales fixes :

Plusieurs modèles ont été mis au point.

Nous citons :

- Les dispositifs à empennage articulé,
- Les dispositifs à empennage fixe et à axe de rotation inclinable,
- Les dispositifs à empennage rigide et frein aérodynamique.

#### ■ Dispositifs à empennage articulé

Pour éviter que la machine ne s'emballé, on provoque au fur et à mesure de l'accroissement de la vitesse du vent, une réduction de la surface offerte au vent par l'hélice par l'inclinaison de l'axe de celle-ci sur la direction du courant d'air (diminution du maître couple). La surface offerte au vent devient  $S \cos \phi$ ,  $S$  étant la surface balayée,  $\phi$  l'angle entre la normale au plan de l'hélice et la direction du vent.

Lorsque la vitesse atteint un certain seuil, l'hélice se met en drapeau.

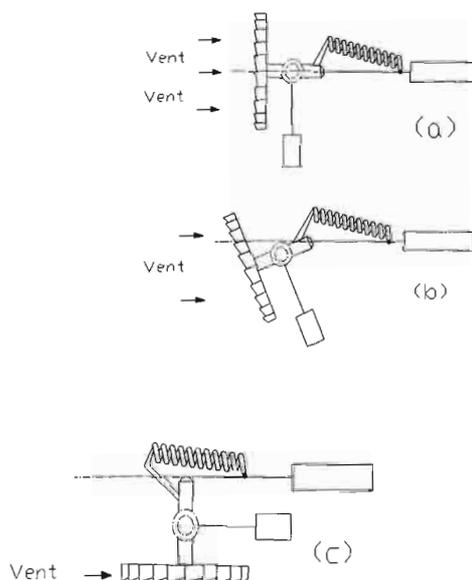
Cette réduction de vitesse et cette mise en drapeau peuvent être des deux dispositifs figurés ci-contre.

- 1<sup>er</sup> dispositif (fig. a,b,c)

L'action du vent agissant sur la plaque latérale liée rigidement au boîtier de l'hélice provoque l'inclinaison de l'axe de l'hélice sur la direction du vent.

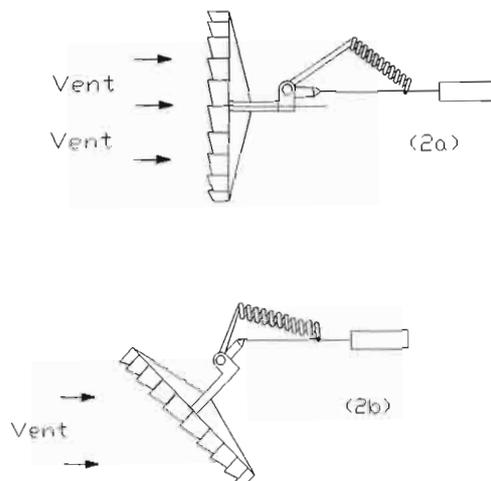
L'équipage s'immobilise dans une position telle que les moments dus aux forces s'exerçant sur la plaque latérale et le gouvernail arrière et le gouvernail arrière par rapport à l'axe du support s'équilibrent.

Pour éviter les à-coups, on monte parfois un amortisseur (d'automobile) sur l'articulation de l'empennage.



### 2ème dispositif (fig. 2a,2b,2c)

Le principe est identique mais n'utilise plus de plaque latérale. L'axe de la roue est excentré par rapport à l'axe du support. La poussée axiale a un moment non nul par rapport à l'axe d'orientation ; ce qui une réduction du flux d'air à travers l'éolienne et donc une diminution de la puissance développée. Ce dispositif est utilisé sur les machines de grand diamètre. Dans la mesure où l'angle  $\phi$  reste inférieur à  $30^\circ$ , la puissance varie proportionnellement au cube de la composante normale  $V_n$  de la vitesse du vent au plan de rotation, c'est à dire comme  $(V \cos \phi)^3$ .



2

### ▪ Dispositif à empennage fixe et axe de rotation inclinable

Par suite de la réduction de la surface offerte au vent qui est d'autant plus marquée que l'intensité du vent est élevée, la vitesse de rotation de l'éolienne se trouve limitée.

Ce dispositif est utilisé dans les éoliennes de production d'électricité de la compagnie américaine Dunnlite (Iowa - USA).

L'axe de rotation de l'éolienne et le générateur entraîné sont fixés sur une pièce métallique articulée autour d'un axe horizontal perpendiculaire au plan de symétrie de l'installation.

En régime normal, l'axe de rotation de l'éolienne et l'alternateur sont maintenus horizontaux. Mais lorsque l'intensité du vent augmente, l'axe de l'éolienne s'incline jusqu'à ce que le moment de la poussée axiale qui n'est pas nul par rapport à l'axe de basculement équilibre l'action du ressort et celle du poids de l'équipage hélice alternateur.

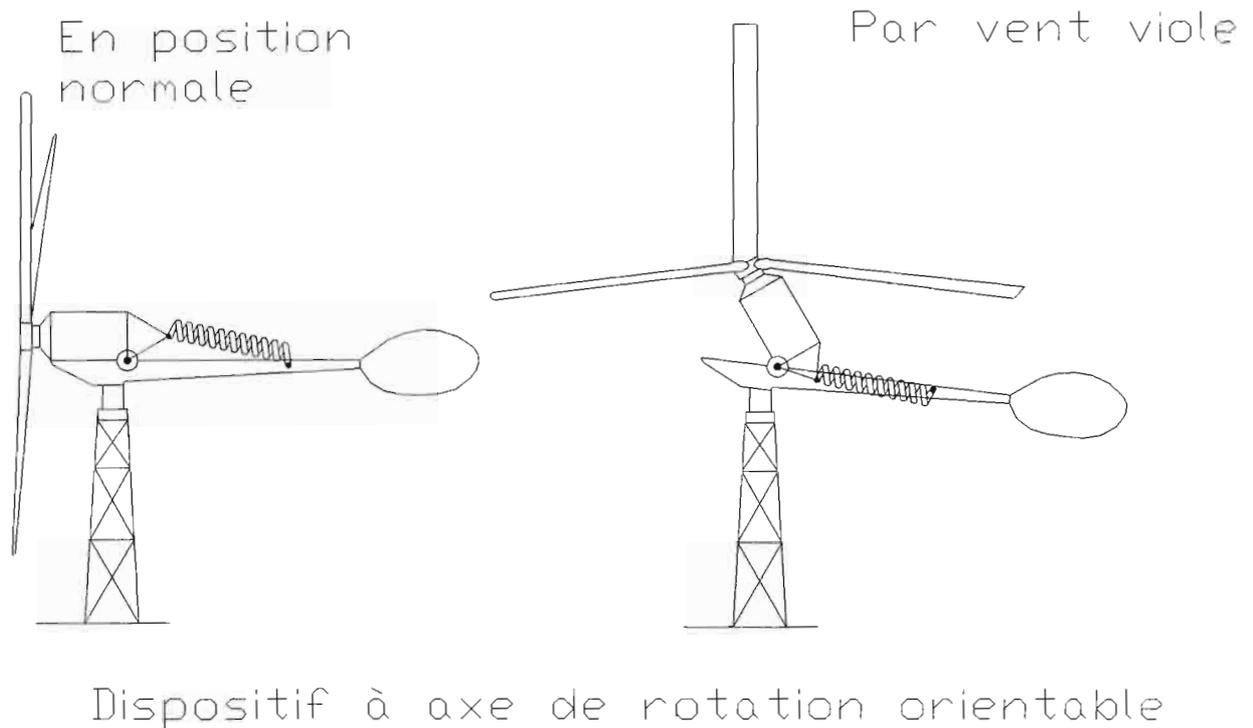


Figure 5

Par suite de la réduction de la surface offerte au vent qui est d'autant plus marquée que l'intensité du vent est élevée, la vitesse de rotation de l'éolienne se trouve limitée.

Le dispositif qui à l'avantage d'être simple est représenté sur la figure ci-dessus.

- Dispositif à empennage fixe et frein aérodynamique

#### ▣ Système Windcharger

C'est un système qui fonctionne sous l'action de la force centrifuge. Il est monté sur l'axe de l'hélice.

Il est constitué par deux plaques courbées, articulées sur des bras diamétralement opposés calés à  $90^\circ$  par rapport à l'hélice supposé bipale. La partie avant des palettes plus lourde et plus longue que la partie arrière, est reliée à un ressort;

Si la vitesse est inférieure à 8,5 m/s, le régulateur n'intervient pas, les palettes étant maintenues en position concentrique par des ressorts.

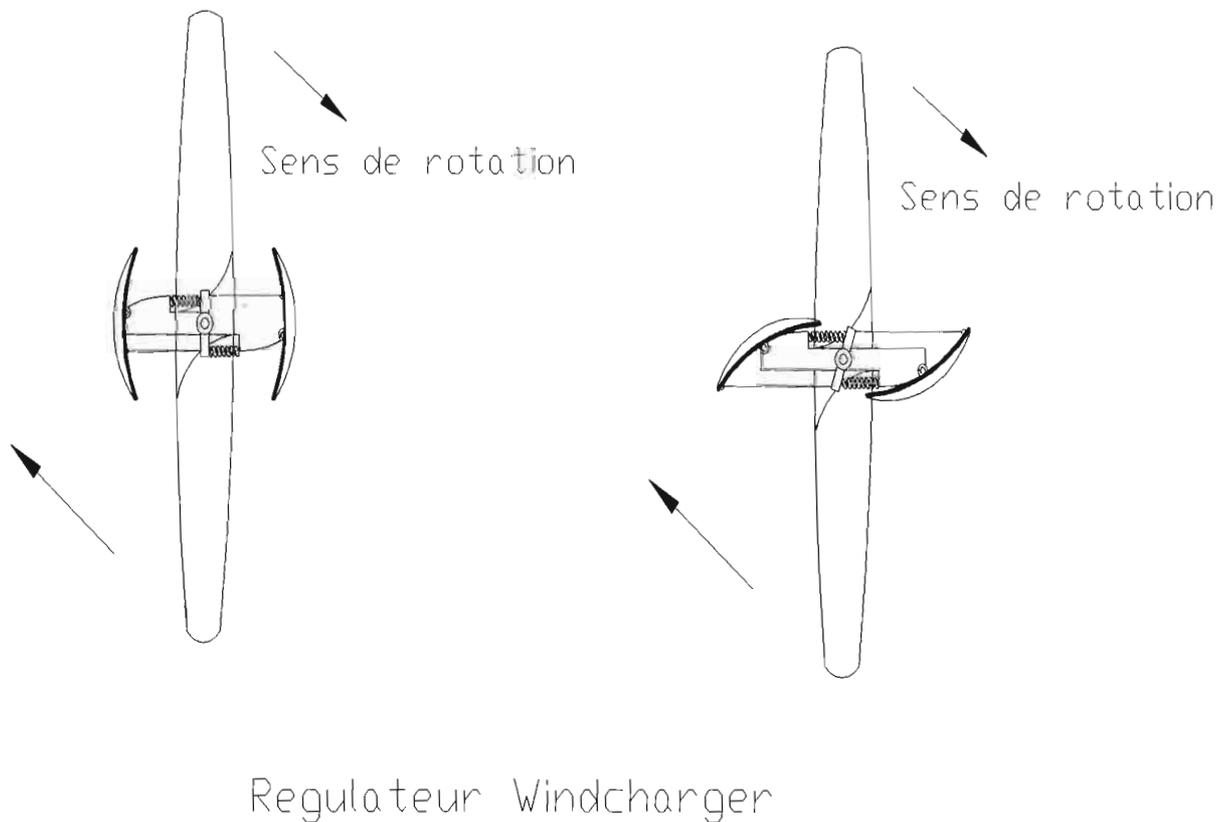


Figure 6

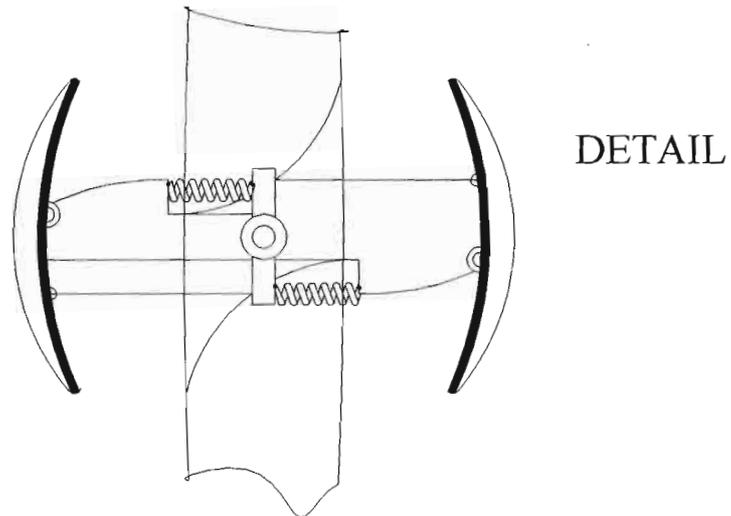


Figure 7

Lorsque la vitesse du vent dépasse 8,5m/s, les ailerons du régulateur s'ouvrent automatiquement sous l'action de la force centrifuge; La pression de l'air qui vient s'exercer aussi renforce l'effet de cette dernière; L'ensemble agit comme un frein aérodynamique et maintient la vitesse constante. Si la vitesse de rotation décroît la pression du vent sur les palettes diminuent. L'action des ressorts l'emporte; Les palettes se rapprochent de la position initiale et l'effet du freinage s'en trouve réduit.

■ Régulateur Paris-Rhône

Le régulateur est constitué par une hélice secondaire que l'on fixe sur l'hélice principale.

L'hélice secondaire qui est large assure le démarrage de l'éolienne et le freinage de l'ensemble si le vent est trop fort. Chaque pale de l'hélice secondaire est montée sur un axe qui coulisse à l'intérieur d'un tube. L'axe est traversé par une goupille qui s'insère d'abord dans la rampe hélicoïdale fixe creusée dans le tube précédant puis dans une des rampes portées par la douille mobile qui entoure celui-ci.

Cette douille mobile a pour but d'obliger les pales de l'hélice secondaire à être toujours symétriques.

Lorsque la vitesse du vent n'est pas trop élevée, les pales de l'hélice secondaire sont maintenues près de l'axe par action de deux ressorts placés symétriquement. Le couple fourni par l'hélice secondaire est alors moteur.

A partir d'une certaine vitesse sous l'effet de la force centrifuge, les pales du régulateur s'écartent de l'hélice principale. Leur sens de rotation autour de l'axe propre est tel que leur angle de calage s'annule puis devient négatif. Le couple qui était moteur aux faibles vitesses s'annule d'abord puis se transforme en couple résistant. Le frein aérodynamique empêche l'installation de s'emballer.

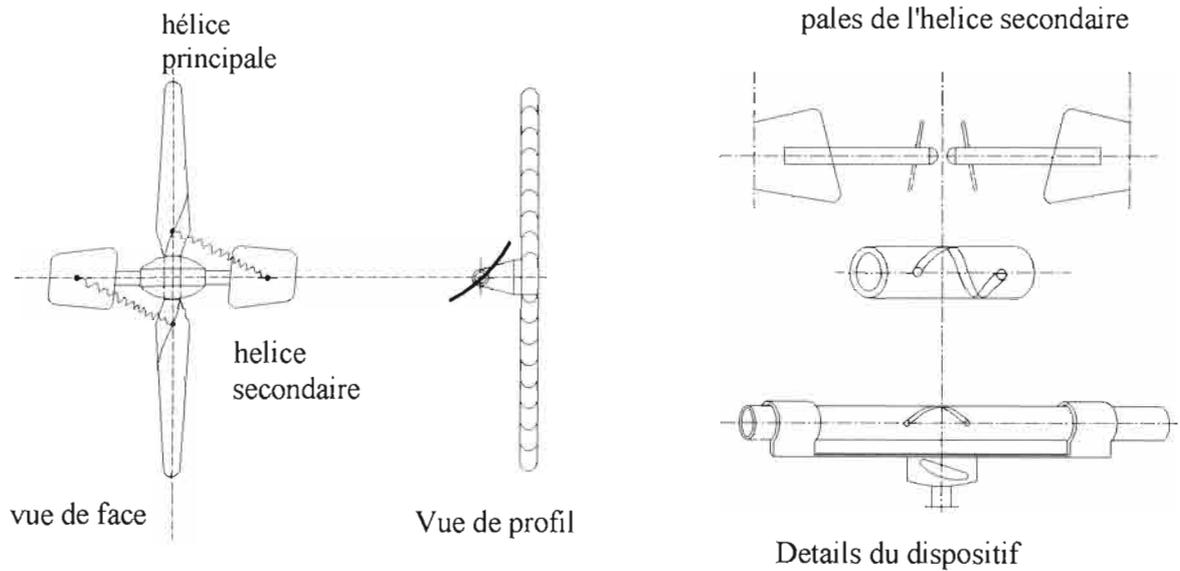


Figure 8

#### ■ Régulateur aérodynamo

Les pales de l'hélice principale portent à leurs extrémités une palette qui vient, aux vitesses normales, s'appuyer sur une butée. Lorsque le vent est violent, la palette dont la partie avant est plus longue, décolle de la butée et tourne autour de son axe, sous l'effet de la force centrifuge, venant ainsi de freiner la rotation de l'éolienne.

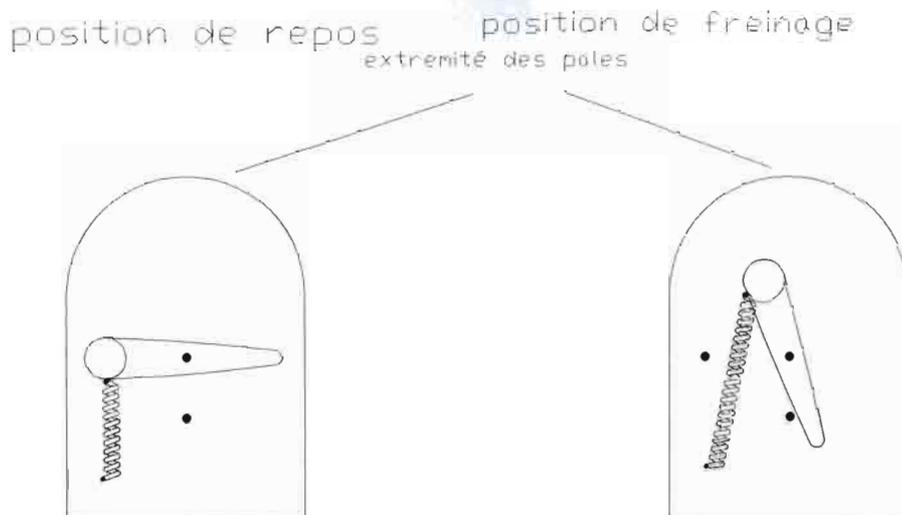
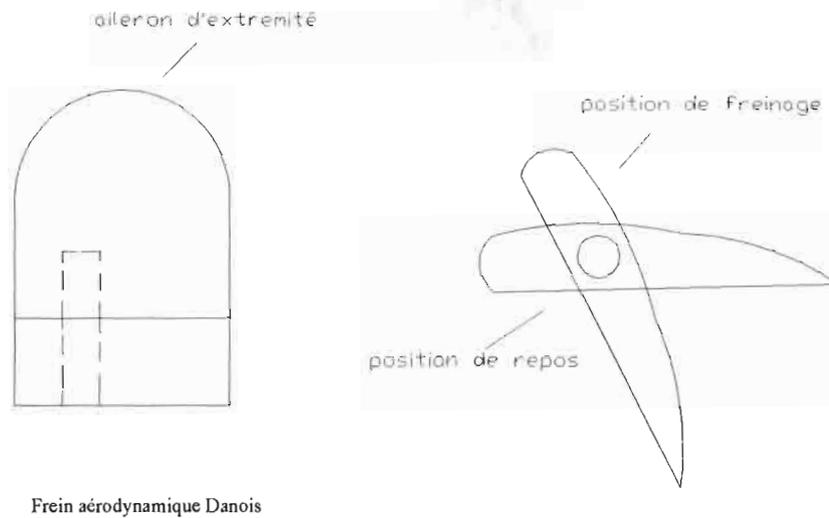


Figure 9

#### ❖ Système Danois

L'extrémité des pales joue le rôle de frein aérodynamique en cas de grand vent. Par vent normal, l'élément mobil dont la surface s'élève au dixième environ de la surface utile de la pale constitue un élément moteur et se tourne dans le prolongement naturel de la pale. La commande s'effectue par servomoteur hydraulique. En cas de survitesse, il tourne à  $60^\circ$ , introduisant ainsi un couple freinage important.

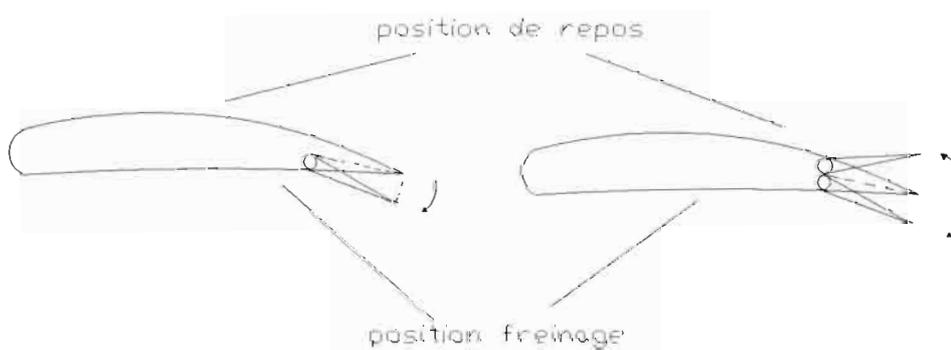


Frein aérodynamique Danois

Figure 10

#### ■ Autre système: Freinage par flettner

Le dispositif est représenté à la figure suivante. L'ouverture des volets peut être effectuée à l'aide d'un servomoteur commandé par un régulateur centrifuge.

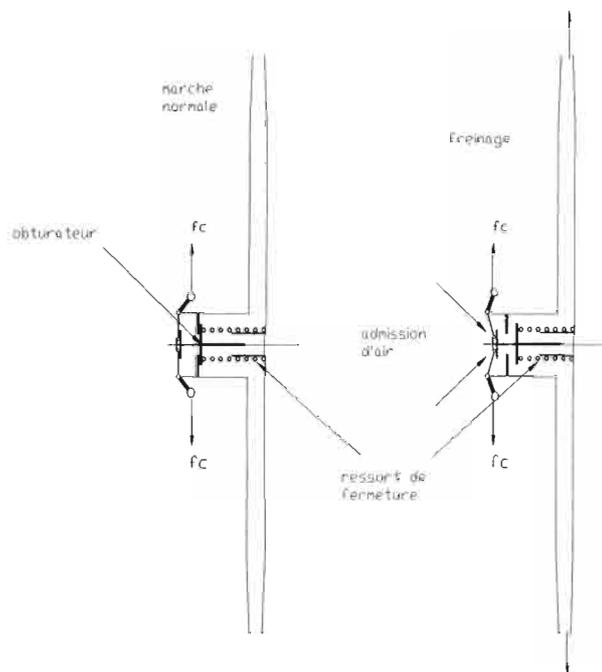


Freinage par flettner

Figure 11

#### ■ Freinage aérodynamique à pales creuses

Ce système consiste à freiner l'équipage en permettant à partir d'une certaine vitesse de rotation, l'apparition d'un courant d'air dans les pales supposées creuses de l'éolienne. Le schéma de principe est représenté à la figure suivante.



### ▪ Régulateur à pales creuses

Figure 12

#### ■ Fonctionnement

Lorsque la vitesse de rotation atteint une certaine valeur, les masselottes commandants l'ouverture de l'ouïe d'admission située au centre s'écartent de l'axe provoquant l'introduction de l'air dans les aubages.

Celui-ci, aspiré vers l'extrémité des pales par l'effet centrifuge, se met en vitesse. Il en résulte l'apparition des forces d'inertie de Coriolis qui agissant sur les pales en

sens contraire du mouvement d'entraînement, provoquent un freinage de la roue mobile.

Notons que la circulation d'air dans les pales pourraient également être établie par l'ouverture, sous l'effet de la force centrifuge, d'obturateurs situés aux extrémités des pales; ces organes étaient maintenus contre leur siège par des ressorts tant que la vitesse de rotation de l'hélice reste inférieure à une certaine limite. Dans ce cas, le moyeu de l'hélice, évidemment ouvert au centre

REPUBLIQUE DU SENEGAL  
 MINISTÈRE DE L'EQUIPEMENT

DAKAR. Yoff

CLIMATOLOGIE

DIRECTION DE LA  
 METEOROLOGIE NATIONALE

Vent dominant  
 vitesse moyenne en m/s de direction et (vitesse)

Imp. GUT - Dakar

	Janv.	Févr.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	An
1993													
Vent dominant	NNE	NNE	N	N	NNW	W	W	WNW	NW	NNW	NNE	NNE	NNE
Vitesse moyenne	4.3	4.9	4.7	4.9	5.0	3.2	2.9	2.7	2.6	3.3	4.4	4.2	3.9
1994													
Vent dominant	NNE	NE	NNW	NNW	NNW	WNW	WNW	WNW	WNW	NNW	NNW	NE	NNW
Vitesse moyenne	4.5	4.2	4.6	4.4	3.7	2.8	2.9	2.5	2.5	3.0	3.3	4.4	3.6
1995													
Vent dominant	NNE	NNE	NNW	NNW	NNW	NNW	NNW	WNW	NNE	NNW	NNE	NE	NNW
Vitesse moyenne	4.4	4.3	4.4	4.6	4.4	4.1	3.9	3.5	2.5	3.1	3.6	4.5	3.9
1996													
<del>Vent dominant</del>													
direction	NE	NNE	NNE	NNE	N	NNW	W	NW	NNW	NNW	NNE	NNE	NNE
Vitesse moyenne	4.9	5.2	5.5	5.6	6.0	4.1	3.5	3.4	3.4	3.1	4.1	5.5	4.6
1997													
Vent dominant	NNE	NNE	NNE	NNE	N	NNW	NNW	NNW	N	N	N	ENE	N/NNE
Vitesse moyenne	5.2	4.4	5.4	5.3	3.9	2.8	3.1	3.0	2.3	3.2	3.4	4.0	3.8
1998													
Vitesse moyenne	4.9	4.4	5.0	5.9	5.2	3.5	3.0	3.0	3.0	2.9	3.9	5.4	4.2
directions domin	N	NE	N	N	N	NNW	NW	WNW	NNW	N	NE	NE	N
1999													
Vitesse moyenne	5.1	5.4	6.3	4.7	3.4	2.9	3.0	3.2	2.7	3.1	3.3	4.7	4.0
directions dom.	NE	NNE	NNE	N	NNW	NW	WNW	SW	N	N	N	NNE	N
2000													
FE	5.0	4.6	4.3	4.9	4.9	3.9	3.4	2.8	2.8	3.4	3.8	4.2	4.0
SD	NNE	NNE	N/NNE	N	N/NW	NNW	NW	NW	NNW	N/NNE	N/NNE	NNE	NNE

Station : DAKAR - YEFF Mois : AOUT

DATES	DIRECTION en dizaines de degré et VITESSE du VENT en mètres par seconde																Total	Vitesse moyenne en m/s
	00		03		06		09		12		15		18		21			
	Dir.	Vit.	Dir.	Vit.	Dir.	Vit.	Dir.	Vit.	Dir.	Vit.	Dir.	Vit.	Dir.	Vit.	Dir.	Vit.		
1	34	2	32	1	Calme	0	36	2	36	4	33	2	Calme	0	Calme	0	12	1.5
2	32	4	Calme	0	Calme	0	32	4	32	4	36	3	Calme	0	Calme	0	12	1.5
3	32	2	Calme	0	32	3	Calme	0	32	4	32	5	32	5	32	4	21	3.0
4	30	4	36	3	30	3	30	3	20	4	24	2	34	5	24	3	26	2.3
5	34	2	32	2	25	3	30	2	30	2	26	3	33	3	28	3	20	2.5
6	27	2	30	2	32	2	34	3	32	3	33	3	32	4	22	3	22	2.8
7	36	3	36	2	26	4	36	4	36	5	33	4	33	4	32	3	30	3.8
8	30	2	32	2	30	2	32	2	32	4	31	4	26	3	31	3	23	2.9
9	30	3	30	4	31	3	30	3	32	3	32	3	22	3	22	2	24	3.0
10	32	2	Calme	0	Calme	0	Calme	0	24	3	20	3	24	4	32	2	14	1.3
11	Calme	0	Calme	0	32	2	36	3	26	4	30	3	28	3	28	2	17	2.1
12	32	3	34	2	32	4	31	4	31	5	32	5	32	4	32	3	35	3.1
13	30	3	30	4	30	3	32	4	32	4	32	4	34	4	34	3	28	3.5
14	32	3	34	2	34	2	32	3	31	4	31	5	24	4	34	4	27	3.4
15	34	4	34	4	36	4	36	4	32	3	31	4	30	4	30	4	31	3.5
16	30	2	Calme	0	30	3	28	2	28	3	23	2	23	2	24	2	16	2.0
17	Calme	0	20	2	20	4	13	3	13	3	13	3	22	4	09	3	25	3.1
18	21	4	Calme	0	Calme	0	08	2	20	2	21	3	32	3	34	3	14	1.8
19	30	2	32	2	30	4	32	4	28	4	30	4	28	4	22	4	21	3.5
20	30	2	30	4	Calme	0	32	3	33	4	36	4	32	3	Calme	0	17	2.1
21	Calme	0	01	3	06	2	07	3	08	4	17	3	18	4	Calme	0	15	2.0
22	32	3	Calme	0	Calme	0	27	2	32	4	30	3	28	3	28	2	16	2.0
23	30	4	28	3	24	3	28	4	28	4	28	3	32	2	Calme	0	21	2.5
24	Calme	0	Calme	0	32	2	Calme	0	Calme	0	22	2	22	2	Calme	0	6	0.7
25	32	1	30	3	11	5	09	5	30	3	32	3	32	3	31	3	26	2.3
26	30	3	Calme	0	04	2	04	2	Calme	0	24	2	30	2	30	0	13	1.6
27	32	2	Calme	0	16	2	Calme	0	Calme	0	25	3	22	2	22	2	11	1.4
28	Calme	0	20	2	22	2	24	2	22	3	20	3	22	4	22	2	19	2.4

↓ vent 1 layer in w/s

Dakar-Yoff	JANV.	FEV.	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JUIL.	AOUT	SEPT.	OCT.	NOV.	DEC.
1989												
V	12	15	13	15	12	22	20	26	20	18	17	19
D	E	N	NNE	N	NNW	NE	E	N	E	SE	N	NE
1990												
V	17	17	20	20	18	16	17	29	30	27	19	23
D	N	E	N	N	N	E	SW	SE	E	S	N	N
1991												
V	19	19	19	17	16	17	19	20	32	22	17	19
D	NNW	N	NNE	N	NNW	NW	NNE	WNW	NE	SSW	N	NNE
1992												
V	16	19	16	21	20	13	14	15	16	12	13	14
D	NNE	NNW	N	NNW	NNW	WNW	E	E	S	SSE	N	NNE
1993												
V	13	13	14	15	14	11	19	16	20	12	14	13
D	NE	NNE	N	N	N	WNW	ESE	ESE	SSW	N	NNE	NNE
1994												
V	16	14	15	13	13	16	10	13	14	12	12	19
D	N	N	N	N	N	NE	N	E	E	SE	N	N
1995												
V	12	13	14	18	14	12	13	19	12	18	11	10
D	NE	NNE	NNE	NNE	NNE	ESE	NW	E	SE	SSE	E	NE
1996												
V	10	12	11	12	11	9	18	18	14	15	10	9
D	N	NNE	NNE	NNE	NNE	NNE	E	SE	E	SSE	NNE	NE

## Vitesse maximale instantanée du vent en m/s

Dakar-Yoff	JANV.	FEV.	MARS	AVRIL	MAJ	JUIN	JUIL.	AOUT	SEPT.	OCT.	NOV.	DEC.
1971												
V	11	13	12	14	12	13	22	18	18	18	11	13
D	NNE	NNE	NNE	NNE	NNE	S	E	ENE	ESE/NE	SSE	NE	NNE
1972												
V	12	12	12	11	12	21	8	19	16	14	9	10
D	NNE	N/NNE	NE	NNE	NNE	SSW	W	E	E	NE	NE	NE/NE
1973												
V	9	11	11	13	10	11	16	14	17	10	10	11
D	N	NNE	N/NNE	NNE	N	N/ENE	NW	E	E	ESE	NNE	NNW
1974												
V	12	13	13	13	11	10	13	17	18	21	12	15
D	NNE	NNE	NNE	N	N	NW/NNE	W	S	E	E	E	NE
1975												
V	12	10	13	15	11	11	13	12	19	14	12	11
D	NE	NNE	N	NNE	NNE	W	E	S/SSW	E	S	NNE	NE
1976												
V	13	12	13	12	14	13	16	17	17	16	10	12
D	NNE	NNE	NNE	N	N	W	E	SE	SE	SSE	NE	NNE
1977												
V	11	13	11	11	12	14	14	15	18	10	9	10
D	NNE	NNE	NNE	NNE	NNE	SSE	E	ENE	E	N	E	NE
1978												
V	11	11	10	10	10	12	14	13	14	15	11	13
D	N	N	NNE	NNE	NNE	S	SE	SN	NE	ENE	NNE	NE
1979												
V	12	10	11	23	23	19	18	10	11	12	10	11
D	N	NE	N	ESE	ESE	S	ESE	NNW	N	NNE	NNW	NNE
1980												
V	11	13	14	12	12	10	10	19	21	12	11	13
D	NNE	NNE	N	N	N	SE	E	E	E	NE	NNW	N
1981												
V	13	11	11	10	10	15	25	17	24	14	10	11
D	NNE	N	N	N	NNW	E	ENE	E	ENE	SE	NNE	ENE
1982												
V	12	10	13	12	11	9	17	15	18	13	12	14
D	NNE	NW	N	N	NNE	NNW	SE	E	E	N	NNE	NE
1983												
V	13	11	11	10	10	15	25	17	24	14	10	11
D	NNE	N	N	N	NNW	E	ENE	E	ENE	SE	NNE	NNE
1984												
V	13	10	11	12	12	12	11	11	20	9	13	12
D	N	NNW	N	N	N	E	E	E	E	E	NNE	NNE
1985												
V	13	12	13	15	13	15	10	17	16	11	10	11
D	N	NNE	N	N	N	ENE	SSW	E	E	E	N	N
1986												
V	10	9	11	9	10	11	9	15	14	13	11	11
D	N	N	NNE	NNW	N	N	W	ENE	SE	SE	NNW	N
1987												
V	10	9	10	9	12	12	19	19	19	20	12	17
D	N	NNW	N	NW	N	E	E	WSW	SE	ESE	NE	E
1988												
V	17	14	13	14	14	24	10	17	18	12	13	14
D	ENE	ENE	NNE	NNE	NNE	ENE	WSW	E	ESE	NNE	E	NNE