

RÉPUBLIQUE DU SÉNÉGAL



ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE THIÈS

PROJET
DE
FIN D'ÉTUDES

Gm. 0384

Titre ÉTUDE DE VIABILITÉ D'UN AÉROGÉNÉRATEUR

Auteur Amadou COULIBALY

Génie mécanique

Date JUIN 1983

ETUDE DE VIABILITE D'UN AEROGENERATEUR

Par

Amadou COULIBALY

Projet de fin d'Etudes :

Département de Génie Mécanique

Ecole Polytechnique de THIES

-SENEGAL-

Directeurs MM : - Dinh Vo N'GOC : Professeur de
Mécanique des
fluides.

- Roger MARTIN : Professeur de
machines
Electriques et
d'installations
Electriques.

1982/1983.

-ooOoo- D E D I C A C E S -ooOoo-



A tous ceux qui, par leur
action quotidienne, oeuvrent
à la consolidation de la
solidarité mondiale,
• Pour la paix internationale et
• pour le bien-être social.

-ooOoo- REMERCIEMENTS -ooOoo-

Mes remerciements à mes directeurs de projet, MM. DINH VO N'GOC et ROGER MARTIN pour leur disponibilité et pour les conseils précieux qu'ils m'ont donnés tout au long de ce travail.

Enfin toute ma gratitude à la secrétaire, Aïda N'DIAYE à qui je dois tous les soins pris pour une bonne présentation de ce rapport.

P R E A M B U L E

=====

L'objectif poursuivi dans ce projet est d'installer une éolienne électrique à axe horizontal à l'E.P. de Thiès et d'en étudier la viabilité.

Nous étudierons la viabilité d'une telle machine en tenant compte des spécificités du site choisi où les vents ont pour 55 % du temps, une vitesse inférieure ou égale à 3,5 m/sec. dans l'année.

Le moteur éolien que nous utiliserons est de type DUNLITE de petite puissance (Puissance < 10 kW).

CONSTRUCTION : Parmi les différentes sortes de supports d'éolienne existants nous avons opté pour la construction d'une tour de 16 mètres reposant sur quatre pieds de fondation en béton de 1 m^3 chacun. La structure se compose d'éléments en acier de construction ordinaire (cornières, ferrons, etc...).

Les pales (3) en alliage léger d'aluminium permettent de balayer l'aire d'un cercle de 4 mètres de diamètre.

Un alternateur sans bagues ni balais muni d'un multiplicateur de vitesse (1:5) à engrenages permet la transformation de la puissance éolienne captée par les pales en énergie électrique.

Le souci d'assurer une alimentation ininterrompue des charges électriques (utilisations) nous a conduits à prévoir un système de stockage par batteries d'accumulateur, afin de pallier les périodes de vents improductifs.

En vue d'éviter la destruction des batteries d'accumulateurs par sulfatation (par décharge excessive) et/ou par déformation (par charge prolongée) il a été mis au point un système électronique de contrôle du circuit électrique.

Ce système de contrôle permet de maintenir les tensions de charge et de décharge des batteries d'accumulateurs entre deux seuils de tensions délimitant une Zone d'exploitation optimale de la machine.

La deuxième phase du projet devra nous permettre de faire l'évaluation de la performance de notre aérogénérateur cela à partir de mesures, tests et enregistrements que nous aurons faits sur une période déterminée.

Enfin une comparaison avec une éolienne mécanique pour pompage d'eau nous aiderait à entrevoir des possibilités d'amélioration de la performance de notre aérogénérateur.

Enfin nous terminerons par une étude économique du projet.

-ooOoo- TABLE DES MATIERES -ooOoo-

	<u>Pages</u>
• Dédicaces.....	i
• Remerciements.....	ii
• Préambule.....	iii
• Liste des figures, schémas et Dessins.....	iiii
• Introduction.....	1
<u>Chapitre I</u> :	GENERALITES
I-1. Le vent.....	3
I-2. Notions théoriques.....	9
I-3. Présentation Générale de l'installation....	13
<u>Chapitre II</u> :	CONSTRUCTION DE LA TOUR.
II-1. Etude statistique des vents à Thiès.....	14
II-2. Etude et choix du site.....	17
II-3. Calcul de vérification des structures.....	20
II-4. Fondations.....	25
II-5. Erection de la tour.....	26
<u>Chapitre III</u> :	ETUDE DE L'AEROGENERATEUR : CONSTITUTION.
	III - A : ASPECT MECANIQUE
III-A-1. Le système de fixation du support.....	27
III-A-2. Les pales.....	28
III-A-3. Le régulateur de vitesse.....	31
III-A-4. L'amortisseur de chocs.....	33
III-A-5. La boîte d'engrenages (multiplicateur).....	34
III-A-6. Le système de freinage de l'alternateur.....	27
III-A-7. L'empennage.....	35
III-A-8. Estimation de la puissance mécanique.....	37

III - B : ASPECT ELECTRIQUE

III-B-1.	L'alternateur.....	39
III-B-2.	Le régulateur de tension.....	40
III-B-3.	Le dispositif de stockage.....	45
III-B-4.	Les batteries d'accumulateurs au plomb <i>(annexe B)</i>	
III-B-5.	Le système électronique de contrôle du circuit électrique.....	46
III-B-6.	Les charges électriques théoriques.....	48
III-B-7.	La boîte de contrôle.....	49

Chapitre IV : MONTAGE DE L'EOLIENNE

IV-1.	Traitements de remise en état des pièces mécaniques.....	50
IV-2.	Assemblage du mécanisme.....	51
IV-3.	Installation de l'éolienne sur la tour.....	53
IV-4.	Protection des batteries d'accumulateurs.....	54
IV-5.	Protection contre la foudre.....	55

Chapitre V: EXPLOITATION

V-A.	Evaluation de la performance de l'aérogénérateur- Mesures - Tests - Enregistrements.....	56
V-B.	Etude des utilisations de la machine.....	59
V-B-1.	Electricité récupérable.....	59
V-B-2.	Pompage de l'eau - Comparaison avec l'éolienne mécanique lente. - Autres utilisations domes- tiques.....	59
V-C.	Etudes des possibilités d'amélioration de la performance.....	62
V-D.	Entretien de l'installation.....	64
V-E.	Etude Economique..... Discussions et Recommandations.	68

Chapitre VI :

CONCLUSIONS

VI-A. Conclusions.....	72
VI-B. Appendices.....	74
VI-C. Bibliographie.....	75

I N T R O D U C T I O N

Le processus historique de la transformation du monde et des sociétés humaines s'est réalisé à travers une intense activité consciente de l'homme dans les divers domaines de la science et de la technique. Cette évolution historique, depuis des millénaires sera marquée par une consommation sans cesse croissante d'Energie.

La crise économique mondiale, caractérisée par un désordre financier et une dégradation profonde des conditions sociales dans les pays les plus faibles, se traduit également par une crise énergétique.

A la suite d'une exploitation et d'une utilisation désordonnées des ressources énergétiques (course aux armements) on est porté à s'inquiéter pour l'avenir de cette civilisation industrielle.

Les ressources pétrolières, principale source d'énergie employée sont désormais devenues à la fois une arme économique et un moyen de pression politique et les cours mondiaux de ce produit sont, à l'image de la physionomie politique internationale, fluctuants.

Les factures pétrolières pèsent lourd dans la balance commerciale des pays à économie faible : au SENEGAL elle s'élevait à 75 milliards de francs C.F.A. soit 42 % de nos importations *en 1981*.

Cependant beaucoup de pays n'ont pas attendu les grands chocs pétroliers de 1973 (guerre du Kippour) et de 1979 (Révolution Iranienne) pour trouver des solutions à une éventuelle crise énergétique. Ainsi les pays industrialisés pour soutenir leur cadence de production se tournent de plus en plus vers l'énergie nucléaire et le charbon tandis que dans les pays du Tiers-monde l'avenir se conçoit surtout avec les complexes hydro-électriques et l'Energie solaire et ses sous-produits tels que l'énergie éolienne.

L'objet de notre étude, l'Energie éolienne et son utilisation pour la production électrique est un sujet d'actualité. Cette énergie encore sous-utilisée de nos jours représente une consommation potentielle estimée de $2,5 \times 10^{15}$ à 5×10^{15} kwh/an pour notre monde.

Et pourtant l'énergie du vent est aussi vieille que l'univers.

BREF HISTORIQUE

L'Energie Eolienne a été utilisée depuis le V^e siècle avant J.C. en Asie, berceau des aéromoteurs (machines à axe vertical). Dans la même période les Egyptiens connaissaient et utilisaient les moulins à vent à axe horizontal.

Mais il a fallu attendre le VII^e siècle pour voir les premières installations de moulins à vent en Europe.

Cependant ce n'est qu'à partir de 1870, date de l'invention de la "roue éolienne" (Eolienne multipale) en Amérique que l'on intéressera davantage à cette source gratuite d'énergie propre et inépuisable que constitue le vent.

En 1802 Lord Kelvin entreprit l'étude des possibilités de la transformation de l'énergie éolienne en énergie électrique.

Mais cette ambition de Lord Kelvin ne prendra clairement corps et forme qu'à partir de 1850 avec l'avènement de la dynamo pour finalement devenir réalité un peu plus tard vers le début du XX^e siècle avec les travaux de l'académicien français DARRIEUS.

L'invention, au siècle des lumières, de la machine à vapeur provoqua une véritable révolution dans l'histoire de l'Energie, et contribua rapidement au recul de l'Energie Eolienne. Cette tendance au recul se renforcera davantage au cours des décennies suivantes avec le développement du moteur à essence et du moteur DIESEL. L'utilisation croissante du pétrole et de ses dérivés comme conséquence logique de ces progrès scientifiques et techniques finit par hypothéquer l'avenir l'Energie Eolienne.

Aujourd'hui avec la crise économique et énergétique, l'accable le monde entier, un réexamen des dossiers de la question énergétique dicte un changement profond.

L'Energie Eolienne, en dépit de son caractère aléatoire et incontrôlable constitue une alternative valable dans des circonstances bien déterminées.

Dans les pages qui suivent nous nous proposons d'étudier la viabilité d'un aérogénérateur dans un coin du Sénégal, THIES.

CHAPITRE I

GENERALITES

I - A - LE VENT

Le vent c'est de l'air en mouvement. Le mouvement de l'air est un phénomène que nous pouvons observer autour de nous à tout moment. En effet, par suite des différences de pression entre différents points de la planète Terre, un équilibre relatif tend à se réaliser par la circulation de l'air des zones de hautes pressions vers les zones de basses pressions. Ce phénomène tout naturel, d'apparence simple est le résultat physique de l'influence et des interactions de divers facteurs.

Pour mesurer l'importance de chacun de ces facteurs dans le processus général, nous nous baserons sur leurs relations respectives avec les deux paramètres de détermination du vent que sont la direction et la vitesse du courant gazeux. (1)

1) La direction du vent

Aux latitudes moyennes et aux grandes latitudes la direction du vent est modifiée du fait de la rotation de la Terre. L'écoulement perpendiculaire aux isobares (Hautes pressions → Basses pressions) devient parallèle à ces isobares.

En rapport avec la forme de la Terre (géoïde ou elleпсоïde selon les considérations) le sens de rotation du vent varie selon l'hémisphère considéré.

Hémisphère Nord : - sens antihoraire autour des aires cycloniques.

- sens horaire autour des aires anticycloniques.

Hémisphère Sud : Les sens sont inversés par rapport à l'hémisphère Nord.

Le sens de déplacement de l'air est indiqué par la girouette. Les enregistrements quotidiens effectués dans les stations météorologiques permettent de connaître les temps relatifs (en %) pendant lesquels le vent a soufflé dans une direction donnée ; cela à partir d'un diagramme polaire.

Nous n'avons pas à notre disposition de données significatives à ce sujet mais les observations effectuées au centre régional METEO de Thiès montrent que la direction du vent varie autour d'une direction moyenne suivant les périodes de l'année. (voir tableau ci-dessous).

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Direction résultante	NNE	NNE	N	N	NNW	WNW	W	W	W	N	N	NE

2) Vitesses du vent

Comme sa direction, la vitesse du vent est un phénomène complexe, aléatoire, difficile à cerner. Cette situation s'explique par les difficultés objectives qu'il y a à maîtriser certains paramètres de base

- dont :
- la rotation de la Terre qui provoque une déviation des vents dans les deux hémisphères suivant des directions opposées. Cette rotation de la Terre est à l'origine d'une surélévation de la hauteur d'atmosphère à l'Equateur par effet centrifuge,
 - le rayonnement solaire inégalement et aléatoirement réparti sur les différentes zones du globe terrestre est quasi incontrôlable,
 - le mouvement des masses d'air dû aux perturbations atmosphériques.
 - la constitution très variable de la surface du globe (répartition des eaux, des terres etc.....).

Un classement des vents en 17 catégories a été établi par l'échelle Beaufort. Cette échelle basée essentiellement sur des observations physiques est résumée dans le tableau représenté sur la page suivante.

3) Répartition géographique du vent

L'établissement de carte éolienne de chaque région géographique (pays) à partir des données recueillies par le Service de la METEOROLOGIE NATIONALE constitue un excellent document de travail pour une exploitation intéressante du vent. Une telle carte indique la direction moyenne et la vitesse moyenne du vent au sol pour différents mois de l'année.

A ce niveau il convient de noter que nous ne disposons d'aucune carte dans le cadre de notre étude, ce qui du reste est regrettable.

Des cartes établies pour d'autres pays (Exemple : la France) révèlent que le vent d'une façon générale est plus fort sur les océans que sur les continents. Cette disparité s'explique notamment par les effets du relief et de la végétation qui forment des obstacles devant les masses d'air en déplacement. Il en résulte que les zones les plus favorables pour la production d'énergie éolienne sont celles situées

TABLEAU DE BEAUFORT

Degrès Beaufort	Vitesse du vent		Description générale
	m/s	km/h	
0	0/0,4	1	Calme
1	0,5/1,5	1/5	Très légère brise
2	1,6/3,4	6/11	Légère brise
3	3,5/5,5	12/19	Petite brise
4	5,5/8	20/28	Jolie brise
5	8,1/10,9	29/38	Bonne brise
6	11,4/13,9	39/49	Vent frais
7	14,1/16,9	50/61	Grand frais
8	17,4/20,4	62/74	Coup de vent
9	20,5/23,9	75/88	Fort coup de vent
10	24,4/28	89/102	Tempête
11	28,4/32,5	103/117	Violente tempête
12	32,6/35,9	118/133	Ouragan
13	36,9/40,4	134/149	
14	40,1/45,4	150/166	
15	45,1/50	167/183	
16	50,1/54	184/201	
17	54,1/60	202/220	Cyclone

sur les continents, en bordure des côtes :

- en Afrique : le Maroc, la Mauritanie, la Côte Nord-Ouest Sénégalaise, l'Afrique du Sud, la Somalie et Madagascar.
- en Amérique : la Côte du Sud-Ouest du Brésil, l'Argentine, le Chili, le Canada, l'Alaska, les Régions côtières des Etats-Unis.
- en Asie : l'Inde, le Japon et les zones côtières chinoises et Indochinoises.
- en Europe : le Portugal, la Grèce, l'Irlande, la Grande Bretagne, la France, la Hollande, l'U.R.S.S., les pays scandinaves.
- en Océanie : toutes les îles y compris l'Australie.

Nous travaillons à l'intérieur du pays, à Thiès situé à quelques 130 à 200 km de la Côte Nord-Ouest Sénégalaise. Les faibles vitesses de vents connues dans cette région sont consignées dans le tableau suivant. Les données sont celles de la Station Météorologique Régionale de Thiès. Vitesses moyennes sur cinq ans (1954-1959).

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Vitesses moyennes m/s	3.5	4	4.3	4.5	3.4	2.5	2.5	1.6	1.7	1.3	1.7	2.1

Moyenne annuelle : 2,76 m/sec.

4) Variation de la vitesse du vent en fonction de l'altitude par rapport au sol

L'accroissement de la vitesse du vent avec l'altitude est un phénomène bien connu. La réduction de cette vitesse au voisinage du sol est due au freinage des couches d'air par des obstacles naturels (végétation, le relief) et des obstacles artificiels de toutes sortes : édifices, habitations, autres structures jonchant la surface du sol.

La loi de variation de la vitesse du vent avec l'altitude par rapport au sol n'est pas une fonction constante à travers l'espace.

Elle est surtout fonction de la nature du sol : accidenté, peu accidenté, trop accidenté.

L'expression la plus couramment utilisée est :

$$\frac{V_1}{V_2} = \left(\frac{h_1}{h_2} \right)^n$$

V_1 : vitesse observée à la hauteur h_1

V_2 : vitesse observée à la hauteur h_2

n : exposant variant entre 0.10 et 0.40.

Pour un site comme le nôtre situé sur un sol faiblement accidenté on prendra $n = 0.20$

Nous avons vu avec la théorie de Betz que l'énergie récupérable proportionnelle au cube de la vitesse moyenne du vent :

$$P_{\max} = KSV^3 \quad \text{soit} \quad V^3 = \frac{P_{\max}}{KS}$$

On en déduit :

$$\frac{P_{\max 1}}{P_{\max 2}} = \left(\frac{h_1}{h_2} \right)^{3n}$$

n : même exposant vu plus haut

$P_{\max 1}$: Puissance maximum récupérable à la hauteur h_1

$P_{\max 2}$: Puissance maximum récupérable à la hauteur h_2

Remarque : Cette constatation incite à placer les moteurs éoliens à des hauteurs toujours importantes afin de recueillir le maximum de puissance. Le coût de l'installation croît avec la hauteur dans des proportions non négligeables (coût des profilés, le support doit également être de construction plus robuste, etc...).

Alors un calcul économique s'impose. Par ailleurs cette loi empirique doit être employée avec précaution ; et le mieux c'est d'être en possession de données météorologiques fiables. Il s'agit d'effectuer des mesures.

Pour terminer ce chapitre nous citerons pour indication les principaux d'anémomètres qu'on rencontre :

Anémomètres à rotation :

- anémomètre à papillon
- anémomètre à Ailleret CdC
- anémomètre Jules Richard

- anémomètre Dines.

Anémomètres à pression :

Anémomètres à variation de section :

Anémomètre IMFL.

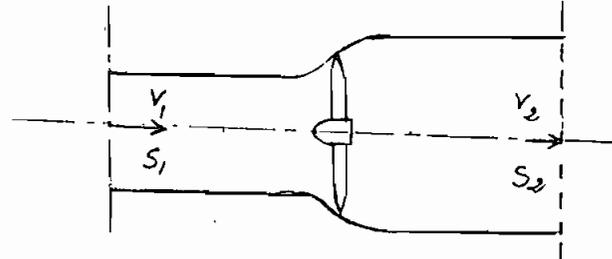
Anémomètre à fil chaud.

NOTIONS THÉORIQUES

Théorie de Betz :

C'est à Betz que nous devons la théorie globale du moteur éolien à axe horizontal.

Hypothèse : - Le moteur éolien est placé dans un air animé à l'infini amont et aval respectivement des vitesses V_1 et V_2 .



V_1 V_2
 ΔV perte de vitesse (car il y a perte d'énergie cinétique).

Le fluide étant supposé incompressible, l'équation de continuité pour un écoulement permanent s'écrit :

$$S_1 V_1 = S_2 V_2 = SV \quad \text{où } S : \text{section moyenne} \\ \text{ou } V : \text{vitesse moyenne.}$$

La force exercée sur le moteur éolien par l'air est, d'après le théorème d'Euler, égale à F telle que :

$$|F| = \rho Q(\Delta V) \quad ; \quad Q : \text{débit d'air passant dans la veine fluide.} \\ = \rho Q(V_1 - V_2)$$

$$|F| = \rho SV(V_1 - V_2) \quad (\text{Eq 1})$$

La puissance absorbée par le moteur éolien est :

$$P = |F| V \\ = \rho SV(V_1 - V_2) \times V \\ P = \rho SV^2(V_1 - V_2) \quad (\text{Eq 2})$$

Nous savons que la perte de vitesse de la masse de fluide est due à l'absorption par le moteur d'une partie de l'énergie cinétique contenue dans cette masse.

$$Ec_1 = \frac{1}{2} m V_1^2 \\ Ec_2 = \frac{1}{2} m V_2^2 \\ \Delta Ec = Ec_1 - Ec_2 = \frac{1}{2} m (V_1^2 - V_2^2) \quad (\text{Eq 3})$$

On a que la puissance P reçue est égale à l'énergie cinétique Ec absorbée par le moteur éolien.

par seconde $m_{\text{air}} = \rho SV$

$$\text{d'où } \Delta Ec_{1 \text{ sec}} = \left(\rho \frac{SV}{2}\right) (V_1^2 - V_2^2)$$

$$\Delta Ec_{1 \text{ sec}} = \left(\rho \frac{SV}{2}\right) (V_1 - V_2) (V_1 + V_2) \quad (\text{Eq 4})$$

Les équations (2) et (4) donnent :

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

$$\text{d'où } v = \frac{v_1 + v_2}{2} \quad (\text{Eq 5})$$

Combinaison (Eq 5) et (Eq 1) :

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

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

Calcul de la puissance maximale récupérable :

En supposant que la vitesse amont v_1 est constante.

$$\frac{dP}{dv_2} = -\frac{1}{2} \rho S v_2 (v_1 + v_2) + \frac{1}{4} \rho S (v_1^2 - v_2^2)$$

$$= \frac{1}{4} \rho S (v_1 + v_2) \left[-2v_2 + v_1 - v_2 \right]$$

$$= \frac{1}{4} \rho S (v_1 + v_2) (v_1 - 3v_2)$$

$$\frac{dP}{dv_2} = 0 \quad v_1 + v_2 = 0 \quad \text{soit } v_2 = -v_1 \quad (\text{pas de sens physique})$$

$$\text{ou } v_1 - 3v_2 = 0 \quad \text{soit } v_2 = \frac{v_1}{3}$$

$$\text{donc } P_{\max} \text{ correspond à } v_2 = \frac{v_1}{3}$$

$$\boxed{P_{\max} = \frac{8}{27} \rho S v_1^3 \cong 0,37 \rho S v_1^3} \quad \text{BETZ}$$

$$\text{Avec } \rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$$

La formule ci-dessus peut s'écrire sous diverses formes :

$$\boxed{P = 0,29 D^2 v^3}$$

$$P = 0,073 R^2 v^3$$

Cependant cette formule de Betz sous la forme ci-dessus ne s'utilise pas ; elle doit être affectée de tous les rendements propres aux transformations :

- l'hélice : $0,20 < \eta < 0,85$

- le multiplicateur : $0,70 < \eta < 0,98$

- Alternateur ou génératrice continue : $0,8 < \eta < 0,98$

- Transformateur : $0,85 < \eta < 0,98$
- Redresseur : $0,90 < \eta < 0,98$
- les batteries : $0,70 < \eta < 0,80$
- Les pertes en lignes : $0,9 < \eta < 0,99$

NB : Pour les aérogénérateurs classiques actuellement commercialisés seulement 30 à 50 % de la Puissance maximale de Betz est réellement récupérable.

Force maximale

$$\frac{dF}{dV_2} = 0 \longrightarrow V_2 = 0$$

$$F_{\max} = \frac{1}{2} \rho S V_1^2$$

Avec le rendement hélice

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

ETUDE DES UTILISATIONS DE LA MACHINE

Trois paramètres principaux interviennent dans la détermination de l'utilisation qu'on peut faire de l'énergie électrique d'origine éolienne (comme d'ailleurs c'est le cas quelque soit l'origine de cette énergie).

- a) La nature de la tension d'alimentation et sa valeur
- continue
 - alternative
 - indifférente.

Ces informations sont nécessaires pour chacune des charges électriques.

- b) La puissance nécessaire au fonctionnement
- au démarrage
 - en régime normal.

- c) Le taux de travail de l'appareil

Il faut entendre par là le pourcentage de temps total pendant lequel l'appareil est utilisé relativement à 24 heures (1 jour).

Ces paramètres permettent de définir

- l'aérogénérateur
- les batteries d'accumulateurs
- les appareils annexes
- et la source de secours éventuelle.

Mais ces renseignements ne peuvent être exhaustifs pour la détermination de la puissance totale requise. On doit tenir compte de deux facteurs importants permettant d'éviter une surestimation de cette puissance :

- le facteur d'utilisation d'un récepteur.

$$FU = \frac{\text{Puissance réelle utilisée}}{\text{Puissance nominale}}$$

- le facteur de simultanéité.

$$F.S = \frac{P \text{ nominale des appareils susceptibles de fonctionner simultanément}}{P \text{ nominale installée de tous les récepteurs montés}}$$

Ce facteur est important dans la mesure où tous les appareils ne fonctionnent pas toujours simultanément.

CHAPITRE II

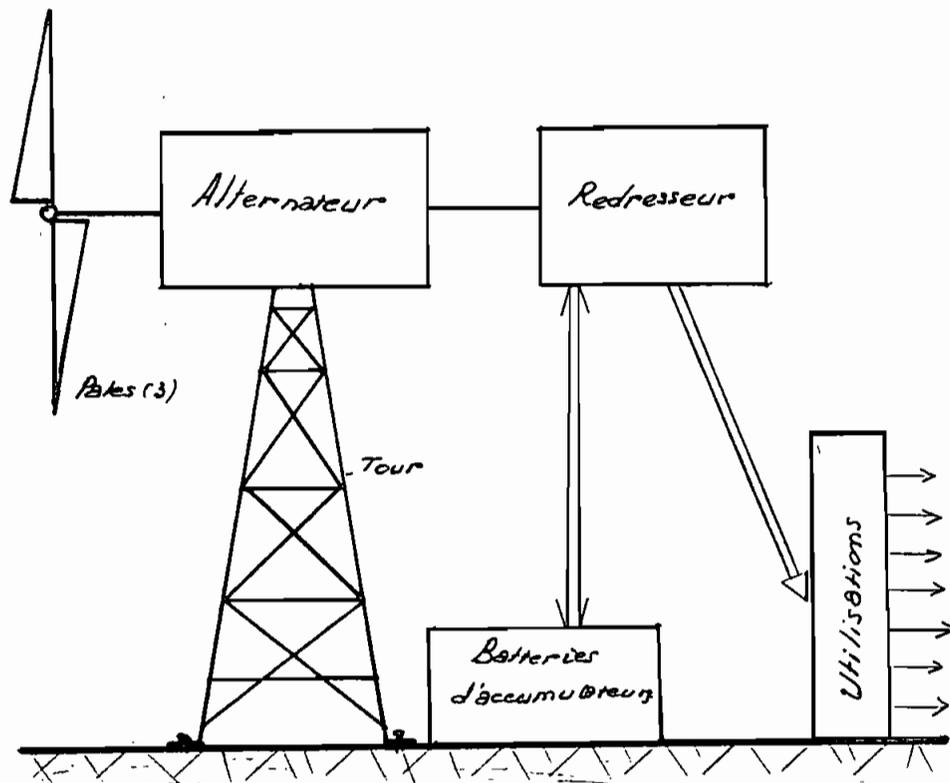
CONSTRUCTION DE LA TOUR

PRESENTATION GENERALE DE L'INSTALLATION

A - Caractéristiques

- Hélice : tripale en alliage d'aluminium soudé, montée à l'aval du support.
- Type Dunlite-Davey : Model No FML VP Propeller Hub. *(Adélaïde Australie)*
- Diamètre : 4 m.
- Surface balayée : 12,57 m².
- Vitesse de conjonction : 110 tpm par temps froid.
130 tpm par temps chaud.
- Générateur : alternateur triphasé sans bagues ni balais.
- Puissance nominale : 2 kw.
- Vitesse de vent nominale : 10 mph.
- Vitesse de vent maximale de service : 25 mph.
- Puissance de crête en une heure : 3 kw (avec une vitesse de vent de 30 mph).
- Puissance maximale d'excitation : 120 w (self-excitation).
- Rapport de multiplication : 5/1
- Hauteur de la tour en treillis : 16 m (4 pieds).
- Représentations que cette installation doit être testée avant d'entrevoir les installations possibles de l'énergie produite.

B - Schéma simplifié de l'installation



ETUDE STATISTIQUE DES VENTS A THIES

Cette étude préliminaire constitue la base de tout projet d'installation d'une éolienne simple ou d'un aérogénérateur. Elle doit permettre la connaissance des régimes de vent dans la zone d'implantation.

A partir des données météorologiques sur les vitesses de vent nous allons construire :

- La courbe des vitesses classées

- La courbe de fréquence annuelle des vents.

Ces courbes donnent des renseignements précieux pour le dimensionnement de la batterie d'accumulateurs et surtout pour la détermination de la puissance récupérable selon la théorie de BETZ.

Courbe annuelle des vitesses classées : fig:3

En abscisse : la durée annuelle pendant laquelle les vents ont une vitesse supérieure à une certaine valeur y .

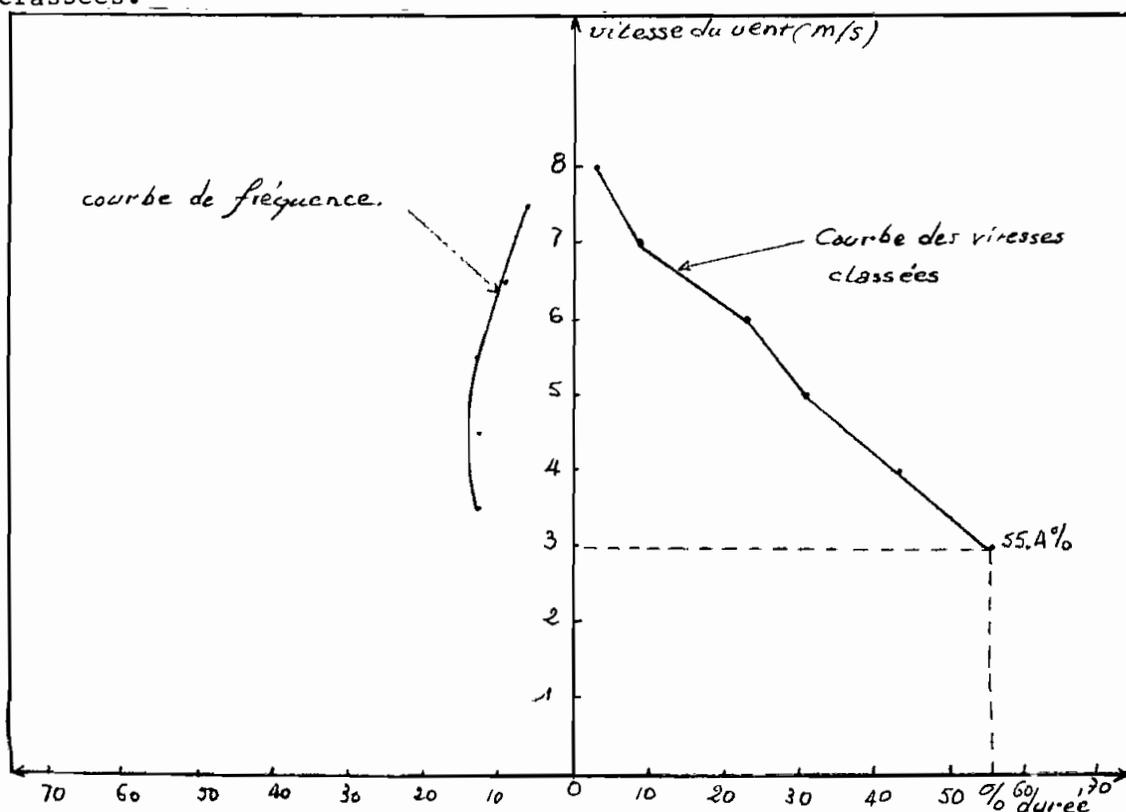
En ordonnée : ce sont les valeurs de comparaison y qui sont placées en ordonnée.

Courbe de fréquence annuelle des vents : fig:3

Elle permet de déterminer la durée annuelle pendant laquelle les vitesses de vents sont comprises entre deux valeurs limites de vitesses. Par exemple entre V_1 m/sec et V_2 m/sec.

Cette courbe est obtenue à partir de la courbe annuelle des vitesses classées.

La durée cherchée est obtenue en faisant la différence des abscisses relatives aux ordonnées V_1 et V_2 de la **courbe** des vitesses classées.



VITESSES MOYENNES JOURNALIERES EN m/s

Jour	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février
1	-	3,44	1,29	1,72	2,37	3,44	3,87	3,87
2	-	2,80	2,15	1,72	2,58	3,44	3,01	3,01
3	-	3,87	1,72	2,15	3,01	3,01	6,02	3,41
4	3,23	3,44	1,72	2,15	2,37	3,87	5,59	3,01
5	1,51	2,58	1,72	2,58	1,29	3,41	6,45	2,58
6	2,15	2,58	2,15	2,15	-	3,01	5,16	3,01
7	2,58	2,37	2,15	3,44	2,58	3,41	5,16	3,41
8	1,72	2,37	1,72	3,01	2,58	4,30	4,73	3,41
9	3,23	2,80	1,72	2,37	2,58	3,01	4,73	2,58
10	3,66	2,80	1,29	2,58	2,15	3,01	4,73	3,41
11	2,80	3,23	1,72	3,01	2,15	3,41	6,02	4,30
12	3,01	2,80	1,72	2,15	3,01	4,73	3,41	3,87
13	3,44	3,01	1,51	2,58	3,01	5,16	3,41	3,87
14	3,66	3,23	1,72	2,58	3,44	3,87	-	3,41
15	2,37	2,37	1,94	1,72	3,44	4,30	4,30	3,41
16	2,58	1,94	2,15	2,15	3,23	2,58	5,16	
17	3,01	2,58	1,94	2,15	3,01	3,87	5,16	
18	2,15	1,51	1,51	1,94	3,01	3,87	4,30	
19	2,15	3,01	2,58	3,01	3,01	3,01	3,41	
20	-	1,72	1,29	3,44	3,44	2,58	4,30	

21	-	2,37	2,15	2,80	3,44	2,15	5,16
22	3,87	3,01	1,72	2,58	2,58	2,15	4,73
23	3,87	2,37	2,15	2,15	3,44	3,87	5,16
24	3,23	2,58	1,72	3,01	3,44	3,01	4,30
25	1,72	3,87	1,72	3,87	3,44	2,58	3,41
26	1,72	4,52	3,01	4,30	2,58	2,58	3,01
27	-	2,58	1,94	3,01	2,15	3,01	3,41
28	-	3,87	1,72	2,58	2,15	2,58	3,87
29	3,44	2,58	2,15	4,30	3,01	2,15	4,30
30	3,23	2,58	2,15	3,44	3,44	2,15	5,16
31	3,66	3,23	-	2,15	-	2,58	4,73

NOTE : Ces tableaux sont extraits du projet de fin d'Etudes de M. René N'DOUR ancien élève de l'E.P.T.

Mois	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février
Vitesses moyennes mensuelles m/sec.	2,83	2,84	1,87	2,67	2,83	2,23	4,54	3,11

$$V_{\text{moy.}} = \frac{V_i}{8} = 3$$

ETUDE ET CHOIX DU SITE

Le choix et l'étude du site d'implantation des aérogénérateurs constituent un élément déterminant pour une meilleure exploitation du potentiel éolien du milieu géographique considéré.

Suivant la taille de la machine à installer, grandes puissances ($P \geq 100$ kw), moyennes puissances ($10 \text{ kw} < P < 100$ kw) ou petites puissances ($P < 10$ kw) les paramètres à tenir en compte sont sensiblement différents.

Notre aérogénérateur d'une puissance de 2 kw se classe parmi les installations de petites puissances.

Critères de détermination du site

a) Le potentiel éolien :

Ce point nécessite une connaissance parfaite des données météorologiques sur les vitesses, les directions et les fréquences des vents dans la région où on fait les installations. En attendant de revenir plus en détails sur ces éléments retenons qu'à THIES on a des vents d'une vitesse moyenne de 2,5 à 3,5 m/sec.

b) Les obstacles environnants défavorables :

Il s'agit du relief, de végétation ou plus généralement des obstacles naturels (arbres) ou artificiels (Bâtiments). C'est là un point à surveiller afin de pouvoir éviter les perturbations ou turbulences dans la masse de fluide (air) qui arrive sur les pales de l'éolienne.

c) La proximité des utilisations :

Autant en installations électriques courantes (usine, maison, ou chantier), on cherche à minimiser les pertes dans les câbles autant en implantation d'aérogénérateur on doit se soucier d'être le plus près possible des zones où ^{se trouvent les} appareils à alimenter exactement pour les mêmes raisons.

d) La hauteur du support :

Une hauteur adéquate du support de l'éolienne permet de dominer les obstacles tout en favorisant de bénéficier d'un écoulement laminaire avec des vitesses améliorées.
(Nous n'oublions pas que la vitesse du vent augmente avec l'altitude).

e). Enfin la proximité des services d'entretien et la facilité d'accès aux installations sont fortement conseillées.

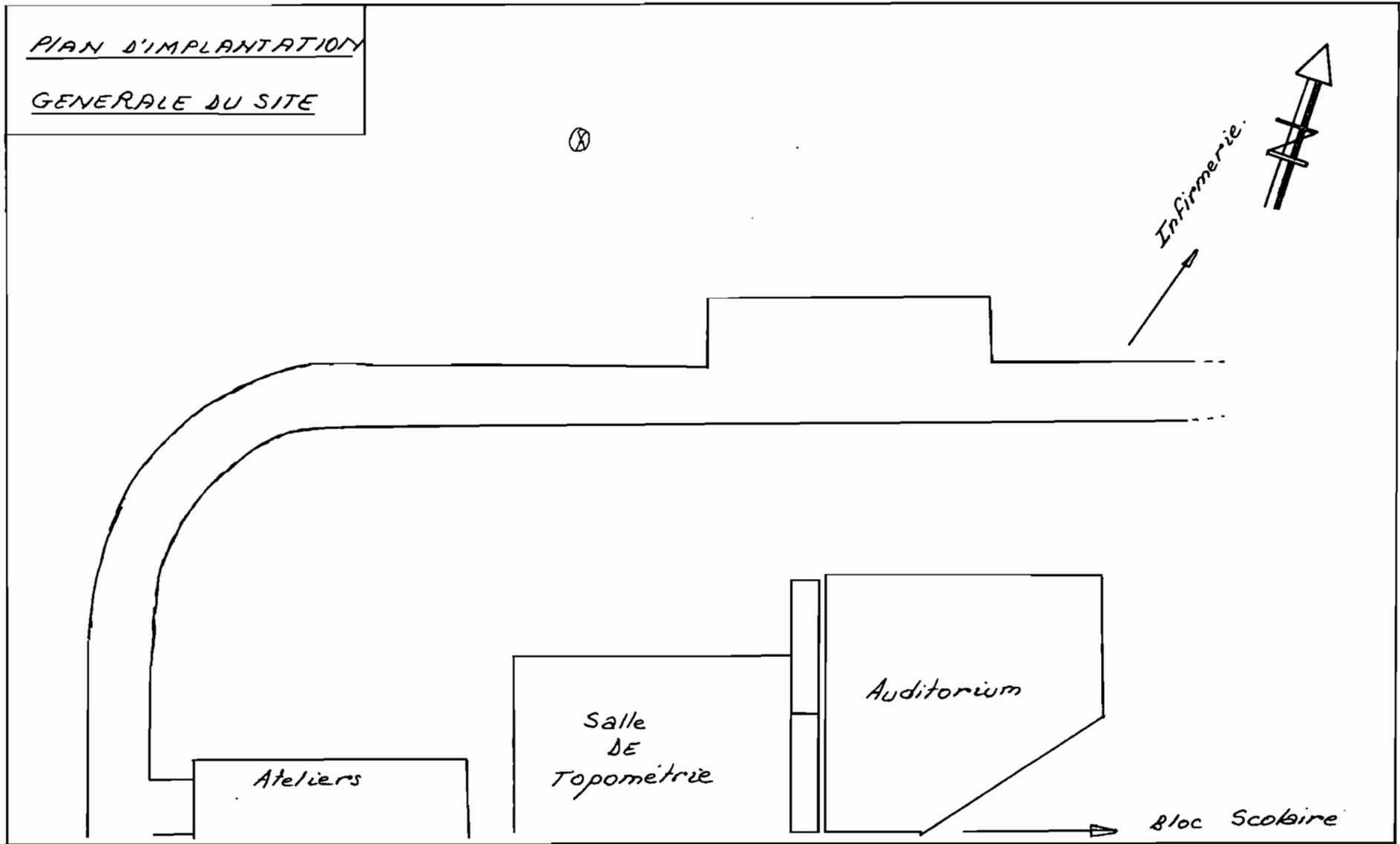
LOCALISATION

C'est compte tenu de tous ces paramètres que nous avons retenu de faire les installations à la phase II du Campus de l'E.P.T.

Nous proposons un plan d'implantation générale pour illustration.

PLAN D'IMPLANTATION

GENERALE DU SITE



CALCULS ET VERIFICATION DES STRUCTURES

But : Les calculs de vérification permettent de s'assurer que toutes les charges qui peuvent être appliquées sur la structure seront bien reprises par les fondations par l'intermédiaire des différentes membrures métalliques qui constituent le support de l'Eolienne.

La sécurité :

Le coefficient de sécurité que nous retiendrons dans nos calculs sera fonction des spécifications suivantes :

- construction permanente
- rupture susceptible de causer des pertes matérielles
- charges évaluées approximativement
 - charges statiques
 - charges dynamiques
- Nous tiendrons compte des sollicitations extraordinaires (ouragans)
- la qualité du matériau de construction.

I - IDENTIFICATION DES CHARGES

A) Charges Permanentes

- Le poids mort de la structure.
 - ‡ Tour
 - ‡ Echelle
 - ‡ Plateforme.

B) Surcharges utiles

- ‡ Alternateur
- ‡ Pales (3) de l'Eolienne
- ‡ Support de l'alternateur
- ‡ Régulateur de vitesse (masselottes)
- ‡ Gouvernail (empennage).

C) Surcharges inévitables

- ‡ Effet dynamique du vent
- ‡ Effet de température, de retrait
- ‡ Effet de tassement différentiel des fondations.

II - EVALUATION DES CHARGES

Cornières 80 x 80 L = 3 950 mm (colonnes).

Nbre: 3 à chacune des 4 intersections de plan

soit 1 nombre total de $4 \times 3 = 12$ cornières 80 x 80

$$L_{T1} = 3950 \times 12 = 47\,400 \text{ mm}$$

Cornières 80 : L = 3 955 mm

Nbre: 1 à chacune des 4 intersections de plan

$$L_{T2} = 3955 \times 4 = 15\,820$$

$$L_T = L_{T1} + L_{T2} = 63\,220 \text{ mm}$$

Cornières 40 x 40 (poutres)

Suivant un plan de bas en haut

$$L = 1891 + 1539 + 1242 + 946 + 718 + 1500 + 512 + 328 + 187$$

$$= 8863 = L$$

$$L_T = 4 L = \boxed{35\,452 \text{ mm}}$$

Cornières 45 x 45

$$L = 2606 + 2235 = 4841 \text{ mm}$$

$$L_T = 4 \times L = 19364 \text{ mm}$$

Membrures diagonales (croisillons)

Cornières 30 x 30

$$\text{Sur un plan : } 2(4306) + 2(3872) = L = 16\,356 \text{ mm}$$

$$4 \text{ plans } L_T = 4 L = \boxed{65\,424 \text{ mm}}$$

Barres cylindriques de $\varnothing 13$ (ferrons)

$$L = 2(3550) + 2(2600) \text{ plan} = 12\,300 \text{ mm}$$

$$4 \text{ plans } L_T = 4 L = \boxed{49\,200 \text{ mm}}$$

$$L = 49\,200 \text{ mm}$$

Echelle et fixation

Echelle :

En plat 25 x 5

$$L = 4032 + 3639 + 2893 = \boxed{10\,564 \text{ mm}}$$

Barres $\varnothing 10$ L = 300

$$L_T = 34 \times 300 = \boxed{10\,200 \text{ mm}}$$

Fixation sur la tour

Cornières 30 x 30

7 à droite

7 à gauche

$$L = 155 \times (7 + 7) = 2170 \text{ mm}$$

Plateforme : morceaux (planchés) de bois.

Efforts externes

Charges permanentes : $P_0 = P_1 + P_2 + P_3$

ou P_0 = charge morte de la structure

P_1 = poids de la tour

P_2 = poids de l'échelle

P_3 = poids de la plateforme (négligeable)

Afin de déterminer ces différentes grandeurs il faut nécessairement connaître les différentes caractéristiques des éléments de construction employés, or l'équipe d'Italiens chargée de la construction de la tour n'a que son expérience dans le travail mais ne possède d'aucune donnée fiable. Dans ces conditions il serait hasardeux d'entreprendre des calculs à ce sujet. Des tests de matériaux seraient possibles mais nous n'avons pas le temps de faire de telles expériences en laboratoire de résistance des matériaux.

Surcharges utiles : Poids de l'aérogénérateur (uniquement)

- Alternateur	300 Lbs
- Pales + gouvernail (ailes) + support (pales)	160
- Support de l'alternateur	115
- Autres éléments	105
- Surcharge utile totale : $St =$	<u>680 Lbs</u>

$$St = 680 \times 0,453 \times 9,81$$

$St = 3022 \text{ N}$

Surcharges inévitables :

L'action du vent

a) Sur la structure

Les calculs doivent se faire sur la base des conditions d'exploitation les plus sévères : sollicitations extraordinaires (cas de vents très forts).

D'après les relevés du Centre Météorologique de Thiès, la plus grande vitesse enregistrée est de 25 m/sec. soit 90 km/h.

Sur l'échelle Beaufort on a :

$$89 \text{ km/h} \leq V = 90 \text{ km/h} \leq 102 \text{ km/h} \longrightarrow \text{tempêtes.}$$

Nous retiendrons une $V_{\max} = 28 \text{ m/sec.} = 102 \text{ km/h}$ en prévision des vents forts probables.

Selon le Code National du Bâtiment Canadien, la traînée sur notre structure peut se calculer par l'équation ci-dessous :

$$Q_V = k \cdot C_n \cdot q \cdot C_g \cdot C_e \cdot A_s$$

où : k = Coefficient de réduction de la forme.

C_n = Coefficient de traînée de la forme.

q = Pression de référence (dynamique) du 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).

$$A = \frac{b + B}{2} h \quad b : \text{petite base du trapèze}$$

$$A = \frac{0,3 + 3,08}{2} 16 \quad B : \text{grande base}$$

$$A = 27,04 \text{ m}^2$$

$$\frac{A_s}{A} = 0,16 \quad (\text{estimation})$$

$$A_s = 0,16 \times A = 0,16 \times 27,04$$

$$A_s = 4,33 \text{ m}^2$$

$$\frac{h}{b} = \frac{16}{0,3} = 63$$

- Coefficient de réduction

$$k = 1$$

- Coefficient de traînée

$$C_n = 1,8$$

- Pression de référence

$$q = C V^2 \quad C = 50 \times 10^{-6}$$

$$q = (50 \times 10^{-6}) (102)^2$$

$$q = 520,2 \text{ N/m}^2$$

- Coefficient de rafale et d'exposition

Le supplément n° 4 du CNBC 1977 donne pour les éléments structuraux : $C_g = 2$

$$C_e = 1,1 \text{ pour une hauteur de } 16 \text{ m} = 53 \text{ pi.}$$

La charge du vent sur la face directement attaquée :

$$Q_{V1} = 1 \times 1.8 \times 520.2 \times 2 \times 1.1 \times 4.33$$

$$Q_{V1} = 8920 \text{ N}$$

Le vent attaque 2 faces : la face directement exposée et celle située derrière la première.

Selon la Norme Canadienne la face masquée subit 90 % de la force de traînée exercée sur la face d'attaque directe.

$$Q_{V2} = 0.90 \times Q_{V1}$$

$$Q_{V2} = 0.90 \times 8920$$

$$Q_{V2} = 8028 \text{ N}$$

L'effort global du vent exercé sur la structure est :

$$Q = Q_{V1} + Q_{V2} = 8920 + 8028$$

$$Q = 16\,948 \text{ N} = 16,9 \text{ kN}$$

Cet effort est repris par les deux poteaux de la face d'attaque directe qui sont alors soumis à une sollicitation en flexion, et les deux autres poteaux qui se compriment.

Remarque : Etant donné que nous ne connaissons pas le poids mort (propre) de la structure il est impossible de conduire des calculs de vérification des éléments sollicités.

Procédure de calcul :

- 1 - tracer le diagramme rendu libre de la structure avec mention des efforts externes.
- 2 - déterminer les forces inconnues (réactions d'appui)
- 3 - utiliser la méthode de Culman ou celle de Ritter pour calculer toutes les forces internes.
- 4 - enfin connaissant les caractéristiques de résistance des matériaux employés, vérifier que toutes membrures supportent bien leurs charges.

- F O N D A T I O N S

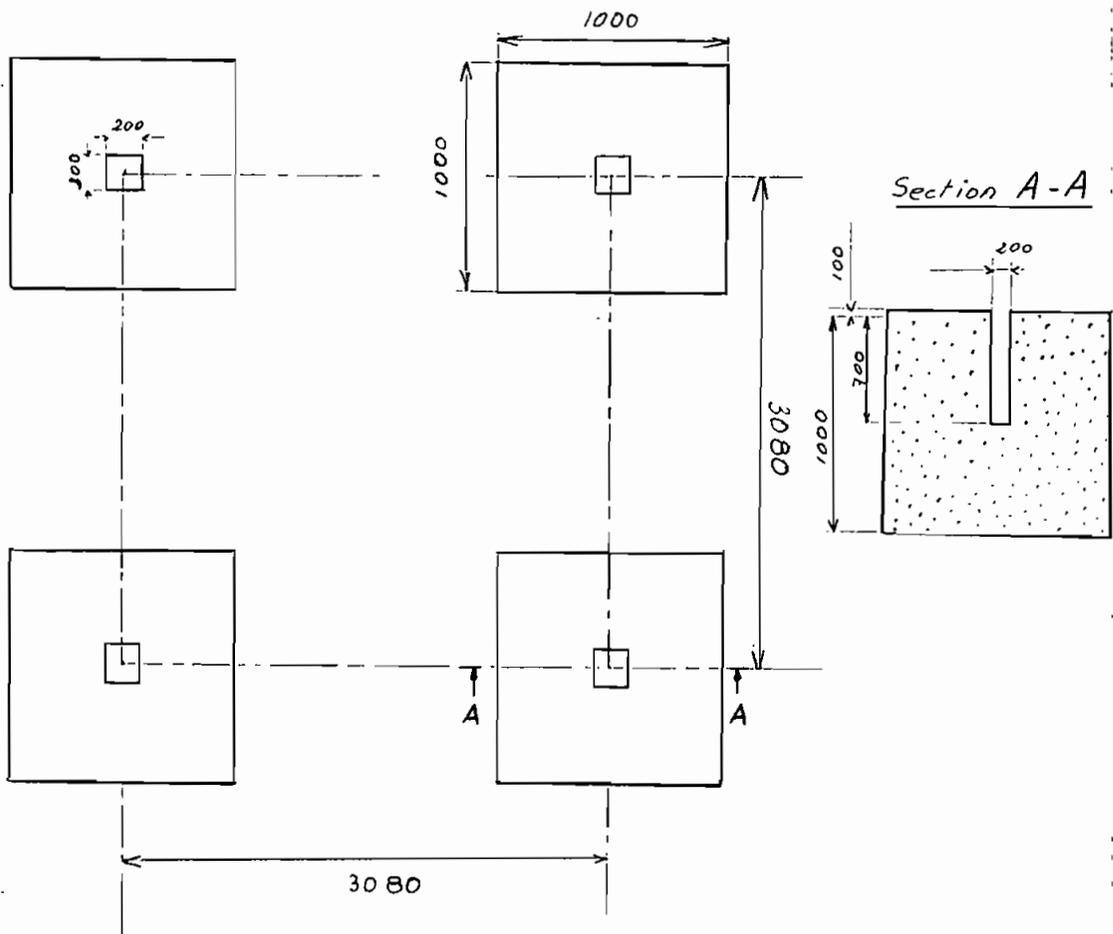
La tour de l'éolienne repose sur quatre (4) pieds en béton.

Description :

- Le béton est coulé dans quatre trous cubiques de 1 m^3 chacun.

Composition du béton : c'est un béton ordinaire pour fondation.

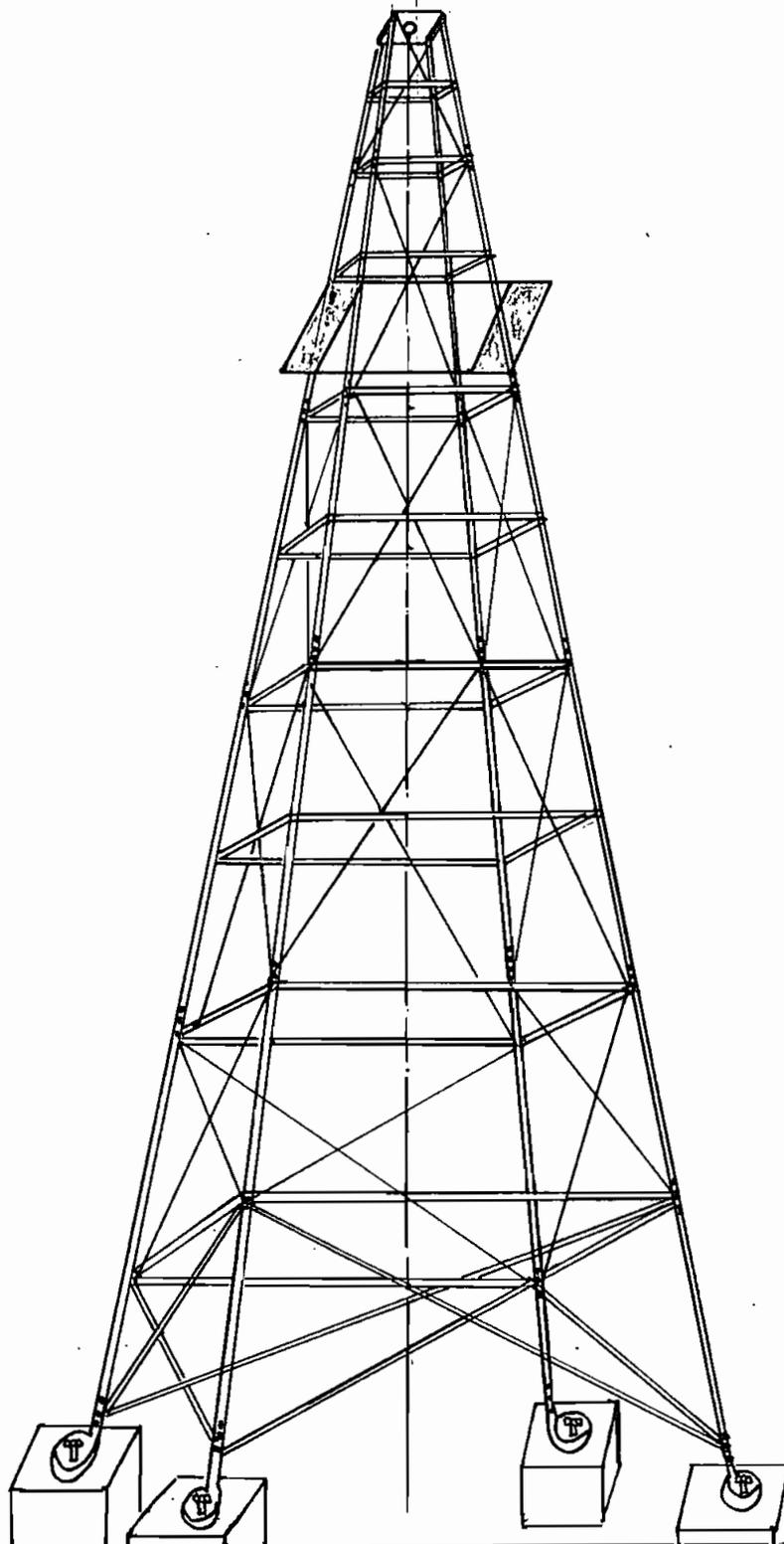
- Pour niveler le plan de support on place un coffre de $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ et de 10 cm de hauteur. Ce coffre (moule) est rempli de mortier de ciment mélangé à du sable.
- Temps de cure du béton : 1 semaine
Pendant ce temps il faut arroser le massif en bloc régulièrement et le couvrir afin d'en améliorer la résistance en compression et de diminuer les fissurations.
- Voir figure ci-dessous :



ERECTION DE LA TOUR

La construction a été réalisée par la mission catholique Italienne du village de Pécou sous la direction de M. BECCARIAS.

Les principales étapes sont mises en évidence sur le dessin éclaté présenté à la fin de ce rapport.



CHAPITRE III

ETUDE DE L'AEROGENERATEUR : CONSTITUTION

III - A : ASPECT MECANIQUE

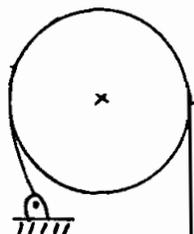
III - B : ASPECT ELECTRIQUE

LE SYSTEME DE FIXATION DU SUPPORT DE L'ALTERNATEUR

(voir D 1076).

LE SYSTEME DE FREINAGE DE L'ALTERNATEUR

Schéma de fonctionnement



tambour solidaire de l'arbre
d'entrée de la boîte d'engrenages.

F (frein à bande)

vers le bas de la tour
(levier de commande).

tambour : \varnothing 200 mm

largeur 32 mm

bande : épaisseur : 4 mm

largeur : 32 mm

longueur : 555 mm.

(voir D 3447).

LES PALES

La conception et la fabrication des pales constituent un maillon très important dans la construction d'une éolienne. En effet, les pales jouent le rôle de capteur d'énergie du vent, et leur choix adéquat doit être fait en fonction des besoins et des conditions météorologiques.

La construction des pales pose deux sortes de problèmes :

1 - l'Etude aérodynamique

- choix du profil
- largeur du profil
- angle de calage
- nombre de pales
- etc.....

2 - Le dimensionnement de la pale du point de vue de la résistance des matériaux.

De nombreux éléments de construction des pales dépendent de la destination de l'éolienne et des vitesses locales des vents.

Ainsi dans la construction d'un aérogénérateur, on adoptera une éolienne rapide ayant une vitesse spécifique élevée (5), de façon à limiter le rapport de multiplication de la vitesse pour l'entraînement du rotor de l'alternateur. L'éolienne sera alors bipale ou tripale.

S'il s'agit d'une machine de pompage de l'eau dans une région où la vitesse du vent est faible, on prendra de préférence une éolienne multipale ayant une vitesse spécifique assez faible.

En pratique le nombre de pales dépend de la vitesse spécifique λ_0 .

Pour $\lambda_0 = 1$	on adoptera	8 à 24 pales
$\lambda_0 = 2$	"	6 à 12 pales
$\lambda_0 = 3$	"	3 à 6 pales
$\lambda_0 = 4$	"	2 à 4 pales
$\lambda_0 = 5$	"	2 à 3 pales.

Selon le type d'éolienne retenu, le diamètre de la machine sera déterminé par l'une des équations suivantes :

$$\text{Puissance} = 0,15 D^2 V^3 \quad \text{pour éolienne lente et moulin à vent ;}$$

$$\text{Puissance} = 0,20 D^2 V^3 \quad \text{pour éolienne rapide.}$$

La détermination des éléments de construction des pales (largeur du profil ; angle de calage, etc...) est faite au moyen de diverses

théories. Nous citerons pour mémoire les théories élaborées par SABINI N, STEFANI AK, HUTTER et GLAUERT. (Voir : Energie Eolienne de D. LE GOURIERES).

Le sujet que nous examinons dans le présent rapport consiste simplement à étudier la viabilité d'une machine dont les éléments ont déjà été conçus et fabriqués. Nous n'avons aucun calcul de pales à faire.

Signalons seulement que :

- les profils utilisés habituellement pour les éoliennes rapides sont en général plan convexes (Gottingen 623) ou biconvexes mais non symétriques.

NACA 4412
 4415
 4418
 23012
 23015
 23018

fig : 8



profils utilisés

- les matériaux employés dans la construction des pales sont soumis à des conditions très sévères et doivent par conséquent supporter les contraintes de service : efforts dus au vent (tempêtes), érosion due aux poussières, à la pluie et aux attaques par corrosion sèche ou électrochimique. Ils doivent posséder par ailleurs un support résistance/poids élevé afin de minimiser les efforts dus à l'inertie.

Pour les aérogénérateurs on utilise, en pratique : le bois, les alliages d'aluminium, les plastiques armés.

Dans le cas des éoliennes lentes de pompage on emploie la tôle galvanisée.

Caractéristiques des pales de l'éolienne DUNLITE à notre disposition :

- Hélice tripale à pas variable placée à l'aval du support.
- matériau : alliage d'aluminium soudé.

- Model N° FML VP Propeller Hub Ass'y.
- Diamètre : 4 m.
- Surface balayée.
- L'équilibrage dynamique est réalisé au moyen de 3 masselottes.

LE REGULATEUR DE VITESSE

Afin de garantir le fonctionnement de l'alternateur dans les limites de fluctuation acceptables de sa vitesse de rotation, on utilise des régulateurs de vitesse. En cas de grand vent (tempêtes, bourrasques) ces dispositifs jouent également le rôle de limiteur de puissance et d'efforts. Le principe consiste à régler adéquatement la vitesse de rotation en faisant varier la surface offerte au vent.

Dans le cadre de notre étude nous nous intéresserons plutôt à la régulation à pales orientables. Cependant faisons remarquer que les solutions utilisées en régulation de vitesse se classent en deux catégories : la régulation à pales fixes et la régulation à pales orientables.

Fonctionnement du dispositif de régulation

Les 3 pales munies de masselottes sont montées sur 3 axes tournant sur des roulements à billes comme nous le montre la figure (D3455). Ces axes appuyent sur un plateau reposant sur un banc d'aimants et qui supporte un amortisseur de chocs. L'absorbeur de chocs comporte un ressort central et deux petits vérins hydrauliques : (voir fig. D3549).

L'effort exercé par le vent sur les pales est transmis au plateau par l'intermédiaire des axes. Pour s'assurer que l'orientation des pales ne change pas sans avoir atteint la vitesse de rotation maximale le plateau est retenu au moyen d'un jeu de 6 aimants et n'est libéré qu'au prix d'un effort prédéterminé. Le ressort est alors comprimé permettant ainsi une limitation des efforts par suite d'un changement de pas des pales autorisant la réduction de l'aire exposée au vent.

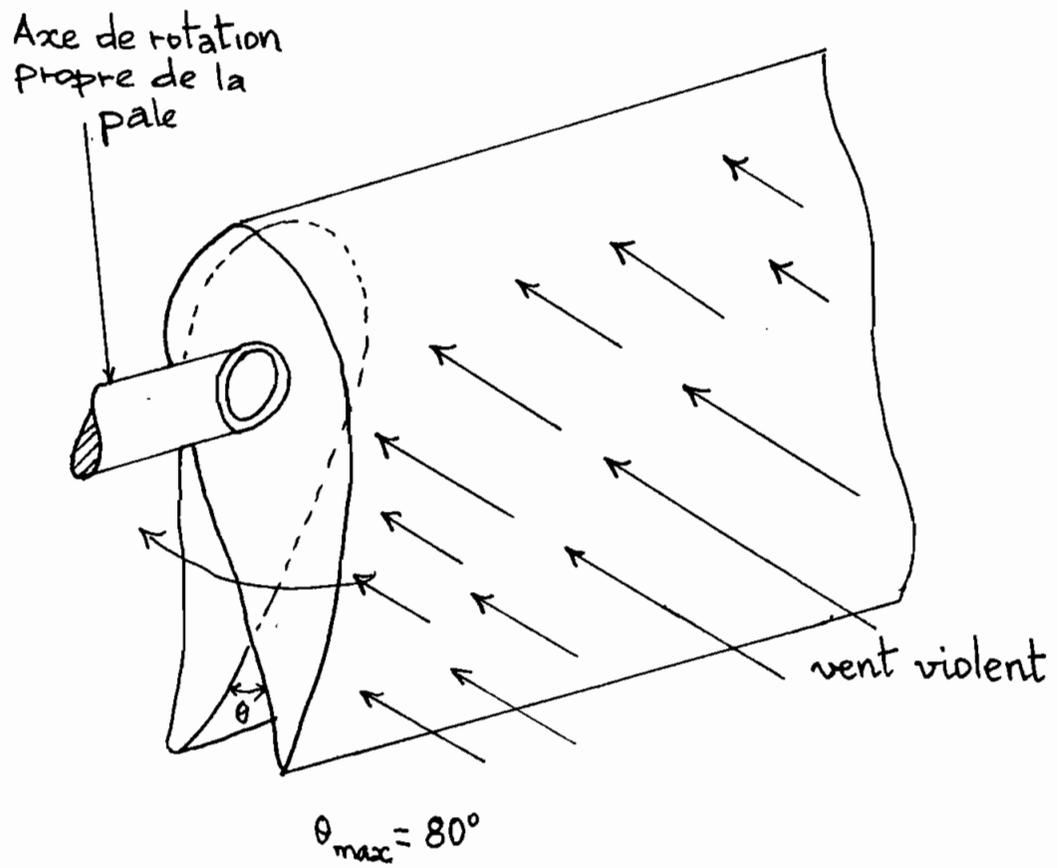
Ce mécanisme permet l'adaptation de la roue à différentes conditions de vent jusqu'à la mise en drapeau par vent très violent. Dans ces cas, les efforts sur les pales sont réduits à leurs valeurs minimales.

Lorsque l'effort de poussée du vent est estompé les pales reprennent leur position initiale et le ressort se décomprime. Un amortisseur de chocs ralentit ce mouvement d'extension du ressort afin d'éviter des vibrations.

Rotation de la pale autour de son axe :

(voir page suivante).

Fig 9: Rotation de la pale autour de son axe :



L'AMORTISSEUR DE CHOCS

Son rôle est de dissiper les chocs et d'empêcher le retour brusque du plateau qui reste toujours sous l'attraction des aimants.

- Ressort standard : 4 SWG
- longueur : 7" soit
- type d'aimants : (PM 74 Rola ; force portante : 40 lbs pour chacun des 6 aimants).
- couple mesuré 37 à 45 ft-lbs
(50.2 à 61 N.m).

Schéma de fonctionnement (D3549)

LA BOITE D'ENGRENAGES

La vitesse (du rotor) de l'alternateur doit atteindre la valeur de la vitesse de conjonction pour commencer à débiter. Cette vitesse de conjonction est souvent élevée, (dans notre cas elle est égale à 735 tpm). Par ailleurs l'excitation n'est possible qu'à partir de 120 à 130 tpm pour le moulin. La roue ne tournant qu'à 170 tpm au maximum selon les vents, il est à prévoir que le générateur ne débiterait aucune tension si on l'accouplait directement à l'éolienne. C'est pour éviter cette situation que l'on utilise un multiplicateur de vitesse entre l'axe de la roue et le shaft du rotor de l'alternateur.

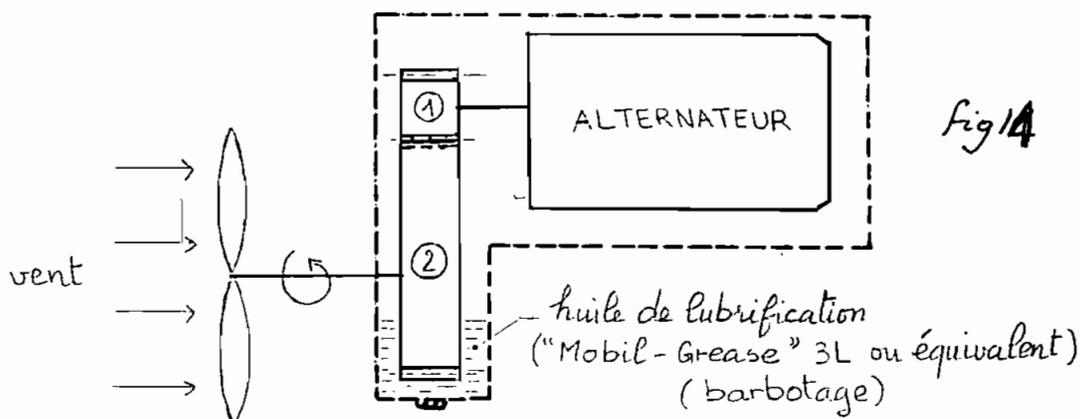
La détermination du rapport de multiplication demande une précaution.

En pratique on choisit le rapport de multiplication k de façon que la courbe C' soit la plus proche possible de la courbe des puissances maximales pour que l'installation fonctionne dans les conditions optimales.

La courbe C' représente la puissance mécanique fournie par l'éolienne au générateur en fonction de la vitesse de rotation de celle-ci.

Nous nous bornerons à cette remarque et invitons le lecteur à consulter "Energie Eolienne : Désiré Le Gourières" pour plus de détails.

$$k = \frac{\text{vitesse de rotation du générateur}}{\text{vitesse de rotation de l'éolienne}}$$



$$k = 5/1$$

(1) : pignon à denture hélicoïdale (en acier)

(2) : roue à denture hélicoïdale (en fonte).

DISPOSITIF D'ORIENTATION

En raison de l'instabilité du vent en direction il est nécessaire d'orienter l'éolienne de manière à permettre aux pales de capter le maximum d'énergie contenue dans le vent.

Il existe plusieurs types de dispositifs d'orientation. Les pales utilisés sont :

- l'empennage
- l'éolienne auxiliaire
- l'éolienne en aval du support
- les dispositifs à servo-moteur
- les dispositifs manuels.

Les besoins de notre étude nous amène à ne considérer que l'empennage.

Pour un fonctionnement satisfaisant, l'empennage doit obéir à certains critères.

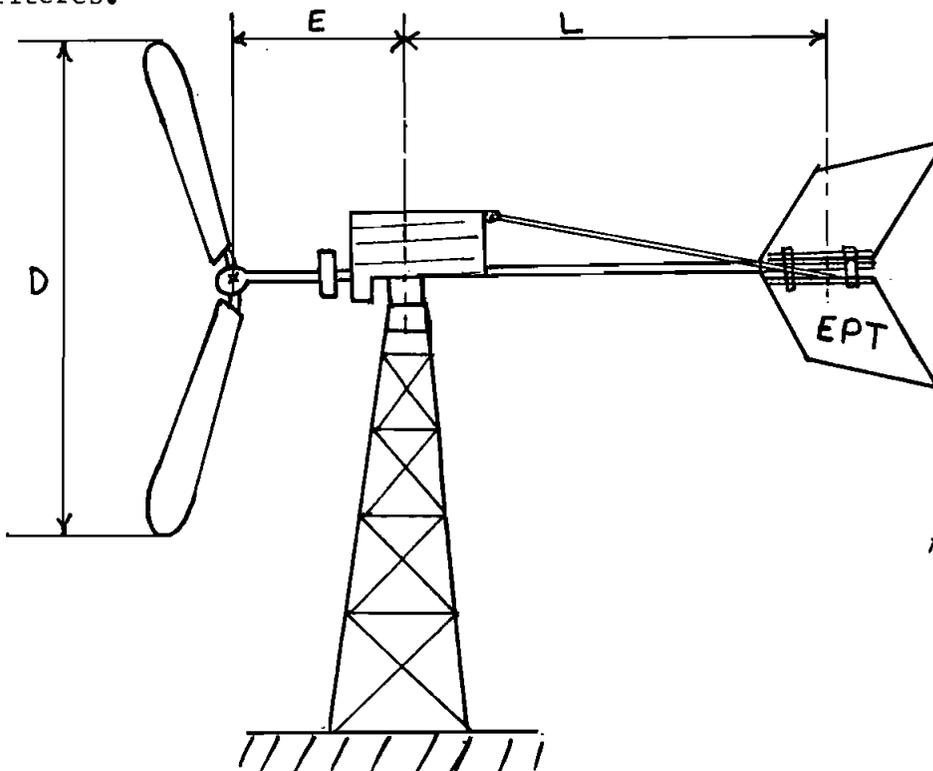


fig 11

- L : distance axe d'orientation-centre de l'empennage.
 E : distance axe d'orientation-plan de rotation des pales.
 D : diamètre de la roue.
 s : surface de l'empennage.
 S : aire balayée par l'hélice.

$$\text{Si } L = 4 E$$

$$s = 10 \% S \text{ pour une éolienne multipale.}$$

$s = 4 \% S$ pour une éolienne rapide bipale
ou tripale.

Si $L \neq 4 E$ $s = 40 \% S \frac{E}{L}$ pour une éolienne multi-
pale.

$s = 16 \% S \frac{E}{L}$ pour une éolienne

L'éolienne que nous utilisons est munie d'un empennage avec

$$L = 4 E$$

$$\text{d'où } s = 0,04 S = 0,04 \times 12,57$$

$$s = 0,5 \text{ m}^2$$

Matériau de construction : tôle de zinc.

PUISSANCE MECANIQUE

Nous avons déjà vu qu'avec la théorie de Betz la puissance mécanique récupérable : $P_{\max} = 0,375 V^3$ V : vitesse en amont

en prenant $\rho_{\text{air}} = 1,25 \text{ kg/m}^3$ s : aire balayée

$$\boxed{P_{\max} = 0,29 D^2 V^3} \quad D : \text{diamètre des pales}$$

Cette formule de Betz n'est que théorique car elle ne tient pas compte des pertes de puissance dues aux frottements, et ignore le rendement global du mécanisme de transmission de la puissance mécanique captée par les pales. Par ailleurs, dans le cas d'un aérogénérateur il faut nécessairement tenir compte du rendement global du mécanisme de transformation de cette énergie mécanique en énergie électrique.

En pratique, l'expérience a prouvé que la puissance des aéromoteurs les plus perfectionnés ne dépasse pas, en général, 60 % à 70 % de la puissance maximale calculée par la formule de Betz.

En première approximation nous adoptons une hypothèse optimiste en prenant : $P'_{\max} = 65 \% P_{\max}$ (voir note) P'_{\max} : puissance pratique estimée de l'éolienne.
 $= 0,65 \times (0,29 D^2 V^3)$

$$\boxed{P'_{\max} = 0,19 D^2 V^3}$$

Note : D'après les tests effectués
 Laboratoire Eiffel sur une
 éolienne bipale estime :
 $P'_{\max} = 0,20 D^2 V^3$ pour les
 éoliennes rapides similaires
 (2, 3, ou 4 pales).

Evaluation de la puissance mécanique, P'_{\max}

$$D = 4 \text{ m}$$

En tenant compte de l'effet d'altitude on peut estimer la vitesse V d'après l'équation suivante déjà vue :

$$\frac{v_1}{v_0} = \left(\frac{h_1}{h_0} \right)^n$$

$$h_1 = 16 \text{ m}$$

$$h_0 = 10 \text{ m (estimation)}$$

$$v_1 = v_0 \left(\frac{h_1}{h_0} \right)^n$$

$$v_0 = 3 \text{ m/sec. moyenne annuelle.}$$

$$v_1 = 3 \left(\frac{16}{10} \right)^{0,20}$$

$$n = 0,20 : \text{terrain peu accidenté.}$$

$$V_1 = 3,30 \text{ m/sec.}$$

$$P'_{\text{max}} = 0,19 (4)^2 (3,30)^3$$

$$P'_{\text{max}} = 109,25 \text{ W} \quad \text{soit environ } 0,11 \text{ kw.}$$

La Puissance transmissible, $P_t = n_m \times P'_{\text{max}}$ où n_m est le rendement mécanique global.

$$n_m = n_{\text{hélice}} \times n_{\text{multiplicateur}}$$

n_m doit être déterminé par des tests rigoureux.

N'ayant aucune donnée sur n_m nous l'estimons à 60 %.

Cette estimation grossière est acceptable vu l'état des pales et des autres organes mécaniques.

$$P_t = 0,60 \times 109,25$$

$$P_t = 65,55 \text{ W}$$

La puissance électrique utilisable, P_e

$P_e = n_e \times P_t$ où n_e : est le rendement électrique global

$n_e = n_{\text{alt}} \times n_{\text{batt}} \times n_{\text{p.l.}}$ avec n_{alt} : rendement de l'alternateur.

n_{batt} : batteries

$n_{\text{p.l.}}$: pertes en lignes.

$$n_e = 0,9 \times 0,70 \times 0,95$$

$$n_e = 60 \%$$

$$P_e = 0,60 \times 65,55$$

$$P_e = 39,33 \text{ W}$$

Cette puissance électrique est insignifiante, juste ce qu'il faut pour alimenter un tube fluorescent devant éclairer un mètre carré d'aire (35 W/m^2 par tube fluorescent).

S'il faut poursuivre notre étude ce sera dans l'espoir de pouvoir exploiter les quelques pointes de vents assez forts que l'on connaît pendant les mois de décembre, janvier et février. Les conditions climatologiques à Thiès nous étant très mal connues il est à prévoir des écarts entre nos prévisions et la réalité future.

L'ALTERNATEUR

Les dynamos (type shunt) et les alternateurs sont les générateurs électriques les plus fréquemment utilisés dans les installations d'aérogénérateurs de petites puissances. Les grandes installations requièrent l'utilisation d'alternateurs ou de génératrices asynchrones.

Les alternateurs offrent la possibilité de produire du courant alternatif qui peut, selon les récepteurs, être redressé (courant continu) ou utilisé directement.

Le redressement rend possible le stockage d'une partie de l'énergie produite dans les batteries d'accumulateurs.

Des raisons importantes font souvent préférer l'alternateur à la dynamo :

- l'alternateur a un meilleur rendement,
- l'alternateur peut débiter à une vitesse plus basse et fournir de l'énergie à des vitesses élevées,
- le rapport entre la vitesse maximale pour un alternateur que pour une dynamo ; il en résulte qu'une installation dotée d'un alternateur pourra utiliser une gamme de vents plus étendue.

Les considérations ci-dessus incitent à une attention particulière pour le choix du générateur électrique. Les paramètres principaux qui conditionnent un bon choix de générateur sont :

- le régime (intensité) des vents qui soufflent dans la région
- les dimensions et les caractéristiques de l'éolienne.

Sous ce rapport trois cas sont à distinguer :

- le générateur électrique entraîné par l'éolienne alimente un réseau à courant continu qui ne comporte que des récepteurs (c'est le cas de notre installation).
- le générateur électrique entraîné par l'éolienne alimente un réseau à courant alternatif qui ne comporte que des récepteurs.
- le générateur débite sur un réseau alternatif à fréquence constante.

Fonctionnement

Le générateur que nous utilisons est un alternateur de type sans bagues ni balais ou encore appelé à redresseurs tournants.

- Principe :

L'alternateur comporte une machine annexe appelée excitateur qui est un alternateur tournant et monté sur l'arbre commun. Cet excitateur délivre donc une tension alternative qui est redressée par un pont de diodes tournantes directement relié du circuit inducteur de l'alternateur principal. La liaison entre le rotor alternateur et le pont redresseur étant réalisée par fils, les bagues d'excitation sont supprimées.

L'inducteur de cet excitateur est alimenté en courant continu par le biais du réhulateur, lui-même alimenté par la tension du réseau.

L'amorçage de l'ensemble se produit grâce au flux magnétique rémanent des machines et au seuil très bas des transistors. Le régulateur à transistors comporte un redresseur, un détecteur d'écart. Le détecteur permet la comparaison de la tension redressée et une tension de référence. Le signal d'écart amplifié agit sur le transistor de façon à modifier sa résistance et à faire varier l'excitation de l'alternateur dans le sens convenable.

Les principaux avantages de ce mode d'excitation sont :

- l'absence d'étincelles
- la réduction de l'encombrement
- l'absence d'usure des balais
- entretien très réduit
- l'exploitation n'exige pas un personnel spécialisé.

Par ailleurs ce type d'alternateur fournit un courant redressé avec un facteur d'ondulation minimum.

Nous reviendrons plus loin sur l'entretien de l'alternateur.

(voir page ci-après le schéma électrique de l'alternateur).

Description du fonctionnement : *Régulateur de tension.*

Un diviseur de tension ayant deux résistances fixes et un potentiomètre sont reliés aux bornes (G+) et (G-) du générateur. Le curseur du potentiomètre est connecté à la base du transistor de contrôle à travers un diode Zener.

Lorsque le générateur est actionné en rotation, une f.e.m. due au champ rémanent est engendrée dans la bobine B incorporée dans le stator principal. Cette tension est redressée et appliquée à l'excitateur par l'intermédiaire de deux transistors montés en Darlington.

Ces transistors reçoivent le courant de base passant par la résistance R_B . A mesure que la tension s'accroît, le courant de base augmente jusqu'à déclenchement des transistors qui alimentent ainsi l'excitateur.

La tension est fixée par le réglage du potentiomètre. Lorsque cette tension de référence est atteinte il existera alors une tension suffisante entre le curseur et la borne G_+ ; ce qui permet à la zener de conduire. Alors un fort courant circulera dans la jonction Base-Emetteur du transistor de contrôle qui devient saturé. Cela a pour effet de bloquer le transistor T_2 : le résultat final est que l'excitateur n'est plus alimenté. L'alternateur voit alors sa tension débitée baisser à cause de l'absence du champ d'excitation. De nouveau la zener cesse de conduire, le transistor de contrôle se bloque et le Darlington est actionné. L'excitation reprend et ainsi de suite.

Le switching sous forme d'impulsions rapides et de champ d'excitation est alimenté de façon à assurer la fourniture de la tension désirée.

Vérification du bon fonctionnement du régulateur de tension.

- Arrêter l'alternateur
- Débrancher les batteries d'accumulateurs
- Remettre l'alternateur en fonctionnement
- Tourner le bouton de réglage du potentiomètre.
 - d'abord complètement dans le sens antihoraire
 - puis complètement dans le sens horaire.

La tension doit varier environ de 44 volts à 72 V, si le voltage ne change pas :

- vérifier que le contact de contrôle RS est en position circuit ouvert et qu'il n'y a pas de court circuit.
- vérifier la tension (G_+ et F).
- vérifier qu'il n'y a pas de coupure dans les fils de connexion du potentiomètre.
- Transistors en Darlington :
 - vérifier qu'il n'y a pas de court-circuit en collecteur et émetteur en plaçant un jumper entre base (fil bleu) et G_+ (fil rouge).
- Si toutes les conditions ci-dessus sont vérifiées, la tension de sortie doit être sensiblement égale à zéro, le voltage réel dépendant uniquement du champ magnétique résiduel.
- Les éléments défectueux doivent être séparés ou changés (voir caractéristiques).

Note : jumper

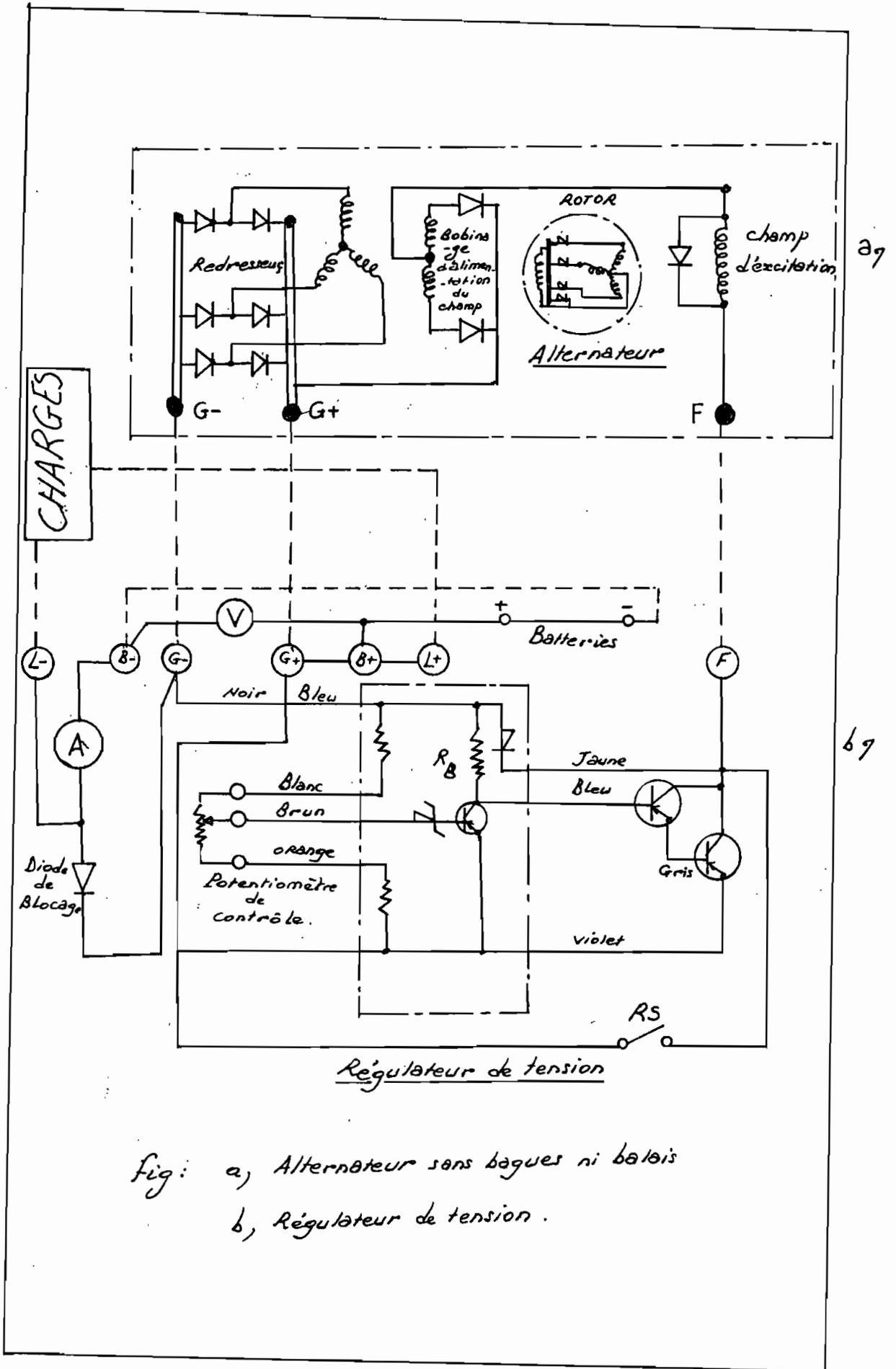
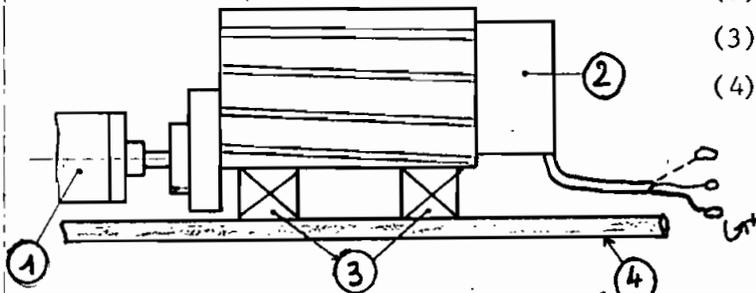


Fig: a, Alternateur sans bagues ni balais
 b, Régulateur de tension.

TESTS DE L'ALTERNATEUR

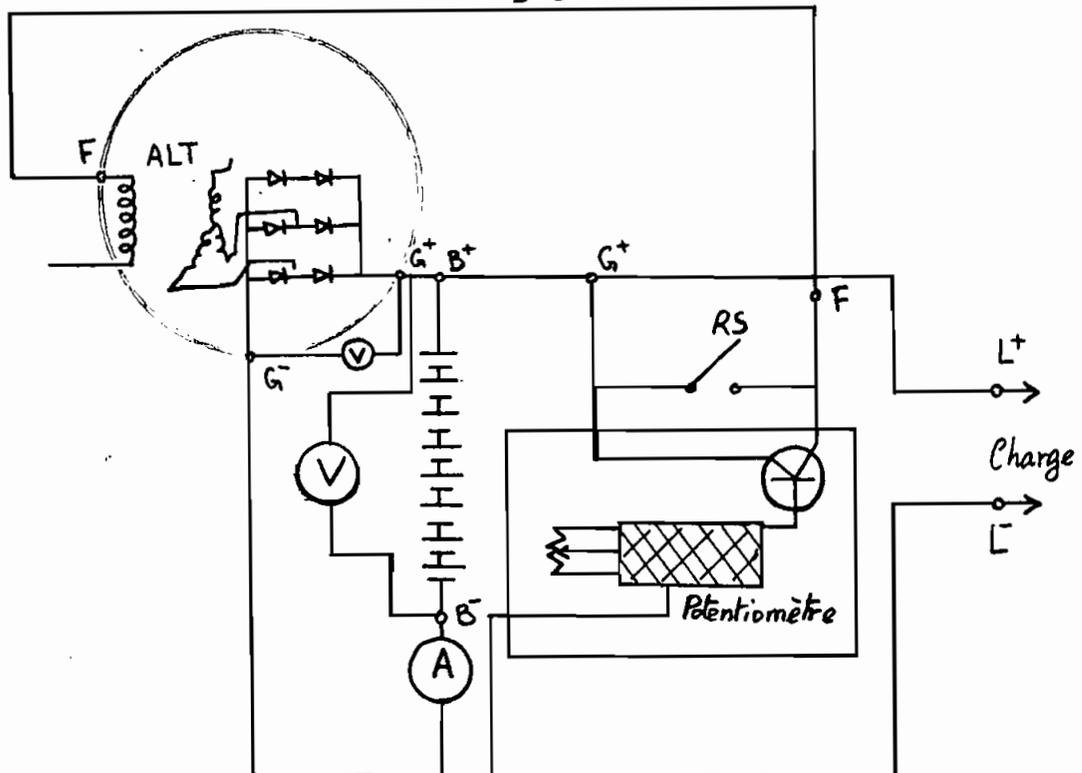
- Buts :
- Vérifier l'état de fonctionnement de l'alternateur disponible.
 - Contrôler le régulateur de tension.

Montage d'un banc d'essai :



- (1) - mandrin du tour
- (2) - alternateur
- (3) - câle-support
- (4) - banc du tour

Schéma de montage simplifié : *fig 12*



Tests : Matériel utilisé :

- Tour : machine outil : moteur : 2,2 kw
- Charge : 6 rhéostats (5 A 7 Ω) : 14,2 //14,2 //14,2

1 multimètre : PM 2505 Elect

VA -METER-PHILIPS

1 multimètre : PHILIPS PM 2403

ETAPE 1

$N = 133 \text{ tpm}$ vitesse d'entrée

$N = 133 \times 5 = 665 \text{ tpm}$

L'alternateur ne débite aucune tension

ETAPE 2

$N = 186 \text{ tpm}$ vitesse d'entrée

$N_{ALT} = 186 \times 5 = 930 \text{ tpm}$

A vide

$$V_{ALT} = 86 \text{ V}$$

$$I_{ALT} = 0$$

En charge

$$V_{ALT} = 81,5 \text{ V}$$

$$I_{ALT} = 4,7 \text{ A}$$

Conclusion :

- Nous constatons que la vitesse de conjonction de l'alternateur soit N_c est telle que

$$5 \times 133 \text{ tpm} \quad N_c \quad 5 \times 186 \text{ tpm}$$

- Le régulateur de tension quant à lui ne fonctionne pas bien car quelque soit le réglage la tension obtenue demeure constante.

LE DISPOSITIF DE STOCKAGE

Le caractère irrégulier du vent en vitesse et en direction pose des difficultés pour une alimentation continue des (utilisations) appareils fonctionnant avec l'énergie électrique produite.

Des études sont encore activement menées en vue de mettre au point des systèmes permettant de stocker l'énergie produite à partir du vent et non directement consommée pendant les périodes de production. La continuité de l'alimentation est alors assurée en restituant une partie de l'énergie **emmagasinée** pour pallier les périodes de vents improductifs.

Dans notre étude nous utiliserons des batteries d'accumulateurs classiques qui restent encore le moyen le plus simple et aussi souvent le moins coûteux pour stocker de l'énergie électrique surtout en faible quantité.

Cependant il convient de noter qu'il existe d'autres systèmes de stockage à côté des batteries d'accumulateurs mais qui sont pour la plupart assez sophistiqués et par le coût se trouvent hors de portée du particulier.

Autres systèmes de stockage :

- le volant d'inertie
- la production d'hydrogène
- le stockage thermique
- l'air comprimé
- la réserve hydraulique, les piles à combustibles, etc.

Fonctionnement :

- 1 - Si $V_{cc} < V_{off}$ l'entrée (+) de l'amplificateur opérationnel (A.O) a une tension inférieure à l'entrée (-) qui reste à 12 V tant que l'intensité dans la diode ZENER est supérieure à 1 mA soit

$$\frac{V - 12}{22 \text{ K}} = 1 \text{ mA} \Rightarrow V > 34 \text{ Volts.}$$

(Si $V < 34$ Volts la batterie est morte).

Donc $V_+ < V_-$ l'ampli-Op. sort 0 Volt

Ce qui entraîne le blocage de T_0 et par conséquent le blocage de T .

- 2 - Si $V_{cc} > V_{on}$ on a $V_+ > V_-$ l'ampli-op. sort environ 20 Volts.

Dans ces conditions :

- $I_{BT_0} = \frac{20 + 12}{10 \text{ k}} = 0,8 \text{ mA}$

- T_0 est saturé

- T est saturé

- 3 - Si $V_{off} < V_{cc} < V_{on}$

↳ $V_+ > V_-$ à cause du feedback par R_H

(L'Ampli-Op. avec son feedback positif constitue un trigger de SCHMITT.).

LES CHARGES ELECTRIQUES THEORIQUES

Pour l'essentiel nous n'utilisons que des résistances mortes afin de simuler le fonctionnement général de nos appareils électriques.

En fonction de la puissance électrique disponible nous planifions notre installation. Nous n'entrerons pas dans des détails d'installation électrique notre souci dans ce projet se limite à déterminer exactement les performances de l'aérogénérateur.

LA BOITE DE CONTROLE

Régulateur :

réglage de 46 à 64 volts

Ampèremètre à zéro central :

404 - 0 - 40 Ampères.

Voltmètre : 0 - 80 volts.

RS : bouton : ON/OFF du régulateur.

R_H : Réglage hystérésis

R_V : (potentiomètre) réglage de V_{on}

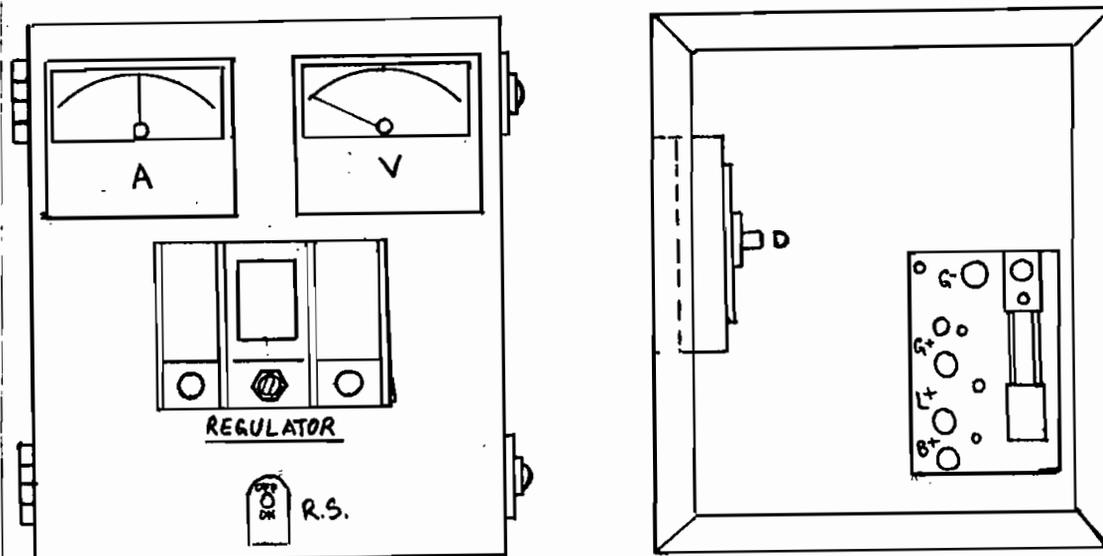


fig 10

CHAPITRE IV

MONTAGE DE L'EOLIENNE

TRAITEMENTS DE REMISE EN ETAT DES PIECES MECANIQUES

Il s'agit d'organes métalliques attaqués par la corrosion.
Comme méthode de protection contre la corrosion nous avons fait des revêtements non métalliques à la peinture.

Procédure

- grattage de la surface
- piquage des points d'attaque profonde
- peinture :
 - couche d'apprêt : minium SAEC.
 - couche de finition : peinture au zinc SAEC.

Pièces traités :

- carcasse de l'alternateur
- les pales
- l'empennage
- le support de l'alternateur.

ASSEMBLAGE DU MECANISME

Le montage de certains sous-ensembles requiert des précautions :

- Fixation du support de l'alternateur sur le sommet de la tour

En prévision des vibrations le support de l'alternateur doit être solidement fixé par boulonnage sur le sommet de la tour.

(consulter dessin de montage du support Dessin N°).

Le montage des pales

Les 3 pales en rotation doivent être installées de façon à réaliser l'équilibrage dynamique. Avant le montage vérifier que les pales ne présentent pas d'aspérités ou de déformations par suite de chocs éventuels pendant le hissage.

- Les axes qui reçoivent les pales sont numérotés 1, 2, 3.

- Les pales portent elles aussi les numéros 1, 2, 3.

Au montage, il faut veiller à ce que chaque pale soit fixée sur l'axe ayant le même numéro :

soit :	pale	axe
	1	1
	2	2
	3	3

- Les axes sont au préalable enduits de graisse au silicium. (ou équivalent) pour leur protection contre la corrosion.

Le montage du système de régulation de vitesse :

- Les masselottes numérotées de 1 à 3 doivent être montées sur des pales de même numéro.

	pale	masselotte
	1	1
	2	2
	3	3

- vérifier que les 2 petits vérins sont remplis d'huile visco-statique 10/30 (ou huile équivalente).

- Longueur du ressort central comprimé

$$L = 177,8 \text{ mm (7 pouces).}$$

Le montage de l'empennage

S'assurer que le feuillet de tôle est bien fixe sur la barre métallique par les 2 boulons en U.

Remarque : Une erreur de montage des pales ou des masselottes par interversion des numéros romprait l'équilibre dynamique et occasionnerait des vibrations dans la structure.

INSTALLATION DE L'EOLIENNE SUR LA TOUR

Vu que le poids total du mécanisme monté est important :
3022 N (309 kg) et que les pales sont assez encombrantes ; il est
plus aisé de hisser l'éolienne par morceaux ou par sous-ensembles.
C'est ce que nous avons fait : (voir photos en annexe).

Sous-ensembles considérés : - support de l'alternateur
- Alternateur
- Support des pales
- Pales
- Empennage

matériel utilisé : - ~~câble~~ câble ordinaire en sisal
- câble métallique
- treuil
- potence.

PROTECTION DES BATTERIES

Les batteries d'accumulateurs au plomb doivent être protégées contre les intempéries atmosphériques :

- Températures très élevées
- poussières
- rosée
- Agents chimiques
- Irradiations qui pourraient entraîner la dégradation des bacs en matières plastiques.
- etc.....

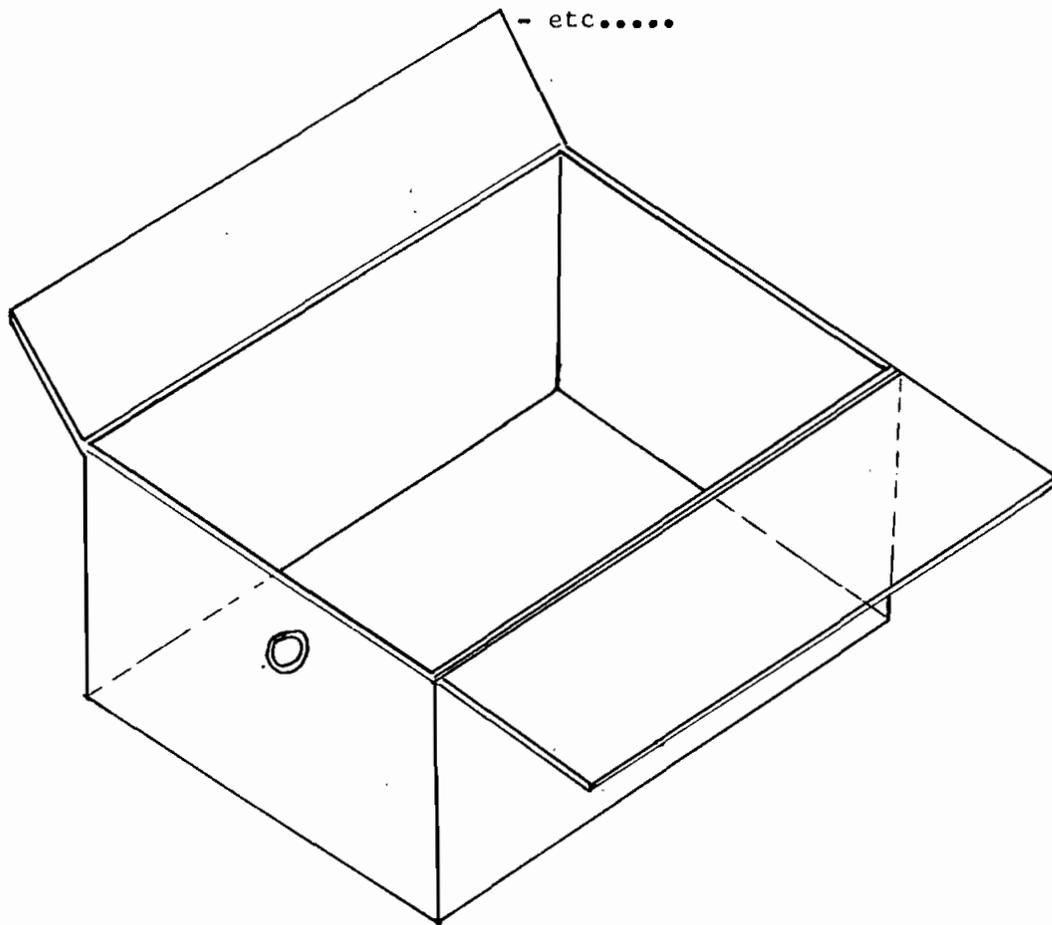


fig 15: Armoire métallique devant contenir les 8 batteries d'accumulateurs au plomb.

PROTECTION CONTRE LA Foudre

Les aérogénérateurs sont généralement placés sur des points hauts. Afin de bénéficier de régime de vent régulier et non perturbé. On les installe plus hauts que les obstacles environnants. Ils sont ainsi souvent exposés et constituent des points de décharges atmosphériques.

Pour éviter des problèmes au matériel en cas de prise de foudre, il est essentiel de protéger les installations en

- reliant le pylône support d'aérogénérateurs à une bonne prise de terre (résistance la plus faible possible : $R \leq 3$) .
- disposant des éclateurs à gaz sur l'arrivée des câbles électriques de l'aérogénérateur aux utilisations. La tension d'amorçage de ces éclateurs sera voisine de 2 fois la tension maximale du générateur électrique :
 - dynamo (courant continu) : U (éclateurs) = extension à vide.
 - alternateur (C.A) : U (éclateurs) = 2 tensions à vide efficace.

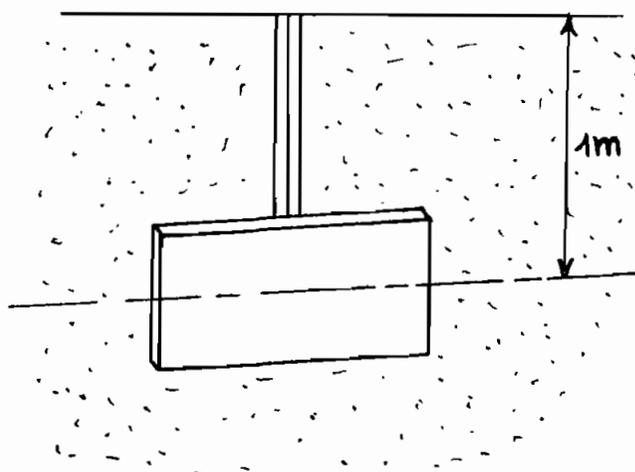
Ces éclateurs seront reliés à la prise de terre par une ligne la plus directe possible.

Dans notre étude nous alimentons en courant continu (50 V).

Nous prévoyons alors des éclateurs comme dans le cas d'une dynamo.

Résistances de la prise de terre : Fig 19

Nous utiliserons une prise en plaque verticale.



$$R = 0,8 \frac{\rho}{L}$$

: résistance d'un sol pierreux.

Tableau 2, Page 161

Guide de l'installation électrique (M. Gérin).

$$\rho = 1500 \Omega \cdot m$$

L: périmètre de la plaque

$$\text{pour } R = 3k\Omega, L = 0,400m = 400m$$

CHAPITRE V

EXPLOITATION

EVALUATION DE LA PERFORMANCE DE L'AEROGENERATEUR

Mesures - Tests - Enregistrements

En raison des vents très faibles et du régime très irrégulier que nous avons connus depuis la fin des travaux d'installation il s'est avéré très difficile de tester la performance de notre aérogénérateur. Par ailleurs, il faut noter l'état défectueux des batteries d'accumulateurs. La mauvaise qualité des enregistreurs a constitué un petit blocage pour les prises de mesures.

Sur l'ampéremètre de la boîte de contrôle, on pouvait noter quelques pointes de courant par suite de coups de vent. Dans ces conditions nous avons évité de charger le circuit ^{sinon} ce-qui, ^{ou} du-reste, aurait vidé nos batteries déjà défectueuses.

La vitesse ^{de}conjonction de l'alternateur de "150 tpm" correspond à une vitesse moyenne de vent de 10 mph (= 4.47 m/sec). Cette vitesse est rarement atteinte en dehors de la période Décembre - Février comme les relevés l'indiquent.

Après un mois d'observation nous avons retenu de procéder à des mesures simultanées de vitesse de vent et des courants de charge et de décharge des batteries d'accumulateurs. Le but est de déterminer les courants en fonction de la vitesse du vent.

- Le matériel utilisé comprend :
- un anémomètre à coupelles classique.
 - le circuit électronique de l'anémomètre.
 - câbles (220 V)
 - 2 enregistreurs Heatkit.
 - 1 shunt 20 A 100 m Volts.

Etalonnage des enregistreurs :

* pour les vitesses de vent : 1 graduation (1 pouce) correspond à 4,3 m/sec.

* pour les courants de charge et de décharge, voir tableau des mesures.

NOTE : En Annexe nous présentons les enregistrements effectués.

Tableau des mesures de vitesses instantanées de vents et d'intensités
de courant de charge et de décharge des batteries

Période 03/4/83 - 04/4/83	Heures de mesure	Vitesses instan- tanées de vent (m/sec)	Intensité instantanée de courant
<u>03/4/83</u> à :	08 H 00	4.94	- 1.2
	10 H 00	5.59	- 1.2
	12 H 00	6.88	- 1.2
	14 H 00	6.88	- 1.2
	16 H 00	8.77	9.0
	18 H 00	11.61	+ 9.2
	20 H 00	16.77	+ 20.6
	22 H 00	18.49	+ 16.4
	24 H 00	17.2	+ 17.6
<u>04/5/83</u> à :	02 H 00	12.47	+ 10.8
	04 H 00	8.6	+ 8
	06 H 00	7.96	+ 7.6
	08 H 00	14.40	+ 16

NOTE : Les courants de charge sont comptés positivement (+) tandis que les courants de décharge sont comptés négativement (-).

Etalonnage :

Vitesse : 1 pouce correspond à 4,3 m/sec.

soit 1 division = 0,43 m/sec.

Courant : 1 pouce correspond à 4 Ampères.

soit 1 division = 0,4 Ampères.

Analyses et interprétations des mesures

Les vitesses et intensités de courant consignées dans le tableau des mesures ci-haut doivent être considérées uniquement comme des indications. En effet avec l'état défectueux des enregistreurs utilisés les mesures sont inévitablement erronées.

Ces mesures indiquent quand même que la charge des batteries ne commence pas avant une vitesse de vent d'environ 7 à 8 m/sec. Pour un site comme le nôtre où la vitesse **moyenne** est environ 3 m/sec., il serait illusoire d'assurer une quelconque fourniture d'électricité.

La conclusion sur ce point est que l'aérogénérateur Dunlite dont nous disposons n'est pas du tout adéquat pour les conditions de notre site.

ETUDE DES UTILISATIONS D'UN TEL AEROGENERATEUR

Cette partie de l'étude est complètement compromise car nous n'avons pas pu effectuer des tests de performance sous charge pour des raisons plus haut. Il est dès lors clair que des prévisions seraient difficiles à faire.

Pour la fourniture d'électricité à des fins d'utilisation domestique, il faut dire que l'étude n'est pas du tout concluante.

Comparaison avec l'éolienne mécanique lente équipée d'une pompe à piston

Performance (pompage de l'eau)

En première approximation les puissances maximales que peuvent développer les éoliennes lentes et rapides sont respectivement :

$$P_L = 0.15 D^2 V^3$$

et

$$P_R = 0.20 D^2 V^3$$

Mais avons vu que pour un aérogénérateur qu'il faut tenir compte des différents rendements des dispositifs de transformation d'énergie.

Soit e_g , le rendement global des dispositifs mécaniques et électriques employés pour convertir l'énergie éolienne captée en énergie électrique.

Soit P_A la puissance fournie à une pompe centrifuge accouplé à un petit moteur électrique alimenté par notre aérogénérateur.

$$\text{on a } P_A = P_R \times e_g = 0.20 D^2 V^3 e_g$$

Par ailleurs, nous savons qu'en général les pompes à piston ont un rendement supérieur à celui des pompes centrifuges.

Admettons : - pour la pompe à piston un rendement de 70 %

- pour la pompe centrifuge, 55 %

- pour le moteur d'entraînement de la pompe centrifuge, 80 %

Appelons : Q_L : le débit d'eau pompée par l'éolienne lente en lit/sec.

Q_A : le débit d'eau pompée par l'aérogénérateur en lit/sec.

H ; la hauteur manométrique totale en mètres.

w : le poids volumique de l'eau (= 9810 N/m²).

On a les relations suivantes :

$$wHQ_L = 0.75 P_L = 0,75 \times 0.15 D^2 V^3 \quad (1)$$

$$wHQ_A = 0.80 \times 0.55 \times P_A = 0.80 \times 0.55 \times 0.20 D^2 V^3 e_g \quad (2)$$

$$(1) \text{ implique } Q_L = \frac{0.75 \times 0.15 D^2 V^3}{wH}$$

$$(2) \text{ implique } Q_A = \frac{0.80 \times 0.55 \times 0.20 D^2 V^3 e_g}{wH}$$

Pour un rendement global $e_g = 0.50$, on a :

$$\frac{Q_L}{Q_A} = \frac{0.75 \times 0.15}{0.80 \times 0.55 \times 0.20 \times 0.50} = 2.6$$

$\frac{Q_L}{Q_A} = 2.6$	$Q_A < Q_L$
-------------------------	-------------

Pour avoir l'égalité des débits : $Q_A = Q_L$

$$Q_A = \frac{0.80 \times 0.55 P_A}{wH} = Q_L = \frac{0.75 P_L}{wH}$$

$$P_A = \frac{0.75}{0.80 \times 0.55} P_L$$

$$P_A = 1.7 P_L$$

or $P_A = P_R \times e_g$

soit alors $P_R = \frac{1.7}{e_g} P_L$

$$P_R = \frac{1.7}{0.5} P_L$$

d'où $P_R = 3.4 P_L$

sachant que $P_L = 0.15 D^2 V^3$

il vient : $P_R = 3.4 \times 0.15 D^2 V^3$

$$\boxed{P_R = 0.51 D^2 V^3} > 0.20 D^2 V^3$$

Ce qui est une contradiction avec nos hypothèses, et la théorie fondamentale de Betz n'est plus vérifiée : $P = 0.29 D^2 V^3$.

Remarque : On en déduit que pour : même diamètre, même vitesse de vent, bref mêmes conditions de travail, l'éolienne lente est environ 2,6 fois plus performante que le pompage par aérogénérateur.

Dans le cas de nos installations pour fournir seulement un débit de 1 l/sec. avec une hauteur manométrique totale H de 10 mètres.

On aurait d'après l'équation (2)

$$D^2 V^3 = \frac{wHQ_A}{0.80 \times 0.55 \times 0.20 \times e_g}$$

$$V = \left[\frac{wHQ_A}{0.80 \times 0.55 \times 0.20 \times e_g \times D^2} \right]^{7/3}$$

$$V = \left[\frac{9810 \times 10 \times 10^{-3}}{0.80 \times 0.55 \times 0.20 \times 0.50 \times 4^2} \right]^{7/3}$$

$$V = 5,18 \text{ m/sec}$$

Ce qui, en égard aux conditions météorologiques du site représente seulement 31 % des vents. Il est donc à exclure l'utilisation de cet aérogénérateur pour le pompage de l'eau.

Coûts :

Au niveau des coûts d'acquisition : d'une façon générale l'éolienne lente multipale revient moins chère que l'aérogénérateur. Quant aux frais d'exploitation, l'aérogénérateur demande une surveillance régulière et un entretien suivi surtout au niveau des dispositifs de stockage, et de protection.

Autres Utilisations domestiques :

Dans les conditions de fonctionnement normal cet appareil conviendrait pour l'éclairage d'une petite localité villageoise d'une dizaine d'habitants.

ETUDE DES POSSIBILITES D'AMELIORATION DE LA PERFORMANCE

L'étude que nous venons de faire a consisté à voir, à partir d'un aérogénérateur déjà conçu et construit, les performances possibles dans des conditions météorologiques d'un site donné. Une autre approche aurait permis de procéder à une étude inverse consistant à examiner le potentiel éolien du site avant quoique ce soit et pour ensuite, concevoir un aéromoteur complet en fonction d'objectifs précis préalablement définis. Dans un sens ou dans l'autre, les problèmes qui se posent sont sensiblement différents mais il reste qu'une démarche scientifique inciterait à travailler à partir d'objectifs précis.

Plusieurs paramètres peuvent être modifiés en vue d'améliorer le rendement de notre installation, nous allons examiner tour à tour chacun de ces paramètres en maintenant toutes choses égales par ailleurs.

1 - Hauteur de la tour

Il ne sera pas question de modifier le support de l'aérogénérateur qui mesure actuellement 16 mètres. Ce support de construction rigide est inamovible. Par ailleurs, des considérations d'ordre économique montreraient que l'installation deviendrait dispendieuse (coûts des profilés, de la main d'oeuvre). Coût actuel du support : 1.100.000 F cfa.

2 - Conception et nombre des pales

Plus le nombre des pales est petit, plus l'éolienne tourne vite, ce qui est recherché dans la conception des aérogénérateurs ; cependant les éoliennes bipales ou unipales sont de construction très délicate en raison des précautions contraignantes d'équilibrage statique et dynamique qui doivent être rigoureusement observées. Le nombre de 3 est acceptable, ce sont plutôt les éléments de désignation qu'il faut étudier.

• Le diamètre :

$P_{\max} = 0.20 V^3 D^2$: la vitesse V est imposée par les conditions climatologiques que nous ne maîtrisons pas, pour augmenter la puissance le seul élément de réglage est le diamètre, D. On peut vérifier que lorsque D est multiplié par 2, alors la puissance est multipliée par 4.

• Le profil et l'angle de calage

Le choix du profil et la détermination de l'angle de calage requièrent généralement des tests par simulation souvent laborieux. Nous n'entrerons pas dans les détails, cependant il faut signaler que de

nombreux programmes informatisés sont disponibles pour ces calculs.

Quelques exemples de Programmes tirés du livre "Energie Eolienne : M. Désiré le Gourières" sont proposés en annexe.

3 - Le générateur électrique

Le choix de l'alternateur sans bagues ni balais est adéquat mais son état actuel mérite qu'on s'y penche plus que nous ne l'avons fait dans ce projet; En fonction de la destination et des objectifs de l'installation, même un changement de générateur électrique ne serait pas à exclure comme solution.

Le rapport de multiplication de 5:1, en régime de vents aussi faibles, est insuffisant ce qui fait qu'il est difficile d'atteindre la vitesse de conjonction de l'alternateur (N environ "150 tpm"). Une étude devrait permettre de choisir un rapport de multiplication adéquat à partir des caractéristiques Puissance vitesse de l'éolienne et la caractéristique Puissance mécanique fournie par l'éolienne pour l'entraînement de l'alternateur.

Remarque : Toutes les questions que nous venons d'examiner n'auraient de l'importance que sur la base d'une bonne connaissance des conditions météorologiques de vent dans la région.

Ces données météorologiques nous manquent encore.

ENTRETIEN DE L'INSTALLATION

Les aérogénérateurs, comme n'importe quel mécanisme, requiert des coûts d'entretien assez faibles si une attention soutenue est portée à l'entretien préventif.

Les cahiers techniques fournis par le constructeur est le principal guide pour l'entretien.

Dans notre cas une brochure technique de la Compagnie Dunlite est disponible à l'Ecole Polytechnique. Ce document renferme tous les détails des travaux de maintenance. Nous nous bornerons ici de rappeler les points clés de ces travaux.

1 - La tour

Les structures métalliques de la tour et tous les autres organes mécaniques de l'installation doivent être inspectés régulièrement chaque année afin d'annihiler les attaques par la corrosion. Ces attaques progressives finissent par affaiblir les éléments et peuvent être arrêtées par repointure. (peinture au zinc).

2 - Les pales

La surface des pales doit être tenue assez lisse par une préservation contre les impôts.

3 - La boîte d'engrenages

Contrôler tous les 2 à 3 mois la qualité visqueuse de l'huile de lubrification.

Vérifier le niveau d'huile afin d'assurer le barbotage des dents d'engrenages. Eviter les fuites d'huile par le trou de vidange.

4 - Le régulateur de vitesse

Vérifier le niveau d'huile dans les vérins. En principe cela ne devrait se faire qu'en cas d'entretien curatif sur les pales ou leur support.

5 - Les freins

Si un ajustement adéquat a été fait lors du montage du système de freinage, le seul point d'observation restera l'usure de la garniture de la bande.

- Les vibrations

Ce phénomène qu'il ne faut jamais tolérer dans le fonctionnement de l'installation peut provoquer le desserrage de certains boulons ou vis. Il s'avère nécessaire de procéder à une inspection générale des différents points d'assemblage chaque fois que des signes particuliers

(bruits anormaux, jeux excessifs) s'annoncent.

- L'alternateur

Les alternateurs sans bagues ni balais, de par leur technologie, demandent un entretien assez réduit. Seulement il faudrait préserver les enroulements (statoriques et rotoriques) contre des échauffements excessifs prolongés par temps de survitesse des pales ou de surcharge.

- La mise à la terre

En raison des conditions sévères de **corrosion** auxquelles la résistance de prise de terre est soumise, on devra une fois par année, effectuer des mesures de vérification de la valeur de cette résistance.

- Les batteries d'accumulateurs

A ces éléments, nous consacrons dans les pages qui suivent une étude spéciale.

QUELQUES MESURES DE SECURITE

- Utiliser toujours : une ceinture de sécurité et
un casque de sécurité en cas d'intervention sur l'installation.
- Un feu de signalisation nocturne devrait permettre de soustraire l'Aérogénérateur aux risques d'accidents avec les appareils spaciaux (avions, hélicoptères, etc....).

ENTRETIEN DES BATTERIES D'ACCUMULATEURS

L'entretien d'une batterie est souvent dicté par l'usage qu'on en fait. Ainsi une batterie d'automobile reçoit un soin plus ou moins attentif, tandis qu'une batterie semi-fixe (c'est le cas avec les aérogénérateurs) requiert une surveillance suivie et systématique.

Entretien préventif

- Un mauvais choix du type de batterie au début de l'installation est à éviter.

* Vérifier les caractéristiques de charge et de décharge (l'intensité et le temps).

- Soustraire les batteries au risque d'altération par les intempéries atmosphériques en les abritant dans une cage (construction en maçonnerie, caisse métallique ou en bois).

- Vérifier régulièrement le niveau de l'électrolyte et le maintenir à une position déterminée par addition d'eau distillée.

- La densité de la solution d'acide sulfurique donne une indication de l'état de charge de la batterie. L'eau pure a une densité relative de 1,00 alors que celle de l'acide sulfurique pure est de 1,85.

L'électrolyte d'une batterie qui vient d'être chargée est d'environ 1,28 tandis que celle d'une batterie complètement déchargée est de 1,12.

La détermination de la densité se fait au moyen d'un pèse-acide.

- Ne jamais laisser une batterie partiellement chargée en repos prolongé. Un repos prolongé conduit à sulfatation des plaques. Le dépôt blanchâtre de sulfate de plomb ($PbSO_4$) sur les plaques négatives durcit et devient insoluble dans l'acide, la surface active est réduite et la résistance interne des éléments augmente. La capacité de la batterie est ainsi réduite, chose à éviter.

Entretien curatif ou correctif

Remise en état d'accumulateurs au plomb type semi-fixe par suite d'un dommage permanent des plaques ayant pour causes :

- une sulfatation avancée des plaques.
- déformation des plaques sous l'effet d'échauffement par surcharge prolongée.

Bien qu'il soit préférable de se reporter à des ouvrages spécialisés pour la régénération des batteries au plomb, nous proposons

ci-après quelques rudiments qui peuvent éventuellement être suffisants.

- Démontrer les plaques et les sortir du boîtier pour les débarrasser de la pellicule constituée par le dépôt de matière active au fond des bacs.

- Brosser les plaques négatives dans un jet d'eau.

- Redresser les plaques positives s'il y a lieu avec un maillet ou changer si nécessaire.

- Une désulfatation par une série de charges à faible intensité permet de nettoyer les plaques sulfatées (teinte blanchâtre pour les plaques négatives et teinte claire pour les plaques positives). Dans cette opération, il faut remplacer l'acide par de l'eau distillée (ou de l'eau de pluie). Cette eau s'enrichit d'acide que l'on ramène à la concentration normale lors de la remise en service de l'élément.

REMARQUE : Lorsqu'on désire laisser une batterie en repos prolongé il est nécessaire de la stockée chargée en remplaçant l'acide par de l'eau distillée.

ETUDE ECONOMIQUE

Discussions et Recommendations

Des données exactes sur les prix de revient du kilowatt-heure (kwh) de l'électricité formé par les différentes sources d'énergie nous auraient permis de faire une étude comparative afin de déterminer la place des aérogénérateurs au niveau National. Par ailleurs la performance de notre installation n'ayant pu être évaluée pour les raisons que nous avons déjà évoquées on peut comprendre qu'aucune étude économique véritable ne puisse être menée dans ces conditions.

Nous pouvons cependant essayer de situer l'importance de l'énergie éolienne et des aérogénérateurs sur le plan National à partir du tableau récapitulatif suivant :

(Energies) Origine	Etat d'exploitation	Remarques
Centrales thermiques	Centrales SENELEC	Concentration au Cap-Vert Desserte des centres urbains
Groupes électrogènes	à essence à gas-oil (Diesel)	rarement utilisés desserte des régions de l'intérieur (Départements Arrondissements)
Solaire	Centrale de Diakhao + Industrie alimentaire + pompage eau	Coûts des panneaux solaires encore trop élevés.
Hydroélectrique	Projets de Barrage en voie de réalisation (Manatoli)	-Coûts d'exploitation élevés. -Conséquences écologiques et sociales.
Nucléaire	Etudes expérimentales	-
Lignite, pétrole	Prospections	Kafountine (Casamance)
Charbon	inexistant	-
Tourbe	Etudes expérimentales	-
kérosène (pétrole)	aviation + lampe à pétrole (village)	70 % des populations sont rurales.
Eolienne	Pompage de l'eau + Production d'électricité	hydraulique villageoise et pastorale quasi inexistant.

Eolienne Dunlite : Puissance nominale 2000W

• <u>Prix</u> : Ensemble - batteries, Tour	= \$10.000 Canadien
	= 3.000.000 F CFA
• Batteries 8 x 40.000	= 320.000 F CFA
• Tour	= 1.100.000 F CFA
• Construction tour	= 200.000 F CFA

Prix total approximatif TTC : 1,5 (3.000.000 + 1.100.000)
 + 320.000
 + 200.000

 6.350.320 F CFA

Ce montant représente un coût minimum d'acquisition d'un tel aérogénérateur, alors qu'un panneau solaire de 0,42 V, 1,33 A coûterait autour de 18 \$ U.S. (soit pour 42 V : 650.000 F CFA).

On voit donc que malgré la cherté des cellules solaires un aérogénérateur coûte 7 à 9 fois plus cher.

Les tableaux qui suivent permettent d'une manière générale de faire une comparaison entre l'énergie d'origine éolienne et l'énergie provenant d'autres sources. Les prix sont donnés en Franc Français (1980) avec l'inflation les prix réels actualisés sont bien supérieurs.

En scrutant ces tableaux quelques remarques s'imposent :

- 1) Pour les types d'éoliennes étudiées on note que le prix de revient du kwh diminue quand la puissance nominale de l'aérogénérateur augmente.
- 2) Aux puissances élevées il apparaît que les aérogénérateurs sont plus rentables que les groupes électrogènes.

Faut-il en déduire qu'on doit utiliser les grosses installations d'aérogénérateurs à la place des groupes électrogènes ? La réponse ne peut-être trop nette car des considérations d'ordre technique interviennent à ce niveau.

En effet dans la pratique il est difficile voire impossible d'avoir une fréquence fixe avec les aérogénérateurs à cause des

variations de la vitesse du vent. C'est d'ailleurs principalement, pour cette raison que les gros aérogénérateurs sont branchés sur un réseau stable qui impose sa fréquence.

C'est plutôt en fonction des caractéristiques du site et des utilisations prévues qu'on pourra opter judicieusement. Ainsi si l'objectif est d'assurer un éclairage en courant continu, l'aérogénérateur est plus indiqué que le groupe électrogène.

Au Sénégal plus de 70 % de la population est rurale et malheureusement le réseau SENELEC ne dessert que les centres urbains (pour l'essentiel). Dans ces conditions, l'éclairage dans les maisons, dans les villages et même dans certains départements des régions de l'intérieur du pays, se fait jusqu'ici avec la "lampe tempête". Cette lampe utilise du kérosène produit dérivé du pétrole ; or les cours mondiaux pétroliers ne cessent de monter (actuellement la facture pétrolière représenté environ 40 à 45 % des recettes d'exportation du Sénégal). Le pouvoir d'achat des consommateurs diminue sans cesse.

Pour ces raisons, il est possible d'entreprendre une électrification des zones rurales pour les besoins d'éclairage avec des aérogénérateurs en fonction, bien sûr, des spécificités météorologiques de chaque site. Il faut noter que cette politique doit s'inscrire nécessairement dans le cadre d'un plan national de revalorisation des milieux ruraux.

Précisons enfin que l'électrification complète de ces zones pourra quand même difficilement se concevoir avec seulement l'énergie éolienne. Par ailleurs, les coûts exorbitants des aérogénérateurs surtout dans les pays du Tiers-Monde s'explique par plusieurs raisons :

- le déséquilibre entre le Nord et le Sud au niveau des échanges commerciaux ;
- un mauvais choix des matériaux de construction, etc.....

C'est pourquoi nous devons examiner la question de la rentabilisation des aérogénérateurs avec des yeux neufs (par exemple essayer l'emploi des matériaux locaux comme le bois).

TABLEAU 31

Type d'éolienne	Diamètre	Puissance nominale	Prix H.T. Eolienne batterie	Prix total approximatif pylône+taxes inclus	Production annuelle escomptée en kWh	Investissement par kWh installé	Prix de revient du kWh hors maintenance
Enag	2,35 m	650 W	10 000 F	14 000 F	1 620	21 500 F	1,40 F
Enag	2,55 m	1 000 W	15 000 F	20 000 F	2 500	20 000 F	1,30 F
Enag	4,30 m	3 000 W	30 000 F	40 000 F	7 500	13 500 F	0,87 F
Aérowatt FP7	5 m	1 100 W	50 000 F	65 000 F	5 500	59 000 F	1,90 F
FP7	9,20 m	4 100 W	120 000 F	160 000 F	23 500	49 000 F	1,10 F
Neypic	21,20 m	132 kW		800 000 F	330 000	6 100 F	0,40 F
Gedser	24 m	200 kW		700 000 F	500 000	3 500 F	0,23 F
Best Romani	30 m	800 kW		5,7 M	2 000 000	7 100 F	0,48 F
Neypic	35 m	1 000 kW		5,8 M	2 500 000	5 800 F	0,38 F

TABLEAU 32 – GROUPE ÉLECTROGENE A ESSENCE (Amortissement sur 1 an)

Marque	Puissance	Prix T.T.C.	Consommation l/h	Durée de vie estimée	Dépense en carburant par kWh	Amortissement par kWh	Prix de revient du kWh hors maintenance
Honda	300 VA	2 000 F	0,4	2 000	2,7	3,34	6,04 F
	650 VA	2 000 F	0,7	2 000	2,16	1,54	3,70 F
	800 VA	2 400 F	0,7	2 000	1,75	1,5	2,25 F
	2,5 kVA	4 300 F	1,5	3 000	0,58	0,5	1,08 F
Briban	1 kVA	2 500 F	0,8	3 000	1,6	0,83	2,43 F
	2 kVA	3 400 F	1,3	3 000	1,3	0,77	1,87 F
	5 kVA	8 400 F	2,5	5 000	1	0,34	1,34 F
Manufrance	2 kVA	3 200 F	1,3	2 000	1,3	0,80	2,1 F
	4 kVA	5 000 F	2,3	4 000	1,15	0,31	1,46 F

GROUPE ÉLECTROGENE A GAS OIL (Moteur diesel – Amortissement sur deux ans)

Petter	2,5 kVA	6 400 F	0,8	8 000	0,55	0,37	0,92 F
Briban	2,5 kVA	6 400 F	0,8	8 000	0,55	0,37	0,92 F
Elektro	28 kVA	28 000 F	10	15 000	0,45	0,06	0,51 F

CHAPITRE VI

CONCLUSIONS

- C O N C L U S I O N S -

Etudier la viabilité d'un aérogénérateur à partir d'une machine déjà conçue et fabriquée est chose possible, cependant dans les conditions de notre étude, cet objectif s'avère difficile à atteindre.

L'aérogénérateur DUNLITE DARVEY (2 kw) sur lequel nous avons travaillé a été conçu pour un régime de vent moyen de 14 m/sec. est inadéquat dans un site comme Thiès où pour 97 % du temps, la vitesse du vent est inférieure à 8 m/sec. avec moyenne d'environ 3 m/sec.

- L'absence de données météorologiques fiables pour la région de Thiès a constitué un véritable obstacle dans le travail et réduit par là même la portée scientifique de notre étude.

- Le caractère défectueux des appareils d'enregistrement nous a également limités dans nos analyses et interprétations.

Dans le cadre que voilà, le crédit à accorder aux conclusions de ce document doit se justifier par l'effort soutenu d'analyse critique d'observations faites durant les tests, mesures et enregistrements.

Pour le pompage de l'eau, les aérogénérateurs sont nettement moins performants que les éoliennes lentes multiples, ces dernières peuvent d'ailleurs durement concurrencer les forages équipés existants au Sénégal.

Dans les sites isolés, les éoliennes électriques constituent un moyen économiquement efficace, pour l'éclairage, si elles sont adéquatement choisies. Dans ces sites, généralement d'accès difficile, l'approvisionnement en carburant est souvent compromis par l'inexistence d'infrastructures routières appropriées et les équipements du réseau National SENELEC ne couvrent guère ces zones.

Avec le développement du salaire, on est en droit de penser que l'électrification du milieu rural est bien concevable à partir d'équipements solaires et d'aérogénérateurs.

En raison des grandes variations des conditions météorologiques d'un site à un autre, la conception et la construction des aérogénérateurs n'autorisent pas encore une production de masse de ces appareils. Cela explique en partie les coûts de fabrication des éoliennes électriques ; cependant des études technico-économiques systématiques pourraient rendre possible leur utilisation dans certaines de nos campagnes. A ce sujet la côte Nord-ouest Sénégalaise constitue un domaine de choix pour les installations.

Plusieurs utilisations sont possibles avec ces éoliennes mais il reste que l'énergie électrique fournie par les aérogénérateurs ne peut constituer qu'une source d'appoint pour un réseau National. En raison de l'irrégularité du régime des vents et surtout de la faiblesse des vitesses, il est en effet indispensable de recourir à d'autres sources comme les hydrocarbures, l'énergie solaire ou l'énergie hydraulique. Malheureusement dans ce dernier domaine, les travaux d'aménagement des sites exploitables piétinent au Sénégal.

Par ailleurs des projets d'études doivent être conduits afin d'éviter des investissements inutiles :

- Projet 1 : "Collecte de données météorologiques dans toutes les régions du Sénégal en vue de la constitution d'une banque de données informatisées".

Le but de ce projet est d'arriver à établir la carte éolienne du Sénégal sur la base d'une connaissance sûre des différents régimes de vents.

- Projet 2 : "Conception d'un aérogénérateur pour un site déterminé". Il s'agira de définir toutes les caractéristiques de la machine à partir des besoins et des spécificités météorologiques du site.

- Projet 3 : "Etude économique des différentes sources d'énergie au Sénégal. Déterminer la place de l'énergie éolienne". Cette étude technico-économique devra définir des perspectives claires pour une politique énergétique rigoureuse au Sénégal.

Cette politique énergétique dans les zones rurales, sans être une priorité absolue par rapport à l'autosuffisance alimentaire de nos populations, constitue une question importante si l'on veut éviter des déboires dans les différents plans d'investissement.

En tout état de cause, il convient de porter au crédit des aérogénérateurs les avantages suivants :

- les installations sont en général d'entretien facile et ne requièrent pas souvent une main-d'oeuvre spécialisée,
- leur fonctionnement est silencieux,
- l'énergie produite ne pose pas de problème d'approvisionnement car le vent qui en est la source

est gratuit, non polluant et constamment renouvelable.

A P P E N D I C E S

A - Mise en parallèle de deux transistors BO x 64B

B - Les batteries d'accumulateurs au plomb.

- Connaissance
- Détermination de la capacité pour une installation d'aérogénérateur.

C - Courbes d'étalonnage du système de contrôle.

D - Programmes FORTRAN

- Eole : Calcul des pales à bord d'attaque rectiligne et à bord de fuite rectiligne.
Détermination des coefficients de couple et puissance.
- Aéro : Détermination de la largeur des pales d'éoliennes à axe horizontal et des coefficients de couple et de puissance en fonction de la vitesse spécifique.

-ooOoo- B I B L I O G R A P H I E -ooOoo-

-
- Guide de l'installation électrique (Merlin Genin) Janvier 82
 - Palmer Cosslett Putnam : Power from the wind.
 - Y. MAINGUY : L'économie de l'énergie.
 - (DARVEY-DUNLITE : DIVISION) - 28 ORSMOND ST HINDMARSH SA 5007 :
Document technique Installation, Fonctionnement et Instructions.
 - MARSHAL F. MERRIAM : March 1972 (Working Paper series N° 20).
Is there a place for the windmill in the less developed countries ?
 - REFERENCES : Documents - Ministère des T.P.
Des Transports et des Mines.
Service Météorologique.
C.D.U. 551.582 2(663)
Juillet 1960
Dakar BNI OA 670.07.70.
 - BREMONT (Institut Universitaire de Technologie, I.U.T. Dakar) :
Etude et réalisation d'une éolienne pour les pays en voie
de développement (Colloque sur l'Energie
Ecole Polytechnique de Thiès).
 - DESIRE LE GOURIERES : Energie Eolienne (Faculté des Sc. Univ. Dakar)
Théorie, conception et calcul pratique des
installations.
 - A. FOUILLE : Electrotechnique à l'usage des ingénieurs.
Tome 3 : machines à collecteur,
commande électronique.
 - MILLMAN and HALKIAS : Integrated Electronics
Analog and Digital circuits and Systems.
 - RENE N'DOUR : Projet de fin d'études 1978 (E.P.T.)
"Quelques analyses des mesures de vitesses du vent
à Thiès, effectuées à l'aide d'un anémomètre à Coupelles".
 - CHEIKH TIDJANE SAKHO : Projet de fin d'études 1982 (E.P.T.)
"Etude d'une éolienne à axe horizontal".

- CODE CANADIEN DU BATIMENT : Supplément N° 4 1977.
- JEAN ROBERT MURAT : Notes de cours : Eléments de construction
(Ecole Polytechnique de Thiès).

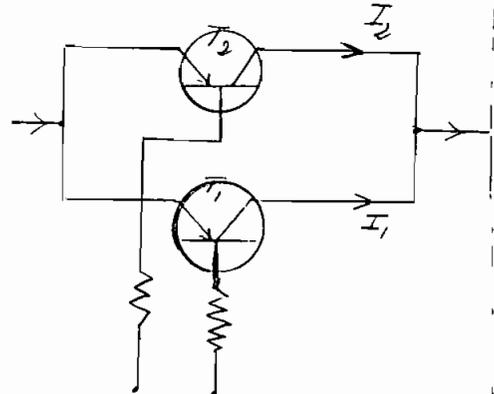
ANNEXES A-I

MISE EN PARALLELE DE DEUX (2) TRANSISTORS BO X 64B

But : Constituer un transistor de puissance permettant d'envoyer un courant $I_{\max} = 10 \text{ A}$ à l'entrée du circuit de contrôle de la charge et de la décharge des batteries d'accumulateurs.

1) Tracé des caractéristiques $V_{\text{CESat}}(I)$.

Schéma de montage

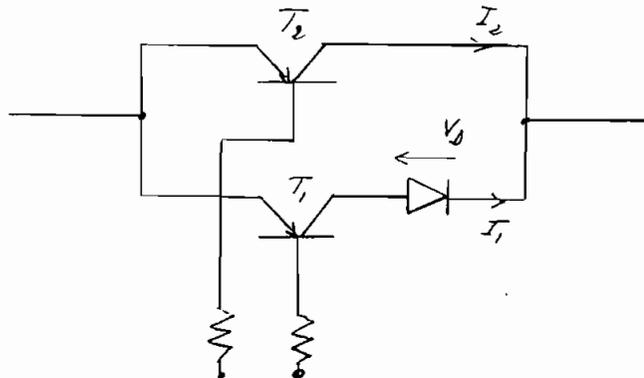


Les courbes caractéristiques montrent que T_1 conduit mieux que T_2 , et il risque d'absorber tout le courant ou presque si on fait la mise en parallèle directe.

Exemple : Quand V_{CESat} commun sera égal à 2 volts, on aura $I_{c1} = 5,2 \text{ A}$

$$I_{c2} = 2,8 \text{ A}$$

2) Idéalement il faudrait le circuit suivant :



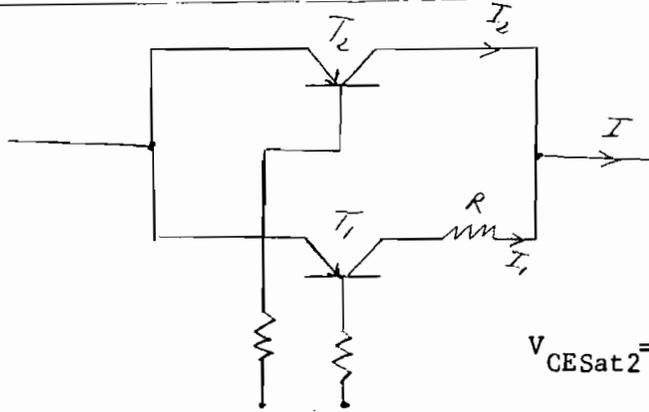
$$V_{\text{CESat}2} = V_{\text{CESat}1} + V_D$$

$$V_D = V_{\text{CESat}2} - V_{\text{CESat}1} = 0,6 \text{ à } 0,7 = \text{constante.}$$

On aurait alors toujours $I_2 = I_1$

Impossible car la tension de diode
 $V_D = 0,7 \text{ V}$ est assez importante dans l'échelle
 des V_{CESat} .

3) Solution adoptée



$$V_{CESat2} = V_{CESat1} + RI_1 \quad (E)$$

Pour $I_{max} = 10 \text{ A}$ on veut avoir $I_1 = I_2 = 5 \text{ A}$

d'après les courbes on a pour $I = 5 \text{ A}$

$$V_{CESat1} = 1,95 \text{ V}$$

$$V_{CESat2} = 2,55 \text{ V}$$

L'équation (E) $RI_1 = V$

$$R = \frac{V}{I_1} = \frac{2,55 - 1,95}{5}$$

$$R = \frac{0,6}{5} = 0,12$$

$$R = 0,12$$

$$P = RI_1^2 = 0,12 \times 5^2 = 3 \text{ W}$$

On prend : une résistance 0,12 5 W.

Pratique : bout de fil ajusté

$$R = \frac{L}{A} = 0,12$$

4) Résultats théoriques

Exemples : Si $V_{CESat2} = 1 \text{ Volt}$

on obtient $I_1 = 0,9 \text{ A}$

$$I_2 = 0,25 \text{ A}$$

Tableau des résultats théoriques :

V_{CESat2} (Volt)	I_2 (A)	I_1 (A)
1	0.25	0.9
1.4	0.7	1.9
1.6	1.26	2.5
1.8	1.9	3.05
2.0	2.8	3.6
2.2	3.7	4.15
2.55	5.0	5.0

CE_{sat}
Volts

3

2

1

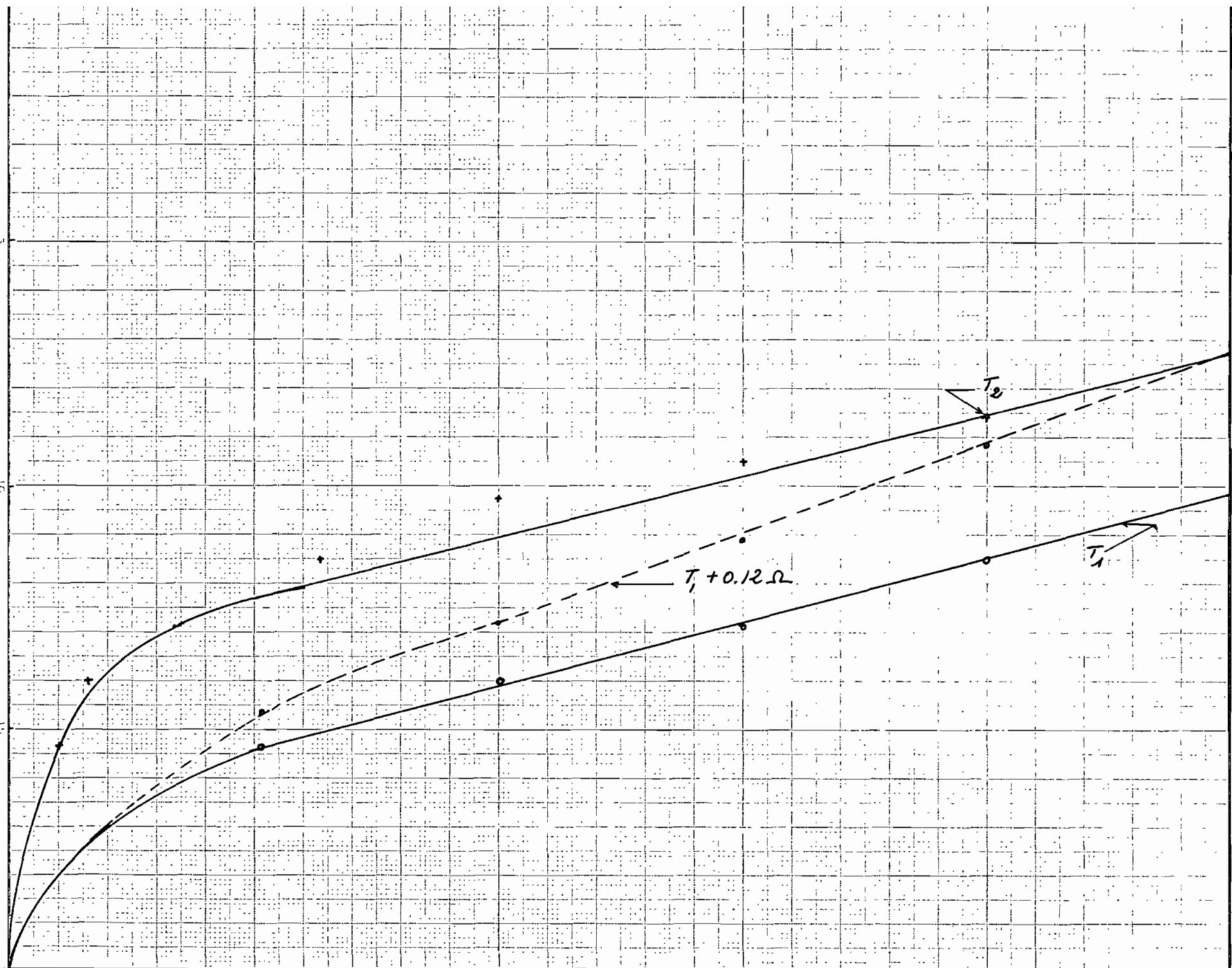
LES PAPIERS CANSON - FRANCE

2

3

4

$5I(A)$



ANNEXES B-I

LES BATTERIES D'ACCUMULATEURS AU PLOMB

Là nous n'avons pas eu le choix car les huit (8) batteries d'accumulateurs à notre disposition sont au plomb. Nous avons retenu ces batteries non parce qu'elles étaient disponibles mais surtout parce que comparées aux autres types de batteries les accumulateurs au plomb sont mieux indiquées pour les aérogénérateurs.

En effet les autres types d'accumulateurs alcalins, ou particulièrement les accumulateurs métal-air du type cadmium-oxygène, fer-air ne sont pas encore envisageables : les alcalins à cause de leur coût élevé, les métal-air parce qu'ils ne relèvent encore que du domaine des études théoriques.

L'utilisation et l'entretien des batteries d'accumulateurs au plomb posent encore de nombreux problèmes aussi avons nous cru utile d'étudier ces éléments car 90 % des ennuis rencontrés proviennent d'une mauvaise connaissance de ces batteries.

Connaissance des accumulateurs au plomb

L'accumulateur au plomb utilisé de nos jours a été mis au point par PLANTE en 1860. Depuis il a certes subi des modifications destinées à améliorer ses performances mais le principe reste le même.

• Constitution

- Le bac est en matière isolante ; dans notre cas il est en matière plastique.
- Les plaques sont faites de grilles au plomb antimorène dont les mailles sont remplies de matière active sous forme de pâte.

La plaque positive = Electrode positive = anode :

75 % de minium (Pb_3O_4) +
25 % de litharge PbO .

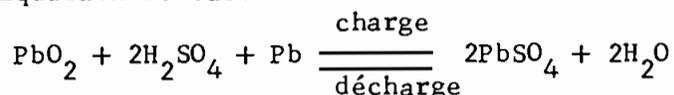
La plaque négative = Electrode négative = cathode :

25 % de minium (Pb_3O_4) +
75 % de litharge PbO .

- L'électrolyte est une solution d'acide sulfurique.

• Principe de fonctionnement

Equation de base :



A la décharge : on note la scission de l'acide

sulfurique de l'électrolyte dont la densité diminue avec :

- d'une part, formation d'eau (H_2O) et d'oxyde plombeux (PbO_2) à l'anode.
- d'autre part, formation de sulfate de plomb ($PbSO_4$) insoluble à la cathode.

Si l'on pousse trop la décharge, il y a formation de sulfate de plomb dur impossible à décomposer par réaction inverse à la charge, d'où le phénomène de "sulfatation" des plaques négatives (les plaques deviennent blanchâtres).

A la charge : le phénomène est exactement inverse et en fin de charge on arrive à une électrolyse de l'eau avec dégagement d'hydrogène à la cathode.

Une charge prolongée conduit à une évaporation de l'électrolyte dont le niveau baisse.

Les réactions secondaires :

Une particularité de l'accumulateur au plomb est sa sensibilité aux réactions secondaires :

- L'action de l'acide sulfurique sur le plomb et l'oxyde de plomb.
- Les courants locaux dus à la constitution hétérogène des plaques, formation de micropiles (phénomène de corrosion).

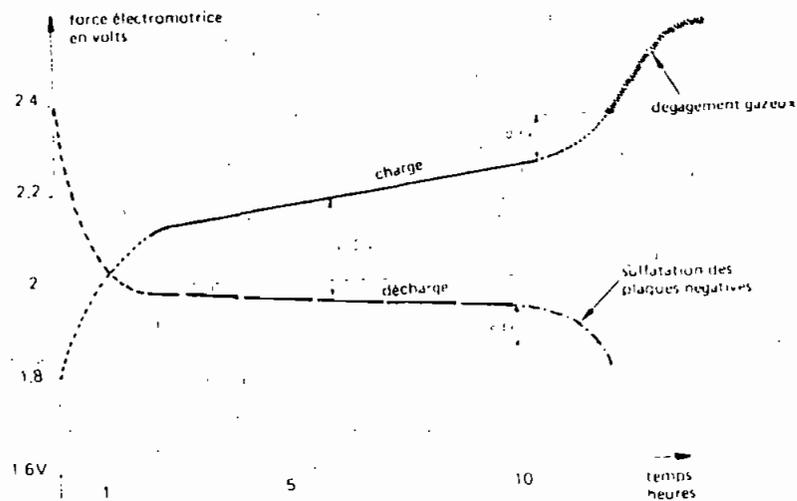
Par ailleurs il y a une autre particularité non moins importante relative à la variation des matières actives au cours des cycles charge-décharge.

L'augmentation du volume des plaques à la décharge cause des risques de déformation, fissuration, etc....

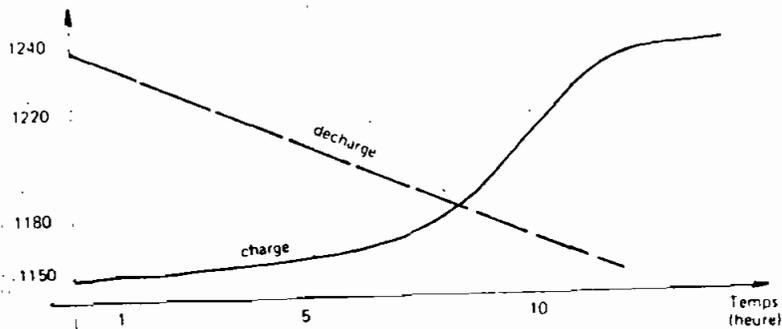
A la charge, les plaques reprennent leur volume initial mais la matière active risque de se détacher par morceaux et d'occasionner des courts-circuits dans l'élément accumulateur.

Toutes ces considérations qui précèdent montrent combien il est important de surveiller l'état de charge et de décharge d'une batterie d'accumulateur au plomb. (voir figure ci-après).

CARACTERISTIQUES DE CHARGE ET DECHARGE d'un élément de batterie d'accumulateur au plomb (plomb acide sulfurique)



variation de la tension en fonction de l'état de charge d'un élément d'accumulateur au plomb



Variation de la masse volumique de l'acide dans un élément d'accumulateur au plomb en fonction de son état de charge.

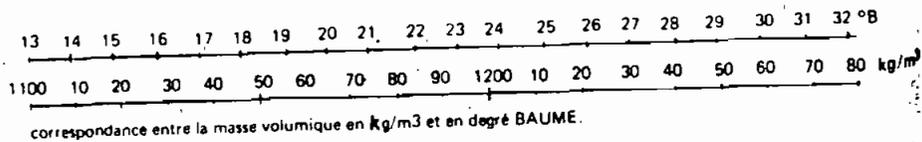


Fig. 56

Valeurs caractéristiques des batteries au plomb

- Coefficient de température : $3 \text{ à } 4 \times 10^{-4} \text{ V}/^\circ\text{C}$
- Fin de charge
 - tension : 2,35 V à 2,8 V par élément au repos.
- Densité : la stabilité en concentration est longue à s'établir au cours de la charge et aucune mesure n'est significative qu'après un repos de 24 heures environ (1 jour). $1230 \text{ à } 1240 \text{ kg/m}^3$.
- Fin de décharge :
 - tension : 1,8 V par élément. Ne jamais descendre au-dessous de cette valeur sous peine de sulfatation.
(D'une manière générale on évitera de décharger au-dessous de 20 % de la capacité de la batterie).
 - densité : elle diminue pour prendre des valeurs de $1080 \text{ à } 1100 \text{ kg/dm}^3$.
- Consommation d'eau : dépend de la nature de la batterie, sa tension et sa capacité.
- Courant de maintien : ce courant dépend essentiellement de la nature de la batterie.
Valeur moyenne : $0,3 \text{ mA/A}_h$ (il s'agit d'une estimation).

- Courant de charge et de décharge :

Sous réserve d'indication contraire du constructeur

$$I_{\text{charge}} \quad \frac{C}{10}$$

$$I_{\text{décharge}} \quad \frac{C}{10} \quad ; \quad \text{où } C = \text{Capacité nominale en 10 heures.}$$

NB : Le rendement de la batterie sera d'autant meilleur que le régime de décharge sera lent.

Il est donc conseillé lorsque les utilisations sont exclusivement alimentées par l'énergie stockée (période de vents improductifs) détaier leur fonctionnement dans le temps en utilisant un facteur de simultanéité adéquat.

Faire fonctionner les utilisations successivement et non simultanément lorsque c'est possible dans

un esprit de priorité en importance.
(voir aussi les caractéristiques des constructeurs).

- Résistance d'un élément :

$$R_i = \frac{0,08}{M} \quad (\text{approximation})$$

où M est la masse d'un élément
d'accumulateur.

DETERMINATION DE LA CAPACITE DE LA BATTERIE D'ACCUMULATEURS POUR
AEROGENERATEUR

A partir de la connaissance que nous avons à présent de la batterie d'accumulateurs au plomb, il devient évident que pour garantir la fourniture d'énergie à l'utilisation avec un minimum de discontinuité la batterie doit être correctement dimensionnée.

Pour cela il est nécessaire de connaître :

- les données météorologiques du site envisagé. Plus ces données seront précises, meilleure sera la détermination de la capacité de la batterie.
- la puissance de l'aérogénérateur associé à l'installation
- la puissance moyenne consommée par l'ensemble des utilisations alimentées. Cette puissance tiendra compte également du taux de travail de chacun des appareils alimentés par la batterie.

$$\text{Taux de travail} = \frac{t}{24 \text{ h}} \quad \text{avec } t \text{ durée en heures du temps de fonctionnement journalier.}$$

Méthodes de calcul de la capacité

Tous les paramètres qui interviennent dans les calculs sont aléatoires à l'image des phénomènes météorologiques.

Les méthodes de calcul les plus fines font appel à une simulation du fonctionnement de l'installation sur ordinateur. Les données essentielles sont les vitesses du vent fournies par la Météorologie Nationale sous forme directement exploitable par ordinateur.

Ces méthodes requièrent des moyens lourds et coûteux.

On a, en pratique, recours à des calculs simples. Dans notre étude nous procéderons d'une méthode simplifiée et retiendrons la valeur la plus sécuritaire.

Procédure

Soit : - N_1 le nombre de jours consécutifs de la période la plus longue pendant laquelle les vitesses de vent ont été inférieures à celle du vent productif : $(V < V_p)$. Eliminer les périodes exceptionnellement longues dont la fréquence ne dépasse pas 4 fois par an. En tenir compte conduirait à surdimensionner la batterie et à se pénaliser sur le coût de la station.

- N_2 le nombre de jours de la période la plus longue où le vent a été compris entre le vent productif (V_p) et le vent nominal (V_n). Lorsque le vent atteint la vitesse nominale, l'aérogénérateur

fournit sa puissance nominale. (Dans notre cas 2 kw). $V_p = 4.47 \text{ m/s}$; $V_n = 11.2 \text{ m/s}$

- N l'autonomie de la batterie d'accumulateurs : c'est le nombre de jours de vents improductifs que la batterie pourrait couvrir.

On a la relation : $N \leq 1,25 N_1$

Le coefficient de N_1 dépend de l'importance de N_2 par rapport à N_1 .

- Si $N_1 \cong N_2$: ce qui signifie que le site voit des vents soit nuls, soit supérieurs à la vitesse nominale

dans ce cas : $N = N_1$

- Si $N_1 \ll N_2$: cela signifie que les vents sur le site sont souvent faibles, auquel cas

$N = 1,25 N_1$

C'est cette valeur de N selon le cas qui permet de calculer la capacité de la batterie en watt-heure.

Capacité de la batterie :

$$C_{wh} = N \times 24 \times \bar{P} \quad (\bar{P} = \text{puissance moyenne totale}).$$

• La capacité en Ampère-heure est donnée par l'équation :

$$C_{Ah} = \frac{C_{wh}}{U_b} \quad U_b : \text{tension de la batterie d'accumulateurs (en volts).}$$

Cette capacité devra être compatible :

- avec l'intensité maximale du courant que peut fournir l'aérogénérateur :

$$I_{max} = \frac{P_{max}}{U_b} \quad \text{qui doit être tel que } I_{max} \leq \frac{C_{Ah}}{10}$$

- avec un coût acceptable. En effet les dispositifs de stockage, en régime de vents irréguliers, constituent souvent une part importante (20 %) de l'investissement d'une installation d'éolienne électrique.

Application

Dans notre étude les courbes des vitesses classées et de fréquence annuelle des vents. (figures page) donnent

$$N_1 = 15$$

$$N_2 = 9$$

Les vents étant souvent faibles à Thiès, nous prenons :

$$N = 1,25 N_1 = 1,25 \times 15 = 18,75$$

Evaluation de la puissance moyenne totale, \bar{P} :

Elle dépend essentiellement de la nature des utilisations c'est-à-dire les charges électriques installées.

Nous envisagerons le cas d'un petit village concessions (communauté de 20 personnes).

Appareillages alimentés	Puissance	Taux de Travail	Puissance moyenne
Eclairage	4500 W	0.2	900
Conservation (denrées)	700 W	0.3	210
Radio	40 W	0.3	12
Télévision éducative	100 W	0.08	8
Autres usages	0 W	0	0

$$\bar{P} = 1130 \text{ W}$$

d'où la capacité de la batterie :

$$C_{\text{wh}} = N \times 24 \times \bar{P}$$

$$= 18.75 \times 24 \times 1130$$

$$C_{\text{wh}} = 508.5 \text{ kWh}$$

avec nos batteries de $U_b = 48$ Volts.

$$C_{\text{Ah}} = \frac{C_{\text{wh}}}{U_b}$$

$$C_{\text{Ah}} \approx \frac{10600 \text{ Wh}}{\text{Volt}}$$

$$C_{\text{Ah}} = 10600 \text{ Ah}$$

Nos batteries ayant été dimensionnées pour 2000 Ah

nous sommes limités à une consommation de $\bar{P} = \frac{2000 \times 48}{18.75 \times 24}$

soit $\bar{P} \approx 213 \text{ W}$ (pour éclairage uniquement)

PROGRAMME AERO

C CALCUL EOLIENNE PROFIL NACA 23015
 DIMENSION CZ(40), CX(40), PR(10), RR(10), EL(10), T(10),
 IPI(10), GI(40), ALFA(10), PIP(40), C(20), AL(10,40),
 IAF(10,40), AF1(10,40), AM(10,40), AM1(10,40)
 PPI = 3.141593
 CO = 180. / PPI
 GR = 5.
 PAL = 3.
 ALO = 7.
 CTE = 8. * PPI / PAL
 DO 2 I = 1, 10
 AI = I
 RR(I) = 0.1 * AI
 PR(I) = RR(I) * GR
 ALS = 1. / SQRT(1. + (ALO * RR(I)) ** 2)
 TETA = PPI / 3. + (ATAN(((1. - ALS * ALS) ** 0.5) / ALS)) / 3.
 AK = (COS(TETA)) / ALS
 AH = SQRT(1. + (1. - AK ** 2) / ((ALO * RR(I)) ** 2))
 ALER = ALO * RR(I) * (1. + AH) / (1. + AK)
 T(I) = 1. / ALER
 GIR = ATAN(T(I))
 GI(I) = GIR * CO
 PI(I) = -0.75 * AI + 12.75
 ALFA(I) = GI(I) - PI(I)
 CZ(I) = 0.1 + 0.11 * PI(I)
 IF (PI(I) - 10.) 16, 16, 17
 17 CZ(I) = 1.5 - 0.0188 * (PI(I) - 14.) ** 2
 16 EL(I) = CTE * PR(I) * (1. - AK) / ((1. + AK) * ALER * SQRT(ALER ** 2 + 1.)) * CZ(I)
 2 WRITE(3,3) I, ALFA(I), PR(I), RR(I), GI(I), PI(I), CZ(I), EL(I)
 3 FORMAT(2X, 12, 10F7.3)
 C DETERMINATION DES CARACTERISTIQUES
 DO 6 I = 1, 10
 DO 6 J = 1, 40
 L = 40 - J + 1
 BL = L
 CT = BL * RR(I)
 GIR = ATAN(1. / CT)
 GI(J) = GIR * CO
 PIP(J) = GI(J) - ALFA(I)
 IF (PIP(J) - 10.) 4, 4, 2
 4 CZ(J) = 0.1 + 0.11 * PIP(J)
 CX(J) = 0.007 + 0.0055 * (CZ(J) - 0.2) ** 2
 GO TO 9
 5 IF (PIP(J) - 19.) 20, 20, 21
 20 CZ(J) = 1.5 - 0.0188 * (PIP(J) - 14.) ** 2
 CX(J) = 0.0125 + 0.16 * (CZ(J) - 1.2) ** 2
 GO TO 9
 21 CZ(J) = 1.
 CX(J) = 0.0125 + 0.16 * (CZ(J) - 1.2) ** 2
 9 TGEPS = CX(J) / CZ(J)
 G = CZ(J) * PAL * EL(I) * (CT + TGEPS) * SQRT(1 + CT ** 2) / (8. * PPI * PR(I))
 AK = (L - G) / (L + G)
 E = CZ(J) * PAL * EL(I) * (L / CT - TGEPS) * SQRT(1 + CT ** 2) / (8. * PPI * PR(I))
 AH = (1. + E) / (1. - E)
 AL(I, J) = (1. + AK) * CT / (RR(I) * (1. + AH))
 AF(I, J) = (1. - AK ** 2) * RR(I)
 AM(I, J) = RR(I) * RR(I) * ((1. + AK) ** 2) * E * CT

Suite AERO

IF((AL(I, J)) * (AL(I, J) - 30.)) 19, 6, 6
 19 WRITE(3, 7) I, J, PIP(J), GI(J), AK, AL(I, J), AM(I, J), G, E, AH, AF(I, J),
 1 CZ(J), TGEPS, CT, PR(I), EL(I)
 6 CONTINUE
 7 FORMAT(2X, 12, 2X, 12, 2X, 8F10.5, /, 2X, 8F9.4)
 DO 15 I = 1, 10
 DO 15 N = 1, 20
 AF1(I, N) = 0.
 15 AM1(I, N) = 0.
 DO 8 I = 1, 10
 DO 8 J = 1, 39
 IF((AL(I, J)) * (AL(I, J) - 21.)) 18, 8, 8
 18 N = AL(I, J)
 N1 = AL(I, J + 1)
 IF (N - N1) 8, 8, 10
 10 AM1(I, N) = AM(I, J) + (AM(I, J + 1) - AM(I, J)) *
 1 (N - AL(I, J)) / (AL(I, J + 1) - AL(I, J))
 AF1(I, N) = AF(I, J) + (AF(I, J + 1) - AF(I, J)) *
 1 (N - AL(I, J)) / (AL(I, J + 1) - AL(I, J))
 WRITE(3, 14) I, N, AM1(I, N), AF1(I, N)
 14 FORMAT(2I4, 2F10.5)
 N = N - 1
 IF (N - N1) 8, 8, 10
 8 CONTINUE
 DO 12 N = 1, 20
 CF = AF1(1, N) * (RR(2) - RR(1)) + AF1(10, N) * (1. - RR(9))
 C(N) = AM1(1, N) * (RR(2) - RR(1)) + AM1(10, N) * (1. - RR(9))
 DO 13 I = 2, 9
 CF = CF + AF1(I, N) * (RR(I + 1) - RR(I - 1))
 C(N) = C(N) + AM1(I, N) * (RR(I + 1) - RR(I - 1))
 13 CONTINUE
 ALO = N
 ETAP = (1. - 0.93 / (PAL * SQRT(ALO ** 2 + 0.445))) ** 2
 CM = C(N) * ETAP
 CP = ALO * CM
 12 WRITE(3, 11) ALO, CF, CM, CP
 11 FORMAT(2X, 4F10.5)
 STOP
 END

DI

ANNEXE D

PROGRAMME EOLE

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

Suite EOLE

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

PROJET :

CONSTRUCTION ET ETUDE DE VIABILITE D'UNE EOLIENNE ELECTRIQUE

PLANNING DE CONDUITE DES TRAVAUX

temps éch.  = 5 jours

PERIODE TRAVAUX		Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai
PI	①	—						
	②	—	—					
	③	—	—	—				
	④	—						
	⑤			—				
PII	⑥		—	—				
	⑦		—	—	—			
	⑧			.				
	⑨			.				
	⑩			—	—			
	⑪			.				
	⑫				—	—	—	—
	⑬					—	—	—

IDENTIFICATION	TRAVAUX
①	- Etude et choix du Site
②	- Calculs et vérification des structures de la tour.
③	- Rassembler les organes de l'Eolienne
④	- Essai de l'Alternateur
⑤	- Construction de la tour de l'Eolienne (16)
⑥	- Traitements de remise en état des éléments.
⑦	- Système de contrôle électronique du circuit électrique.
⑧	- Protection des batteries d'accumulateurs contre les intempéries atmosphériques. (Armoire).
⑨	- Protection de l'aérogénérateur contre la foudre.
⑩	- Installation de l'Eolienne sur la tour.
⑪	- Installation d'un feu de signalisation nocturne ("balise").
⑫	- Evaluation de la performance de l'éolienne • mesures - tests - enregistrements
⑬	- Etudier les utilisations d'une telle Eolienne. • Pompage de l'eau (comparaison avec une éolienne mécanique). • Autres utilisations.