

11/77

UNIVERSITE D'ALGER

2056



ECOLE NATIONALE
POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT DE
MECANIQUE

المدرسة الوطنية للعلوم الهندسية
المكنة

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
BIBLIOTHEQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES

ETUDE

المدرسة الوطنية للعلوم الهندسية
المكنة

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
BIBLIOTHEQUE

REALISATION

D'UN

A PRO GENERATEUR

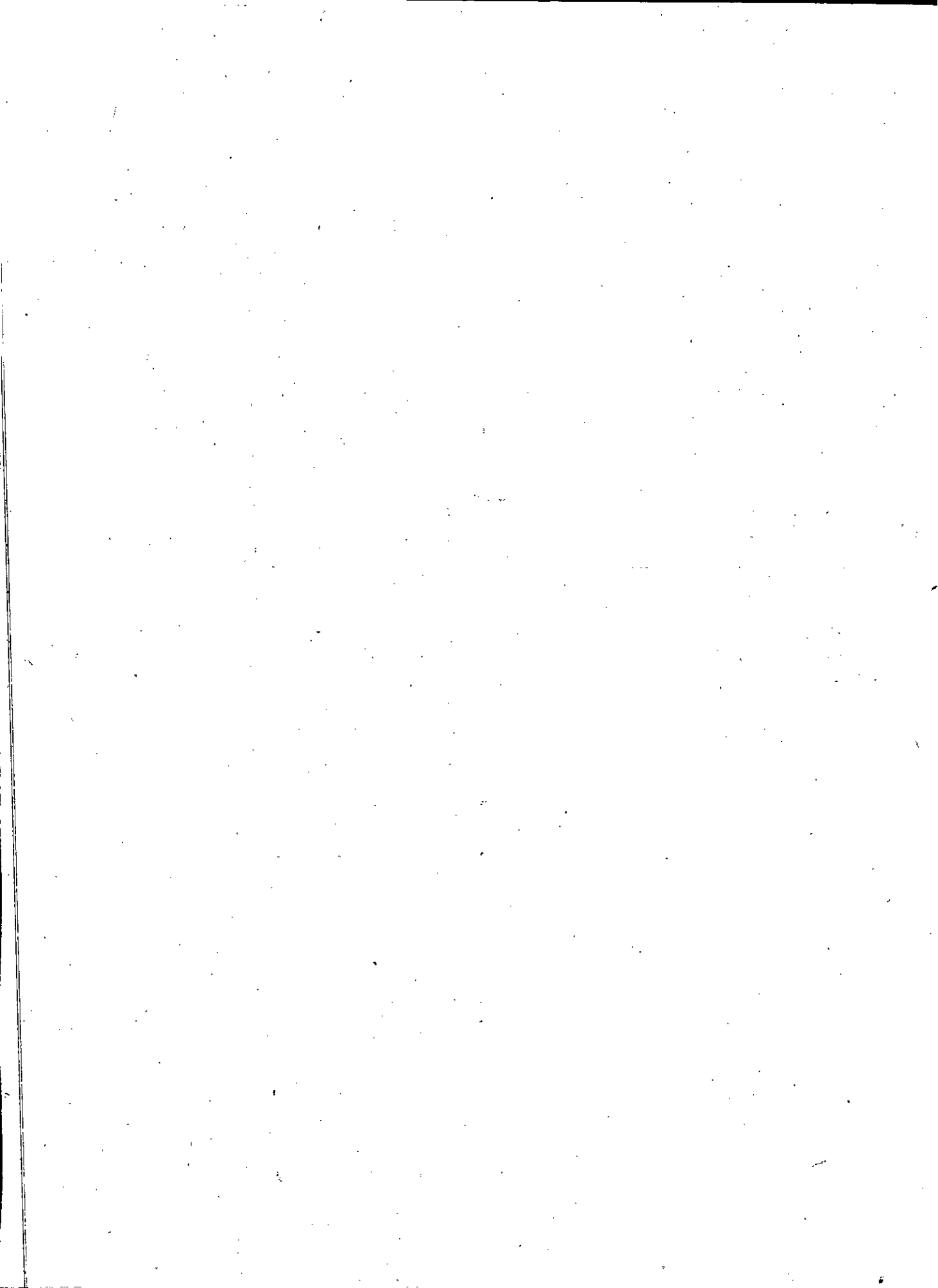
Proposé par :

Yves BOUSSARD
Ingénieur - Assistant
à l'E.N.P.

Etudié par :

A. GHALAMOUN
A. REZAK
M. BOUKOULLA

PROMOTION 1977



UNIVERSITE D'ALGER

•O•

ECOLE NATIONALE
POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT DE
MECANIQUE

•O•

PROJET DE FIN D'ETUDES

**ETUDE
ET
REALISATION
D'UN
AEROGENERATEUR**

Proposé par :

Yves BOUSSAÏD

Ingénieur - Assistant

à l'E.N.P.

Etudié par :

A. CHALAMOUN

A. REZAK

M. BOURKOULLA

PROMOTION 1977

A MES PARENTS
A MES AMIS
A MES COPAINS
A. GHALAMOUN
#####

A TOUS CEUX QUI ME SONT CHERS
A TOUS LES "CANARDS".
A. REZAK
#####

A MES PARENTS
A MA FAMILLE
A MES AMIS
M. BOUKOULLA
#####

INTRODUCTION

HISTORIQUE:

L'utilisation de l'énergie éolienne date de
plusieurs millénaires. En effet les Egyptiens fabriquè-
rent les premiers moulins à axes horizontaux quatre siècles
avant Jésus Christ. Ensuite l'amélioration des pâles parvient
à perfectionner les moulins hollandais à hélices vrillées et
à mécanique complexe.

Notons que ces machines rendirent de nombreux services à
l'homme. - Moudre le grain

- Pomper l'eau

- Scier le bois

Avec le XX^e siècle, certains moulins délaissés furent uti-
lisés pour fabriquer de l'électricité. Et ce n'est qu'à par-
tir des années 20 qu'on s'est intéressé à la construction d'a-
érogénérateur.

BUT:

L'objet de notre étude consiste à construire à par-
tir de matériaux de récupération un aérogénérateur et de mesu-
rer ses performances. On dispose d'une énergie gratuite mais
aléatoire qui ^{est} non seulement fonction de la vitesse du vent,
mais aussi du site sur lequel sera placé l'aérogénérateur. Et
de plus la puissance récupérable est de $16/27$ de la puissance
disponible du vent, ceci en négligeant les frottements et l'i-
nertie à vaincre pour le démarrage. Ceci montre que des essais
en soufflerie n'ont pas grand intérêt, et on est amené à placer
notre aérogénérateur dans les conditions réelles de fonction-
nement et de mesurer soigneusement la puissance disponible et
la puissance récupérée pendant une période bien déterminée.

On extrapolera par la suite la puissance récupérée pendant une année. Et enfin conclure si cette puissance peut satisfaire les besoins électriques d'une habitation isolée.

PRINCIPE:

L'aérogénérateur est une machine destinée à transformer l'énergie cinétique du vent en énergie électrique stockée dans des accumulateurs. La puissance obtenue est faible par rapport aux sources conventionnelles, compte tenu des besoins énergétiques. Il est donc nécessaire, pour obtenir une puissance intéressante, de construire minutieusement l'aérogénérateur pour s'approcher au maximum de la valeur maximale théorique de la puissance fournie par le vent.

La technique de construction doit faire appel à des études météorologiques, aérodynamiques, mécaniques, électrique pour résoudre les problèmes de production, régulation, équilibrage et stockage.

L'aérogénérateur n'est pas un gadget, mais un mécanisme qui fait appel à des phénomènes complexes et qui sont potentiellement dangereux pour un vent fort. L'utilisation d'un aérogénérateur de construction peu soignée peut donc présenter certains risques.

CHAPITRE PREMIER

LIMITE DE BETZ

I.1. PRINCIPE DE L'EOLIENNE:

Tout fluide en mouvement possède une énergie cinétique proportionnelle à sa masse et au carré de sa vitesse:

$$E_c = \frac{Mv^2}{2}$$

E_c = énergie cinétique.

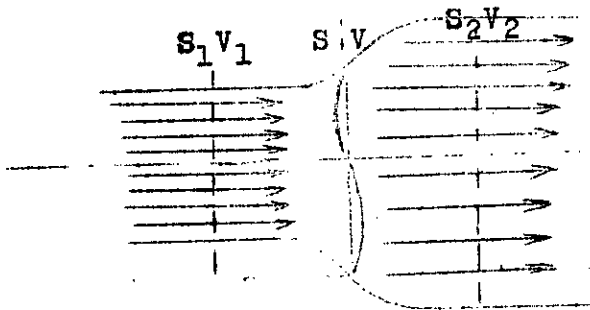
M = masse du fluide.

v = vitesse du fluide.

Cette énergie cinétique peut être récupérée par une hélice placée judicieusement dans le courant de ce fluide. On pourrait croire que nous pouvons transformer entièrement cette énergie, mais nous sommes limités par le théorème de Betz.

I.2. THEOREME DE BETZ:

Considérons un écoulement d'air dans lequel on aura placé une hélice comme le montre la figure ci-dessous.



S_1, v_1 : la section et la vitesse à l'amont;

S_2, v_2 : la section et la vitesse à l'aval

S, v : la section et la vitesse au niveau de l'hélice.

On suppose que l'air est un fluide incompressible, donc sa masse volumique ρ est constante:

L'équation de continuité nous permet d'écrire:

$$\rho S_1 v_1 = \rho S_2 v_2 = \rho S v = \dot{m}$$

où \dot{m} est le débit massique

à l'amont on a:

$$P_{ol} = \frac{\dot{m} \cdot v_1^2}{2} = \text{puissance à l'entrée.}$$

à l'aval :

$$P = \frac{\dot{m} \cdot V_2^2}{2} = \text{Puissance à la sortie:}$$

La puissance perdue par le fluide est:

$$P_c = P_{c1} - P_{c2} = \frac{\dot{m} \cdot V_1^2}{2} - \frac{\dot{m} \cdot V_2^2}{2} = \frac{\dot{m}}{2} (V_1^2 - V_2^2)$$

or : $\dot{m} = \rho \cdot S \cdot V$

donc : $P = \rho \frac{S \cdot V}{2} (V_1^2 - V_2^2)$

Par ailleurs nous savons que la force exercée sur une section S est égale à la variation de quantité de mouvement:

$$F = \dot{m} (V_1 - V_2)$$

F = force appliquée

La puissance fournie par cette force est:

$$P_m = F \cdot V = \dot{m} (V_1 - V_2) V$$

connaissant $\dot{m} = \rho \cdot S \cdot V$ on peut écrire:

$$P_m = \rho \cdot S \cdot V^2 (V_1 - V_2)$$

L'équation de conservation d'énergie nous donne:

$$P_m = P_c$$

d'où:

$$\rho \cdot S \cdot V^2 (V_1 - V_2) = \rho \frac{S \cdot V}{2} (V_1^2 - V_2^2)$$

En simplifiant l'équation nous obtenons:

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

On pose: $V_2 = aV_1$ avec a compris entre 0 et 1 car V_1 est toujours supérieur à V_2 .

Nous avons l'équation:

$$P = P_m = P_c = \rho \frac{S \cdot V}{2} (V_1^2 - V_2^2)$$

$$P = \frac{\rho S}{2} \left(\frac{V_1 + V_2}{2} \right) (V_1^2 - V_2^2) = \rho (S/2) \left(\frac{V_1 + aV_2}{2} \right) (V_1^2 - V_2^2)$$

d'où $P = \rho (S/4) V^3 (1+a)(1-a^2)$

La vitesse, la section et la masse volumique étant imposées la puissance est fonction du paramètre a . Notre but est de récupérer le maximum de puissance. Cette fonction admet un maximum pour $a = 1/3$.

Donc la puissance maximale récupérable est:

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

La masse volumique de l'air est en moyenne:

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

d'où :

$$P_{\max} = 0,578 \cdot V^3$$

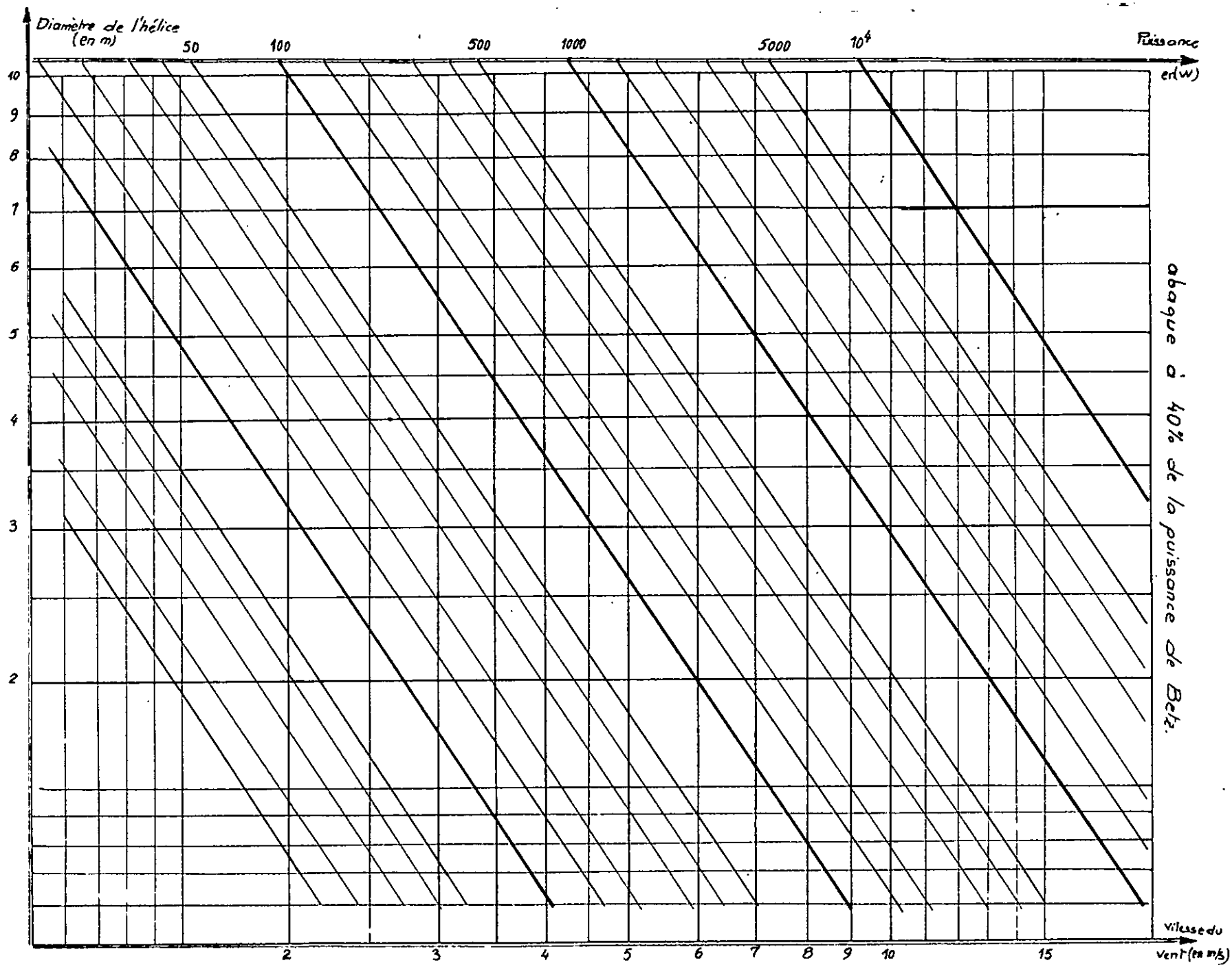
Soit D le diamètre de l'hélice:

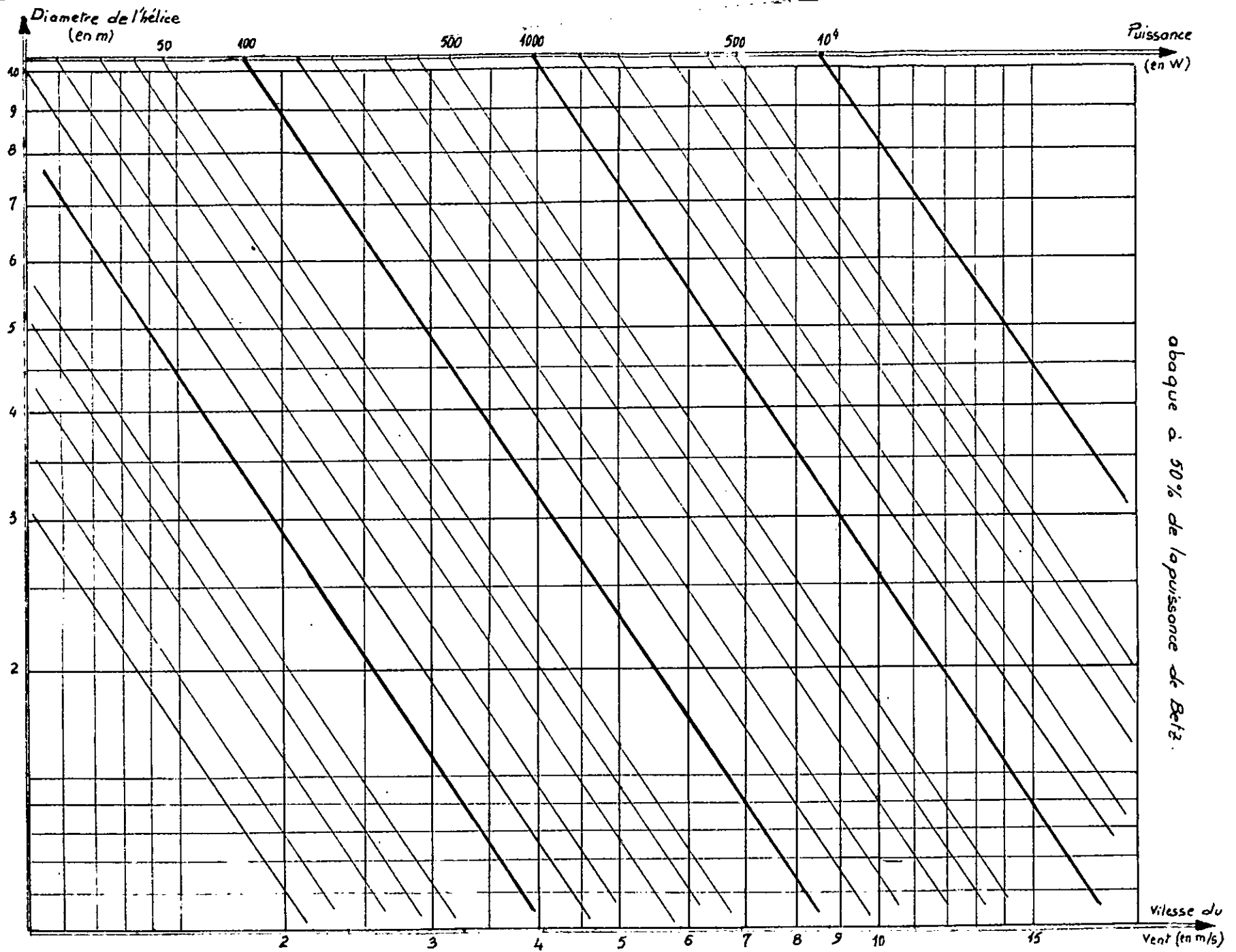
$$\text{On: } S = (\pi \cdot D^2 / 4)$$

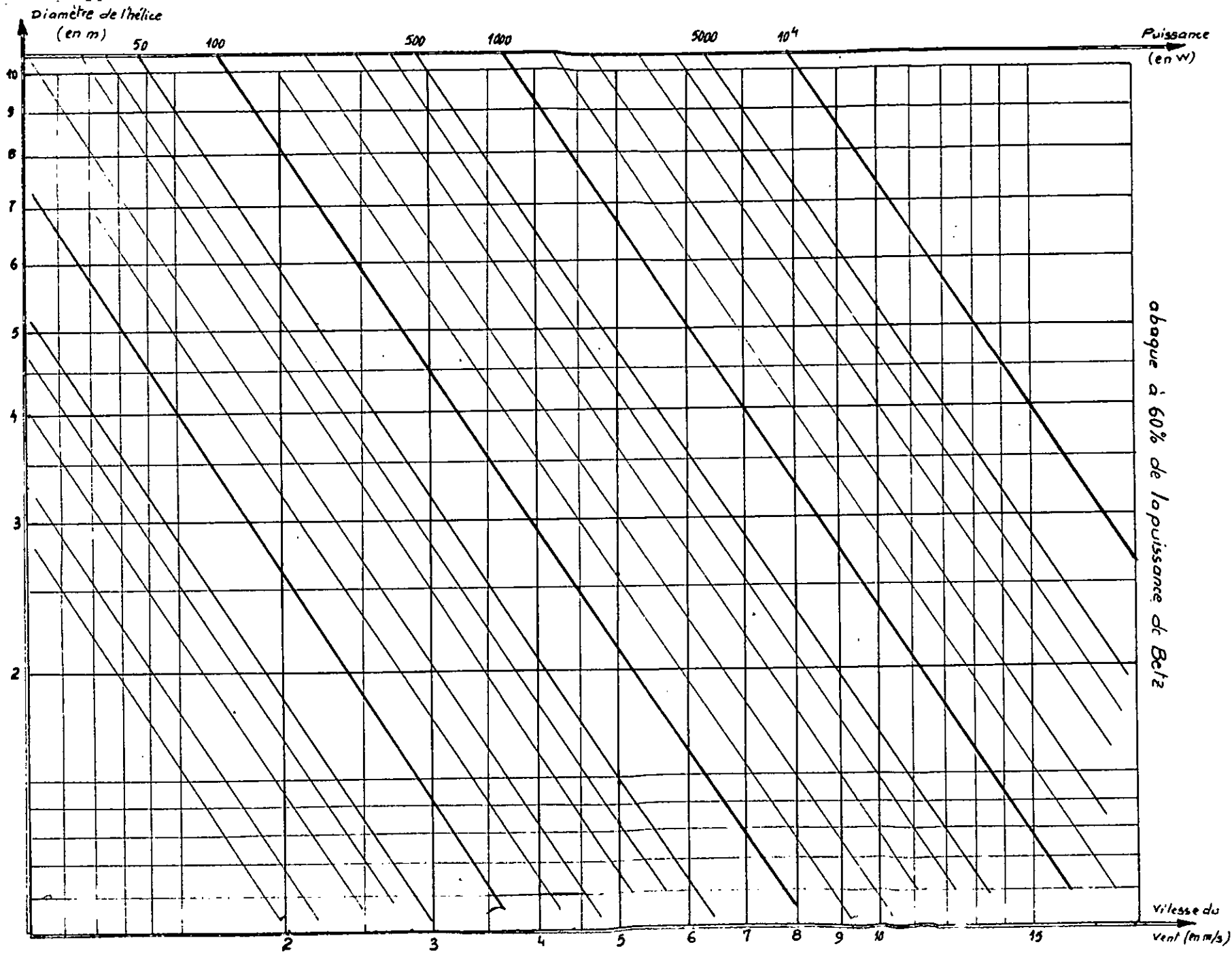
La puissance maximum devient:

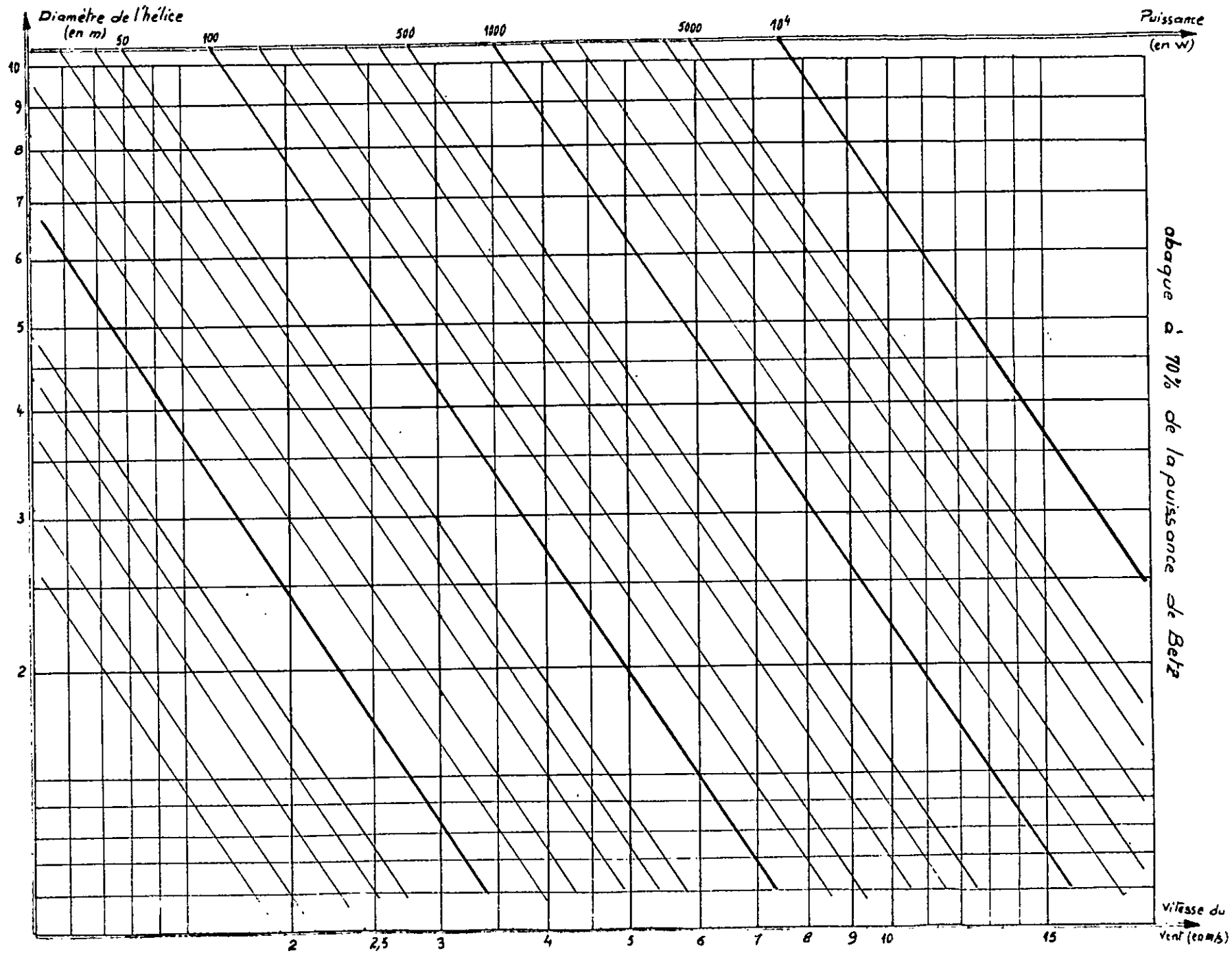
$$P_{\max} = 0,29 D^2 V^3$$

Nous remarquons que la puissance récupérable est proportionnelle au carré du diamètre de l'hélice et au cube de la vitesse du vent.









CHAPITRE II

ETUDE AERODYNAMIQUE DES PALES

II-1-GENERALITES

Un corps placé dans un écoulement fluide, est soumis à une résultante de deux forces:

- ... force de traînée de pression
- ... force de traînée de frottement.

II-1-1. Force de pression:

Considérons un élément de surface dS d'un corps baignant dans un écoulement fluide (fig. 2.1).

Si nous supposons que $gdz = 0$ et si l'on appelle V_M et p_M la vitesse et la pression du fluide au voisinage d'un point de dS , l'équation de Bernoulli s'écrira:

$$p_M + \rho_0 (V_M^2/2) = p_\infty + \rho_0 (V_\infty^2/2)$$

où p_∞ et V_∞ sont la pression et la vitesse du fluide au loir du point M et ρ_0 est la masse volumique du fluide considéré comme incompressible.

En posant $K_p = 1 - (V_M/V_\infty)^2$

Nous avons:

$$p_M = p_\infty - \rho_0 V_\infty^2 K_p / 2$$

Donc au voisinage de chaque point du corps, il existe une surpression ou une dépression qui provoque une force normale à dS .

$$\vec{dR}_p = - \frac{K_p}{2} \rho_0 V_\infty^2 dS \vec{dn}$$

Remarquons que K_p peut être positif ou négatif suivant que V_M est inférieure ou supérieure à V_∞ .

II.1.2. Force de frottement:

Soient u et v respectivement les projections des vitesses sur \vec{dn} et \vec{ds} (fig. 2-2).

Si l'écoulement suit le contour (pas de décollement), la composante v varie très peu et la composante u offre le profil parabolique donné par la fig.2-2.

Donc le solide ralentit les particules qui sont en contact avec la paroi, à cause de la viscosité du fluide. Ce qui se traduit par une force tangentielle exercée par le fluide sur l'élément de surface dS .

Cette force s'écrit:

$$\vec{dR}_f = \mu \left(\frac{du}{dz} \right)_{z=0} dS \cdot \vec{ds} = \rho_0 \nu \left(\frac{du}{dz} \right)_{z=0} dS \cdot \vec{ds}$$

A l'infini nous avons:

$$R_m = V_0 D / \nu$$

où: R_m est le nombre de Reynolds

D est le diamètre hydraulique

ν est la viscosité cinématique du fluide

D'où on tire:

$$\nu = V_0 D / R_m$$

En posant $\left(\frac{du}{dz} \right)_{z=0} = K V_{cr}$

et $K_f = 2KB / R_m$

nous obtenons:

$$\vec{dR}_f = K_f (\rho_0 / 2) V_0^2 dS \vec{ds}$$

L'intégrale de cette expression nous donne:

$$\vec{R}_f = (\rho_0 / 2) V_0^2 \int_S K_f dS \vec{ds}$$

ou encore: $\vec{R}_f = (\rho_0 / 2) V_0^2 C_f \vec{ds}$ avec $C_f = (1/S) \int_S K_f dS$

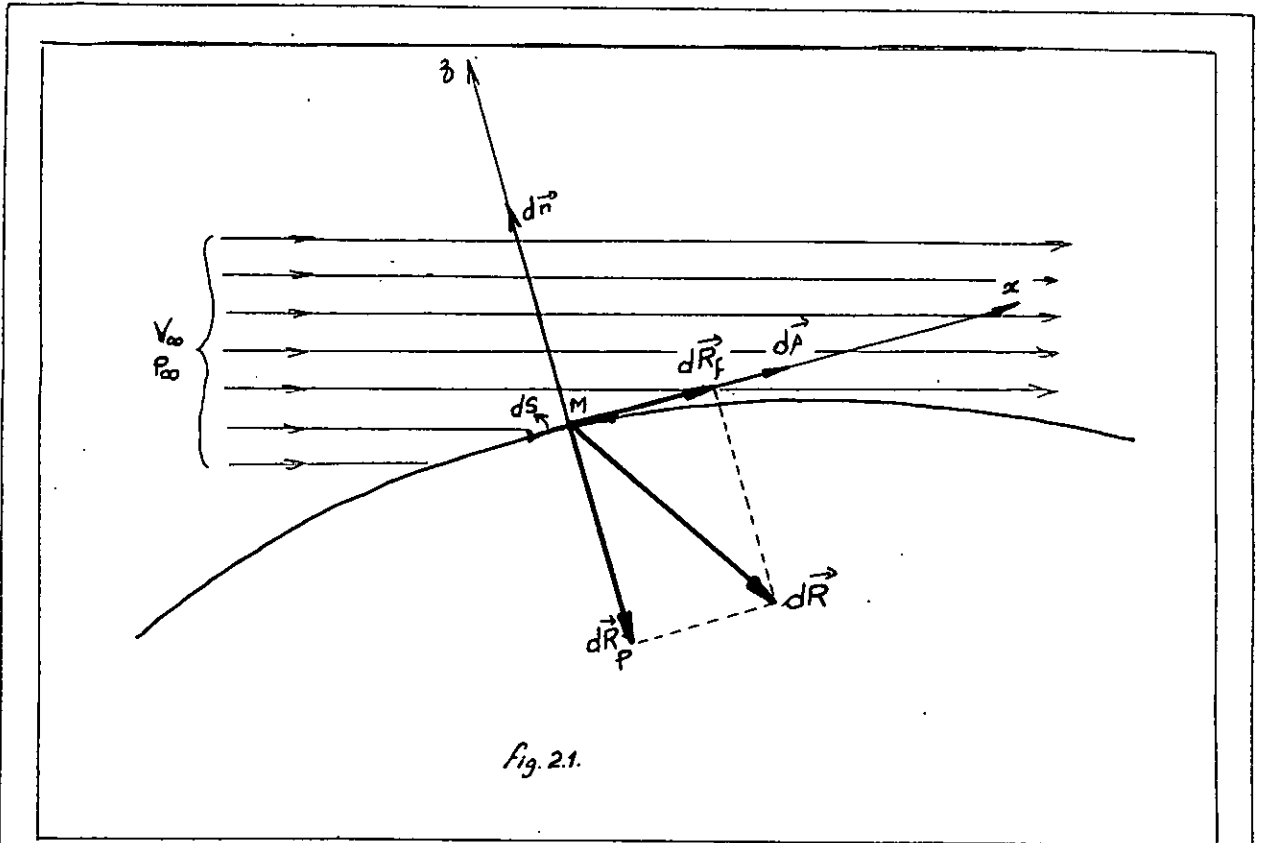


Fig. 2.1.

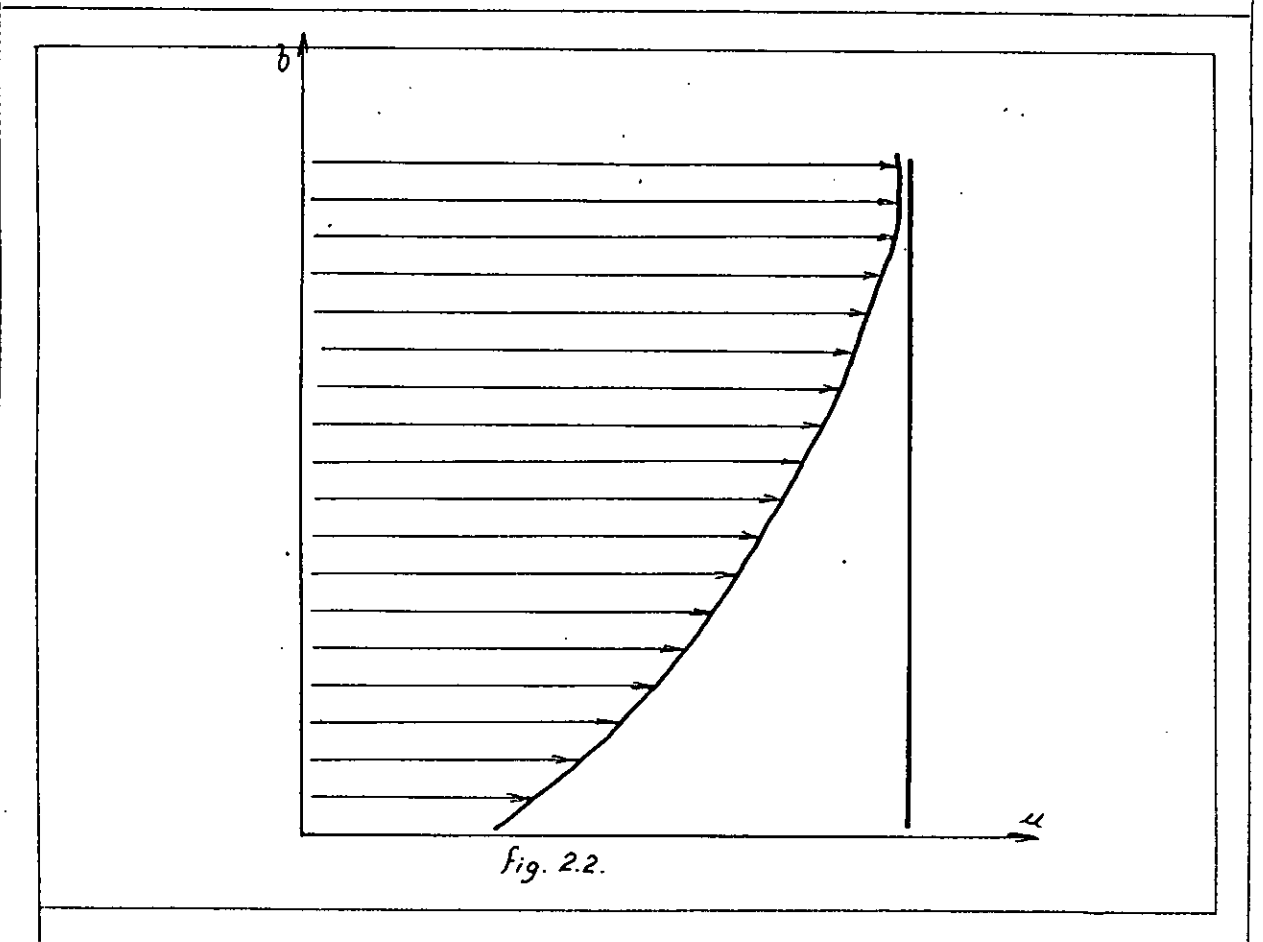


Fig. 2.2.

L'intégrale de \vec{dR}_p nous donne:

$$\vec{R}_p = (\rho_0 / 2) v_\infty^2 \int_S K_p ds \vec{n}$$

ou encore: $\vec{R}_p = (\rho_0 / 2) v_\infty^2 C_p \vec{s} \vec{n}$ avec: $C_p = (1/S) \int_S K_p ds$

Les deux forces \vec{R}_f et \vec{R}_p donnent naissance à une résultante \vec{R} telle que:

$$\vec{R} = \vec{R}_f + \vec{R}_p = (\rho_0 / 2) v_\infty^2 C (\vec{dn} + \vec{ds})$$

où: $C = C_f + C_p$

Si l'on prend un repère orthonormé (Ox, Oz) la résultante \vec{R} se décomposera en deux forces \vec{R}_x et \vec{R}_z telles que:

$$\vec{R}_x = \vec{R}_{fx} + \vec{R}_{px} \quad \text{ou} \quad \vec{R}_x = (\rho_0 / 2) C_x v_\infty^2 \vec{dx}$$

où $C_x = C_{fx} + C_{px}$ est appelé coefficient de traînée

$$\text{et } \vec{R}_z = \vec{R}_{fz} + \vec{R}_{pz} \quad \text{ou} \quad \vec{R}_z = (\rho_0 / 2) C_z v_\infty^2 \vec{dz}$$

où $C_z = C_{fz} + C_{pz}$ est appelé coefficient de poussée.

II.2. ACTION DU VENT SUR UNE PLAQUE:

Soit une plaque fixée sur un bras pivotant (comme l'indique la figure 2.3) et exposée au vent de vitesse v_∞ , sous un certain angle d'incidence:

Le vent crée sur la plaque une force \vec{R} qui peut être décomposée en deux forces:

- Une force \vec{F}_1 qui sera compensée par le bras pivotant et qu'on appelle traînée;

- Une force \vec{F}_2 , normale au bras, appelée poussée, qui donnera à la plaque un mouvement de rotation autour de l'axe.

Si nous voulons obtenir un mouvement de rotation, il nous est nécessaire d'avoir une poussée importante et une traînée très faible.

Comme l'indique la figure 2-5-a, l'écoulement devient rapidement turbulent derrière la plaque, ce qui a pour effet de diminuer la résultante \vec{R} et par suite la poussée. De plus la plaque doit vaincre la résistance du vent créé par sa rotation.

Tout ceci nous amène à avoir recours à des profils ayant une poussée importante, une trainée faible, ne créant pas de turbulence et pouvant facilement vaincre le vent créé par la pale. Ce type de profil est appelé profil aérodynamique (fig. 2-4-a)

II.3. PROFIL AERODYNAMIQUE:

Définition géométrique:

Le contour du profil aérodynamique est défini par un pourcentage par rapport à la corde AB (voir fig. 2-5), par les ordonnées $y_1=JM$, $y_2=JN$ pour chaque abscisse $x=AJ$.

Il est obtenu par la transformation conforme d'un cercle en un contour fermé avec un arrondi à l'avant et une pointe à l'arrière.

Les écoulements irrotationnels en fluide parfait incompressible sont régis par l'équation de Laplace.

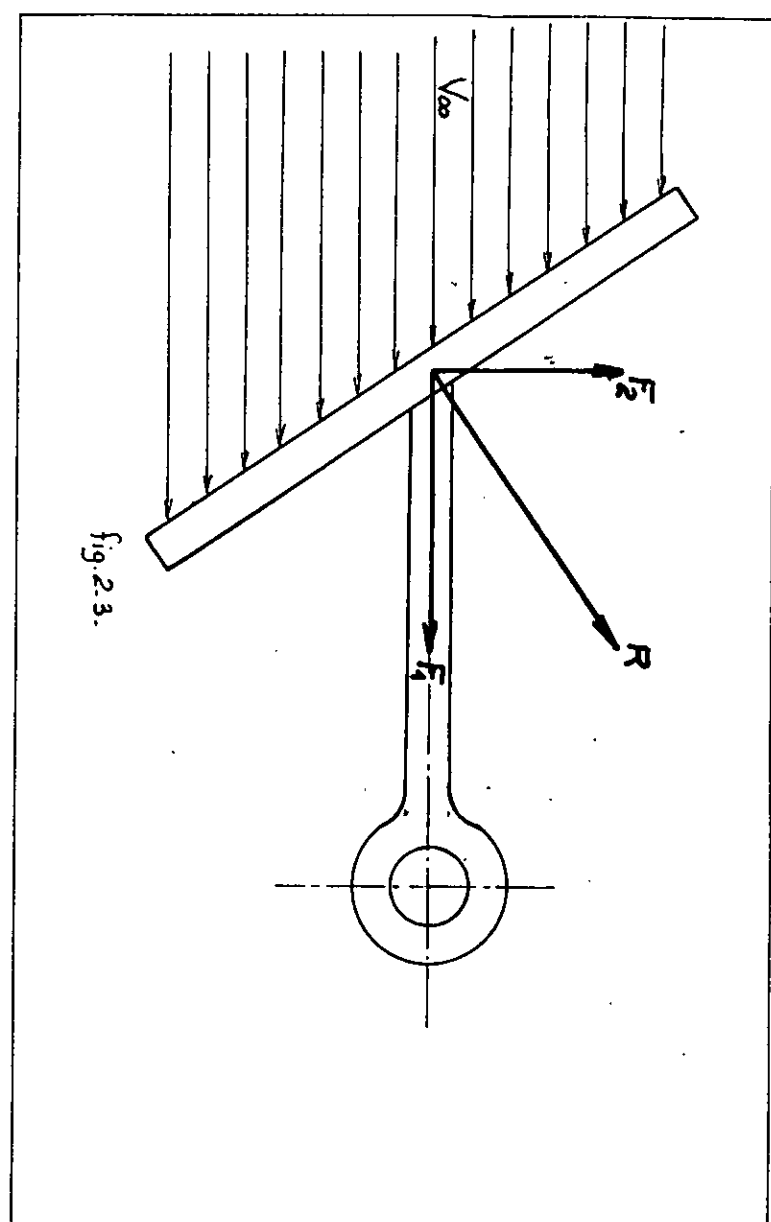
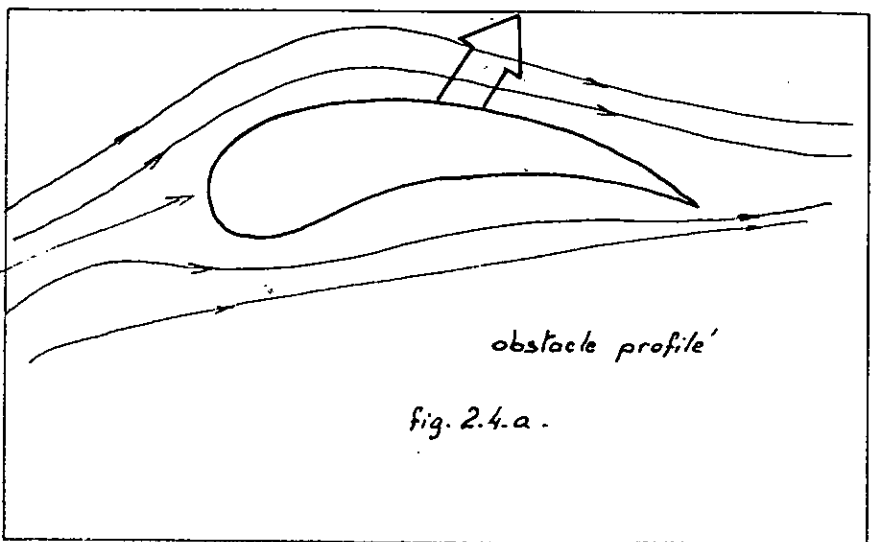
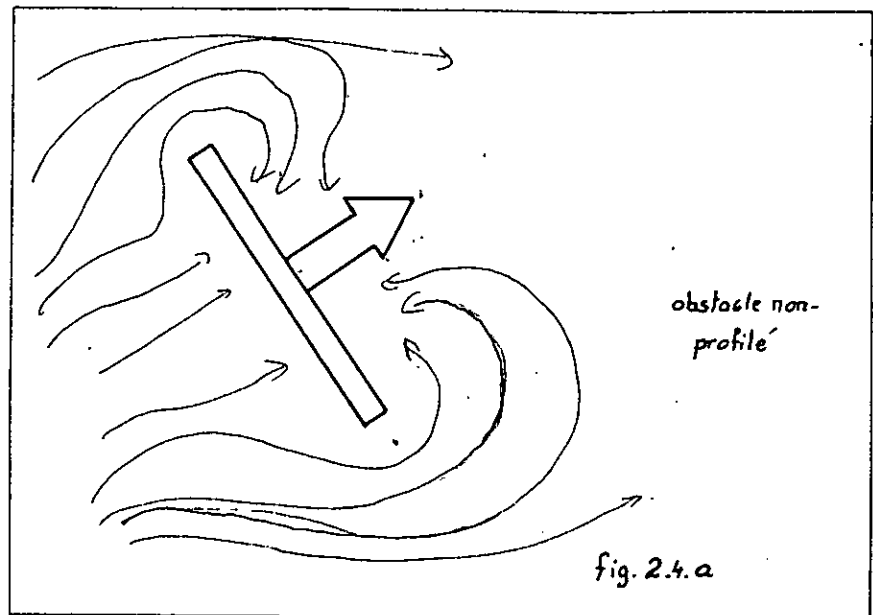
$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = \Delta \varphi = 0$$

où φ est le potentiel des vitesses, qui permet d'utiliser des méthodes analogiques aéroélectriques. Celles-ci substituent le calcul à l'expérience.

II.4. ETUDE D'UNE TRANCHE DE PALE:

Soit une tranche de pale d'épaisseur dy , à la distance y de l'axe de rotation et ω la vitesse de rotation de l'hélice. La vitesse de la tranche est donc $V_0 = y\omega$.

Le vecteur vitesse \vec{V} du vent est parallèle à l'axe de ro-



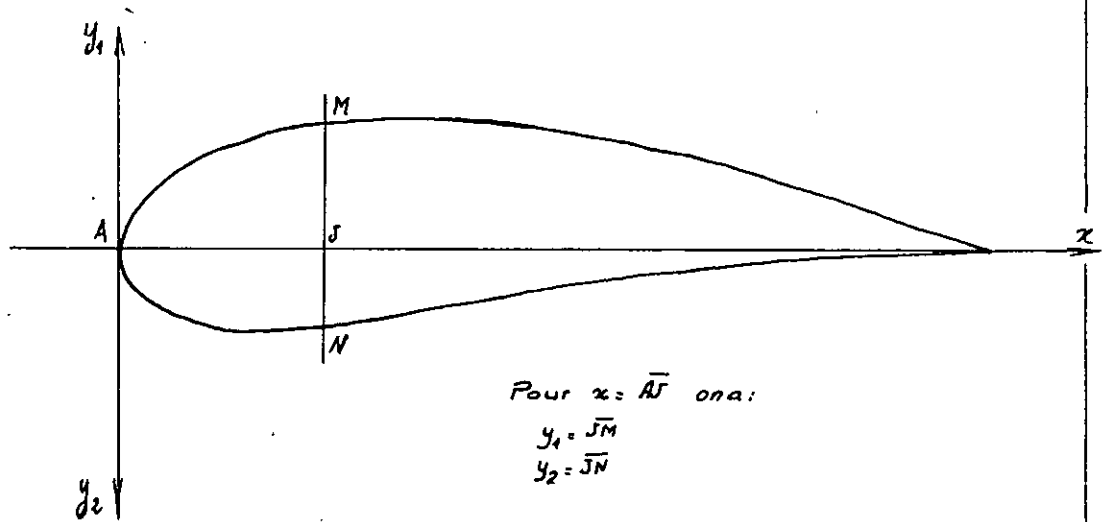


Fig. 2-5.

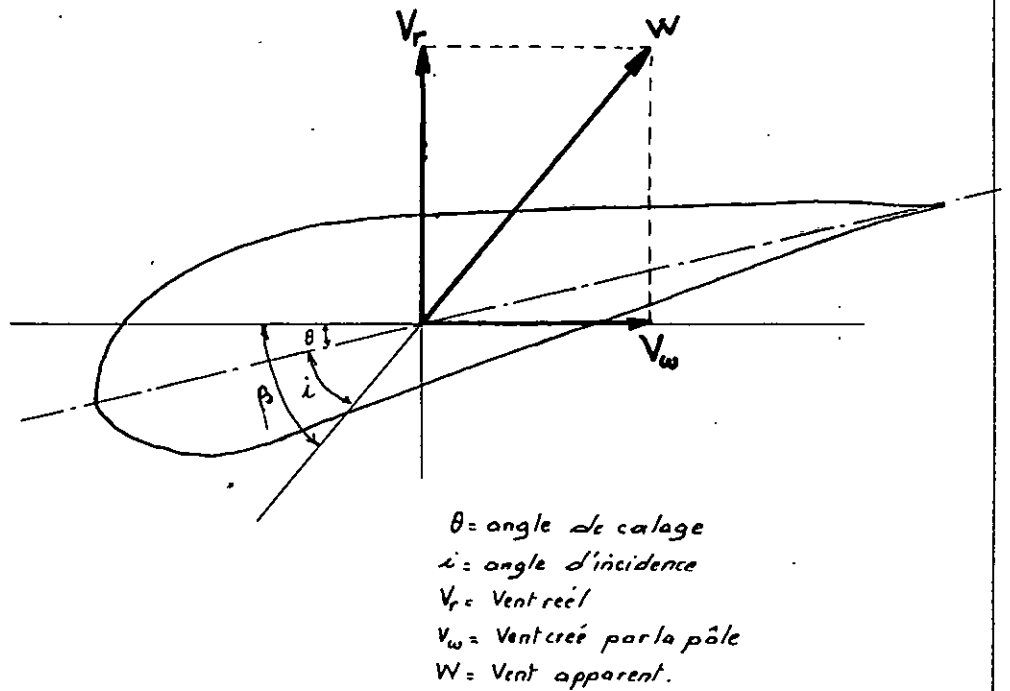


Fig. 2.6.

tation.

Donc la tranche de la pàle est soumise à un vent apparent W , tel que: $\vec{W} = \vec{V} + \vec{V}_W$ où $\vec{V}_W = \vec{V}_0 - \vec{y}W$.

On appelle angle de calage θ , l'angle formé par le plan de rotation et la corde (voir fig. 2.6); l'angle d'incidence i est l'angle formé par la corde et le vecteur vitesse du vent apparent. Nous noterons par β la somme de ces deux angles.

Le vent apparent exerce sur la tranche de pàle une force $d\vec{R}$ perpendiculaire à la corde.

Le point d'application de cette force est au centre aérodynamique de la tranche, ce dernier se déplace quand l'incidence varie.

La force $d\vec{R}$ se décompose en deux forces: (voir fig. 2.8)

- La traînée dR_x , projection de $d\vec{R}$ sur un axe parallèle au vent apparent.

- La poussée dR_z , projection de $d\vec{R}$ sur un axe perpendiculaire au vent apparent.

Nous avons:

$$dR_x = (\rho/2) C_x W^2 dS$$

$$dR_z = (\rho/2) C_z W^2 dS$$

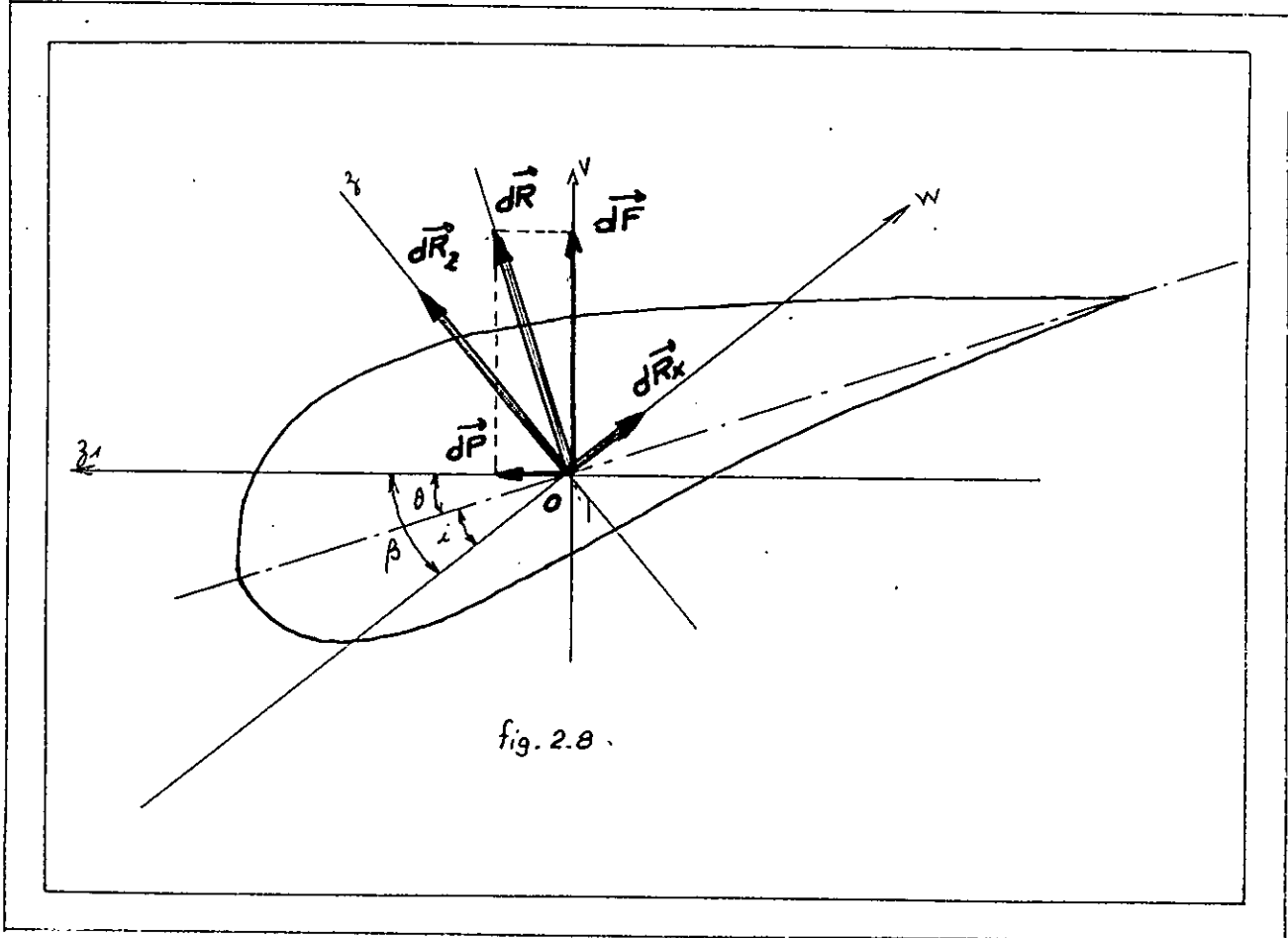
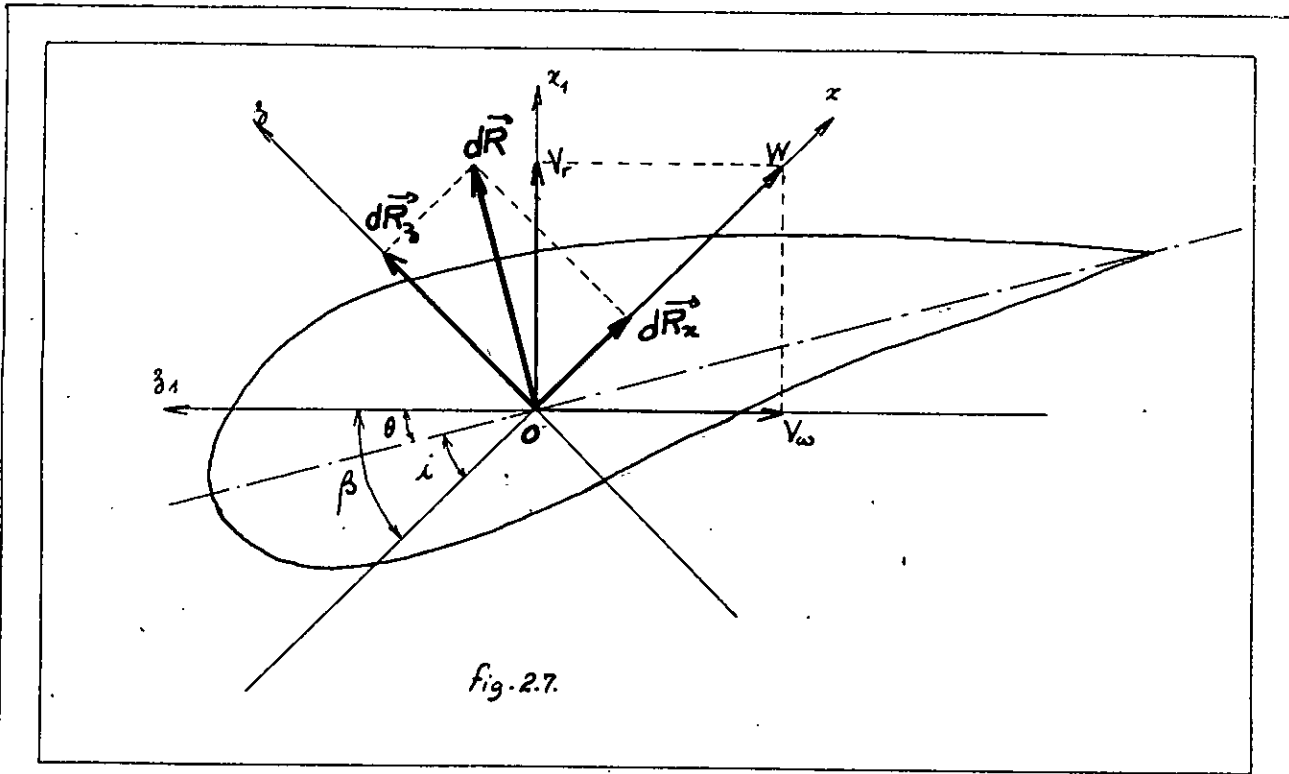
où C_x et C_z sont les coefficients de traînée et de poussée

ρ est la masse volumique de l'air.

Les coefficients C_x et C_z dépendent essentiellement du profil et de l'angle d'incidence. Ils sont déterminés en soufflerie et sont présentés par des courbes, en portant en abscisse l'incidence i en degrés et en ordonnée C_x et C_z .

Le rapport de ces deux courbes nous donne une troisième qui représente la finesse en fonction de l'incidence.

On note: $C_x/C_z = f$ la finesse dont nous verrons l'utilité



plus loin .

RENDEMENT D'UNE TRANCHE DE PALE:

Les forces de poussée et de traînée engendrent une force (dP) qui fera tourner l'hélice et force (dF) inutile qui sera compensée par la réaction du support de l'hélice (fig. 2)

Nous avons: $dP = dR_z \sin \beta - dR_x \cos \beta$

$$dF = dR_z \cos \beta + dR_x \sin \beta$$

Le rendement aérodynamique de la tranche de pale est:

$$r = \frac{\text{puissance utile}}{\text{puissance inutile}} = \frac{P_u}{P_p}$$

La puissance utile est:

$$P_u = dP \cdot W \cdot y$$

La puissance inutile est:

$$P_p = dF \cdot V_r \quad \text{où } V_r \text{ est la vitesse du vent réel.}$$

donc:
$$r = \frac{dP \cdot W \cdot y}{dF \cdot V_r} = \frac{(dR_z \sin \beta - dR_x \cos \beta) \cdot W \cdot y}{(dR_z \cos \beta + dR_x \sin \beta) \cdot V_r}$$

$$\text{Or } f = dR_x / dR_z = C_x / C_z \quad \text{et } \text{tg } \beta = V_r / W \cdot y$$

et par suite nous trouvons:

$$r = (1 - (f / \text{tg } \beta)) / (1 + f / \text{tg } \beta)$$

Remarquons que plus la finesse f est petite, plus le rendement est grand. A la limite on a r=1 pour f=0.

En réalité on ne peut atteindre une valeur nulle de la finesse, mais seulement une valeur optimale pour un certain angle d'incidence qui est déterminé en soufflerie.

Ceci est valable uniquement pour une tranche de pale.

Pour le calcul du rendement d'une pôle voir choix des pâles.

CHAPITRE III

DETERMINATION DES DIFFERENTS ELEMENTS DE L'INSTALLATION

III.1. ETUDE STATISTIQUE:

III.1.1. Vitesses moyennes journalières:

Avant d'installer un aerogénérateur, il faut étudier statistiquement, les disponibilités énergétiques du site choisi. D'où la nécessité d'avoir les relevés du vents sur le site pendant une année ou plus. Ce qui demande un travail fastidieux et du temps.

On est donc conduit à avoir recours aux relevés du vent de la station météorologique la plus proche.

Ces relevés présentent un minimum des potentialités énergétiques du vent, car la plupart des stations météorologiques sont situées dans des cuvettes près des aéroports.

Pour notre cas, nous nous sommes basés sur les relevés du vent de la station de l'aéroport de DAR-EL-BAIDA (Alger).

Nous présentons sur les tableaux N° 3.1, Les valeurs des vitesses moyennes journalières du vent des années 1971, 1972, 1974.

III.1.2. Chronogramme:

Un chronogramme est un graphe donnant le pourcentage de jours (le nombre de jours de l'année) sur une année où le vent aura dépassé une vitesse V et la puissance par jour et par m^2 qu'apporterait ce vent.

Les tableaux 3.2 présentent:

Le nombre de jours où la vitesse V a été observée.

TABLEAUX DONNANT LA VITESSE MOYENNE JOURNALIERE

DU VENT DANS LA REGION DE DAR-EL-BAIDA:

(en m/s)

A N N E E 1 9 7 1												
	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
1	3,0	8,4	3,3	1,3	2,6	2,6	6,3	2,5	3,1	3,9	2,0	7,8
2	5,6	1,3	2,9	4,8	7,1	5,0	3,8	2,4	4,3	3,4	2,5	5,6
3	3,0	1,9	2,1	2,1	2,1	2,3	4,5	3,1	2,3	2,4	2,8	4,8
4	5,1	1,9	1,5	2,3	1,5	5,3	2,9	2,4	3,0	2,3	1,3	2,5
5	3,3	2,9	1,8	6,8	1,5	4,9	4,1	2,6	2,4	2,1	0,8	1,1
6	3,8	1,0	2,8	1,3	1,0	6,3	4,5	1,9	3,1	3,5	2,3	3,9
7	2,8	1,4	5,3	4,3	5,6	5,3	4,0	2,9	3,4	3,9	6,6	5,9
8	0,9	0,4	5,5	2,5	5,5	1,9	4,4	3,3	2,9	7,8	8,4	4,4
9	0,6	1,4	5,0	5,9	1,8	4,1	2,8	3,3	2,3	4,8	0,3	3,9
10	0,5	2,4	3,0	4,6	3,0	4,8	3,3	3,5	3,6	4,4	5,0	3,5
11	2,4	2,9	5,9	1,5	4,0	4,4	2,0	2,5	2,0	3,0	5,8	2,8
12	1,9	0,8	6,3	3,4	2,5	2,1	3,1	2,9	2,6	1,5	6,1	1,8
13	1,9	3,3	3,9	2,9	1,1	2,5	3,1	1,4	2,9	1,3	4,3	3,3
14	1,9	1,6	2,4	1,3	1,3	2,8	3,3	5,5	2,5	4,0	2,9	0,5

Année 1971 (suite)

15	5,5	4,5	7,3	1,4	4,5	4,3	4,9	2,6	2,6	3,4	1,5	2,3
16	3,9	8,4	7,0	1,4	7,4	5,6	4,3	1,8	3,3	2,8	2,0	2,6
17	1,5	7,3	5,8	2,5	2,9	6,8	3,9	2,2	1,6	1,5	2,6	1,6
18	4,6	5,8	2,5	7,9	2,5	6,0	1,5	3,6	3,3	3,0	1,6	1,0
19	3,1	5,5	4,4	2,1	3,8	2,9	3,0	4,3	3,3	3,8	5,0	1,1
20	7,0	2,1	5,6	1,6	3,3	1,6	2,3	3,0	6,0	2,9	3,9	1,0
21	6,5	1,0	5,0	2,4	3,5	3,1	1,4	4,2	5,8	1,8	3,0	0,6
22	7,4	0,5	7,8	3,9	5,4	1,8	3,0	4,6	3,8	1,8	6,6	2,3
23	3,5	2,1	4,9	6,9	5,8	3,3	3,1	3,6	2,8	2,9	4,5	0,6
24	5,3	1,5	3,9	5,9	6,1	2,1	3,0	2,9	2,0	2,8	5,4	0,8
25	3,8	2,4	2,3	2,3	5,3	4,4	2,5	3,1	5,9	2,0	1,0	0,9
26	2,0	1,5	1,1	1,4	6,1	1,6	2,1	3,1	3,1	1,9	8,6	0,8
27	2,3	2,6	4,1	1,9	6,4	2,8	2,5	3,1	3,9	2,5	4,3	1,1
28	0,9	3,9	2,6	3,1	4,6	2,0	2,6	2,8	2,5	3,0	6,5	1,9
29	2,1	/	2,3	2,9	4,1	2,6	2,0	3,3	0,9	2,7	8,0	4,1
30	4,9	/	3,5	2,3	2,4	3,5	2,1	3,9	2,5	2,1	8,1	6,9
31	6,6	/	6,9	/	2,6	/	1,3	2,8	/	1,8	/	5,0

ANNÉE 1972

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
1	2,0	2,8	2,5	3,9	3,3	1,6	3,4	1,9	2,6	3,4	2,1	5,6
2	4,0	3,0	3,4	2,1	5,6	2,1	2,8	3,4	2,9	2,8	2,3	2,5
3	2,3	1,4	5,1	1,4	7,4	1,6	3,1	5,4	2,5	4,0	4,9	3,8
4	0,3	2,6	6,6	2,0	3,9	3,4	3,0	4,5	3,9	2,4	2,5	3,8
5	4,5	3,3	9,8	4,1	2,3	2,6	5,1	2,1	3,8	2,9	3,6	4,5
6	4,5	8,5	7,4	2,5	2,5	3,5	2,5	2,3	3,1	2,1	3,4	3,6
7	2,3	6,6	7,4	2,1	2,1	1,8	4,5	3,0	4,5	3,7	0,5	1,9
8	2,8	7,3	2,8	3,8	2,5	4,3	3,3	3,0	4,6	1,5	1,4	3,0
9	2,6	6,8	4,5	2,1	3,1	3,1	3,5	2,5	2,1	2,9	2,0	2,5
10	6,3	6,6	6,1	6,9	1,4	2,1	3,0	3,3	4,0	1,5	1,4	3,8
11	4,1	7,6	1,8	6,4	1,5	2,5	2,8	2,1	4,4	3,7	2,9	3,8
12	4,0	8,4	2,5	7,0	1,9	2,8	4,1	3,0	5,6	3,9	2,8	4,5
13	6,9	6,4	3,4	6,0	3,9	2,8	6,4	5,3	3,8	6,6	0,8	4,5
14	2,8	7,3	5,4	1,9	6,9	3,6	3,6	5,1	4,1	4,5	2,9	2,6
15	2,4	2,5	2,8	4,0	4,8	4,5	2,5	2,9	4,0	1,3	3,6	1,4

Année 1972 (suite)

16	6,0	3,5	2,6	3,5	3,8	4,6	4,0	4,5	3,5	1,6	1,8	1,3
17	8,4	5,3	3,5	3,0	1,9	2,0	1,9	4,6	2,0	4,5	1,5	1,0
18	7,9	3,5	2,9	3,6	4,8	1,5	2,1	3,6	2,0	2,3	3,6	1,8
19	8,8	6,5	3,0	4,0	1,9	1,5	3,3	5,9	3,1	4,5	3,3	0,9
20	6,8	3,9	2,6	4,0	2,5	3,8	2,0	5,4	3,1	2,3	4,9	4,3
21	6,9	4,8	4,0	3,6	2,5	6,6	2,8	4,8	4,9	4,0	3,1	3,3
22	8,4	7,0	3,5	2,5	3,1	5,4	2,0	3,1	4,4	3,5	1,6	5,0
23	7,3	9,8	3,0	2,0	2,9	1,1	1,9	2,3	5,1	3,0	2,5	4,8
24	2,6	6,9	3,1	4,0	2,5	2,5	3,0	4,3	3,1	1,6	3,4	3,4
25	5,3	8,0	3,0	3,0	2,4	2,6	3,1	3,4	4,5	3,9	3,6	2,3
26	6,4	5,3	1,1	5,8	2,0	2,0	2,5	4,6	6,4	4,0	2,1	2,5
27	5,6	3,6	2,9	5,1	1,1	2,1	3,9	2,8	5,5	3,6	3,4	1,0
28	4,6	2,5	1,6	2,3	3,9	2,3	4,6	2,6	3,0	5,3	2,9	4,3
29	4,9	4,0	1,4	1,8	2,0	2,1	4,1	2,8	4,6	3,4	3,5	3,7
30	4,1	/	1,9	4,3	1,6	2,5	2,4	3,5	2,5	1,5	5,6	3,9
31	3,5	/	2,0	/	2,0	/	1,5	4,9	/	3,0	/	9,8

ANNÉE 1974

	J	F	M	A	M	JJ	J	A	S	O	N	D
1	2,1	1,6	1,6	2,9	6,0	4,7	3,9	3,5	1,8	2,0	2,3	0,8
2	1,8	2,3	3,4	1,5	3,2	7,2	3,6	1,8	1,3	4,5	0,6	1,3
3	2,1	6,9	4,0	2,6	5,6	5,3	2,4	2,3	3,0	2,0	4,1	0,7
4	3,4	5,5	5,6	2,9	6,9	4,3	4,8	4,8	4,3	1,5	2,0	0,7
5	0,9	5,6	5,9	6,2	4,4	4,0	2,1	3,3	4,3	1,9	3,5	0,8
6	3,1	7,9	1,1	1,9	0,7	3,2	3,6	2,4	2,8	2,9	3,1	2,1
7	4,5	8,1	5,5	3,4	2,0	5,6	4,4	3,0	2,1	2,0	4,0	2,5
8	1,5	2,3	4,5	2,0	2,0	2,0	2,6	3,5	1,5	3,4	3,3	0,4
9	4,1	1,1	1,6	2,4	1,2	2,6	2,2	2,3	2,9	1,3	0,8	0,3
10	6,4	0,9	2,1	5,4	1,9	2,7	3,3	1,5	3,3	0,8	0,8	0,7
11	1,6	1,4	3,6	5,5	2,4	8,5	3,1	2,5	2,3	1,3	0,9	2,9
12	0,3	5,8	2,5	2,9	2,8	4,5	3,0	5,0	3,3	3,6	0,8	4,6
13	2,8	14,1	3,4	7,0	2,5	3,2	3,9	2,6	4,6	1,3	5,4	2,5
14	2,0	11,3	5,9	4,9	1,9	5,1	2,2	1,9	2,1	3,5	0,8	3,0
15	2,5	3,4	6,4	4,4	0,9	5,4	5,0	3,1	2,8	2,7	3,6	0,6

Année 1974 (suite)

16	0,9	7,8	5,6	4,6	3,0	3,6	3,5	2,5	2,4	2,8	1,8	1,1
17	1,6	5,5	1,8	3,6	1,9	2,8	2,3	2,8	2,5	0,5	3,1	0,5
18	2,1	7,6	1,8	2,4	3,5	2,3	3,9	2,5	3,4	4,5	7,5	1,1
19	1,1	5,6	3,3	4,7	1,9	2,5	5,2	2,9	3,8	4,5	2,1	0,8
20	0,8	0,9	4,4	1,2	2,1	3,0	4,0	3,8	2,1	5,5	0,8	3,9
21	1,0	1,1	2,1	1,4	1,7	2,5	3,5	1,5	1,0	4,4	1,1	0,5
22	1,1	2,6	2,1	1,1	3,0	3,1	6,0	2,0	1,8	7,6	0,4	1,6
23	0,5	6,0	3,2	2,0	1,4	3,3	5,0	2,5	1,6	3,0	1,3	1,0
24	1,5	3,1	3,2	3,4	1,9	1,9	2,0	3,4	5,9	4,6	7,9	0,7
25	1,6	3,5	2,0	2,4	1,3	3,9	3,1	3,1	4,3	4,1	2,9	2,4
26	2,8	2,3	2,0	1,9	1,3	4,0	4,4	2,3	3,6	3,1	3,3	2,0
27	3,4	2,9	3,6	3,5	1,1	4,3	3,5	2,6	3,3	5,1	4,1	1,8
28	1,6	3,5	3,3	5,0	2,0	3,5	3,0	2,3	3,0	5,3	4,1	1,9
29	2,1	/	9,0	6,4	2,1	5,0	1,6	1,8	2,0	4,4	1,8	1,3
30	1,3	/	11,4	6,7	3,9	1,6	2,2	4,8	1,4	3,5	1,4	1,9
31	2,0	/	7,8	/	1,1	/	3,9	4,4	/	5,1	/	2,6

TABLEAU N°3_1

NOTATION:

- V = Vitesse moyenne journalière du vent en m/s
 P = Puissance en KWh/m² calculant à partir de la formule/
 $P = 0,37 \times 24V^3 / 1000$
 NJ = Nombre de jours de l'année où V est observée;
 CJ = Nombre de jours de l'année où la vitesse est supérieure ou égale à V.

ANNÉES		1971		1972		1974	
V	P	NJ	CJ	NJ	CJ	NJ	CJ
0,3	$2,39 \times 10^{-4}$	1	365	1	366	2	365
0,4	$5,68 \times 10^{-4}$	1	364			2	363
0,5	$1,11 \times 10^{-3}$	3	363	1	365	4	361
0,6	$1,91 \times 10^{-3}$	3	360			2	357
0,7	$3,05 \times 10^{-3}$					5	355
0,8	$4,54 \times 10^{-3}$	4	357	1	365	10	350
0,9	$6,47 \times 10^{-3}$	4	353	1	363	6	340
1,0	$8,88 \times 10^{-3}$	6	349	2	362	3	334
1,1	$1,18 \times 10^{-2}$	5	343	3	360	11	331
1,2	$1,53 \times 10^{-2}$			1	357	2	320
1,3	$1,95 \times 10^{-2}$	8	338	2	356	10	318

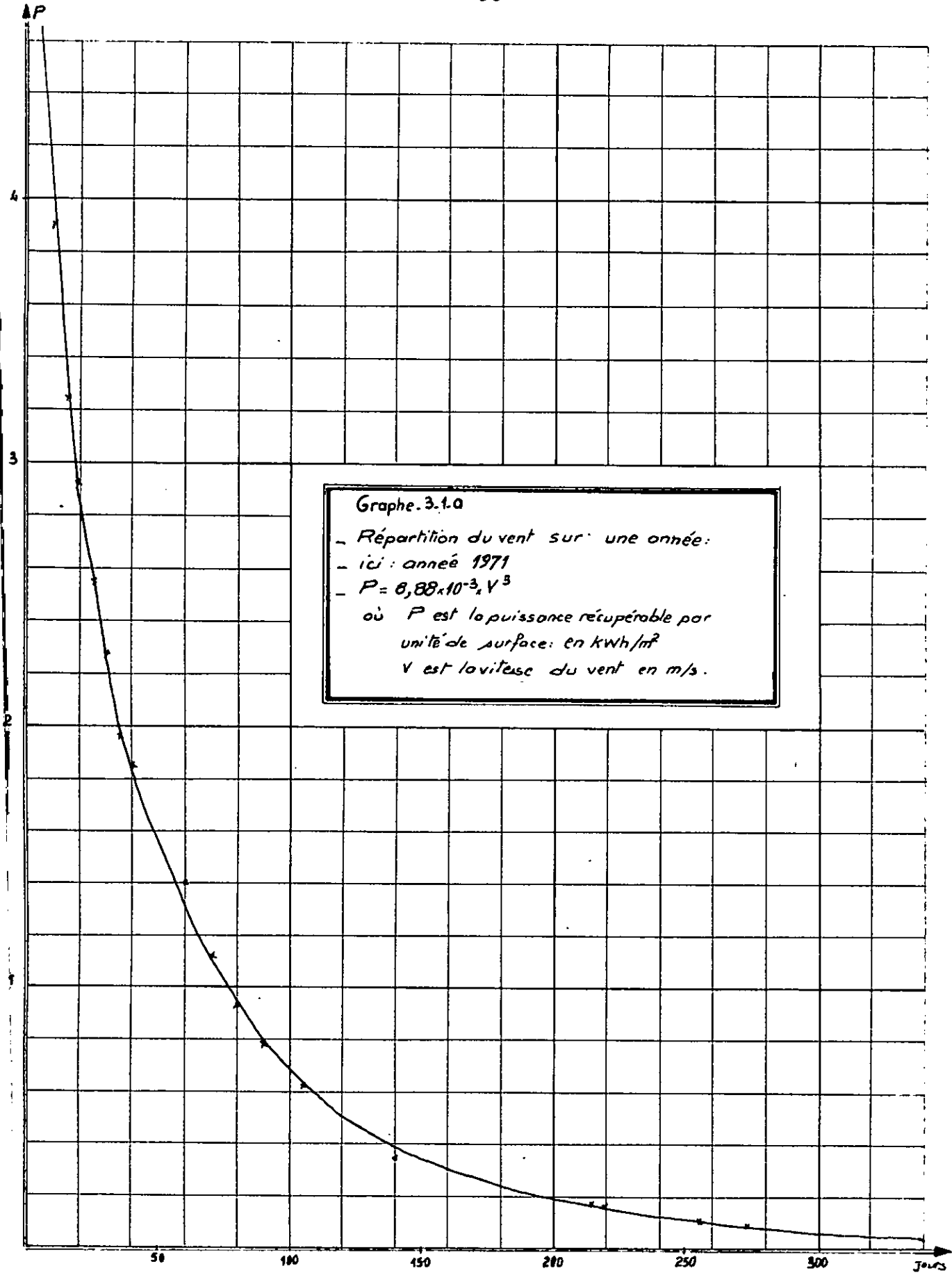
		1 9 7 1	1 9 7 2	1 9 7 4
1,4	$2,44 \times 10^{-2}$	7 330	7 354	5 308
1,5	$2,99 \times 10^{-2}$	11 323	8 347	7 303
1,6	$3,64 \times 10^{-2}$	7 312	7 339	11 296
1,7	$4,36 \times 10^{-2}$			1 285
1,8	$5,18 \times 10^{-2}$	8 305	5 332	10 284
1,9	$6,09 \times 10^{-2}$	10 297	9 327	12 274
2,0	$7,10 \times 10^{-2}$	9 287	13 318	18 262
2,1	$8,22 \times 10^{-2}$	14 278	15 305	14 244
2,2	$9,46 \times 10^{-2}$	1 264		4 230
2,3	$1,08 \times 10^{-1}$	14 263	11 290	11 226
2,4	$1,23 \times 10^{-1}$	10 249	4 279	8 215
2,5	$1,38 \times 10^{-1}$	16 239	25 275	12 207
2,6	$1,56 \times 10^{-1}$	13 223	11 250	7 195
2,7	$1,75 \times 10^{-1}$	1 210		2 188
2,8	$1,95 \times 10^{-1}$	12 209	13 239	8 186
2,9	$2,16 \times 10^{-1}$	15 197	11 226	9 178
3,0	$2,40 \times 10^{-1}$	13 182	16 215	10 169

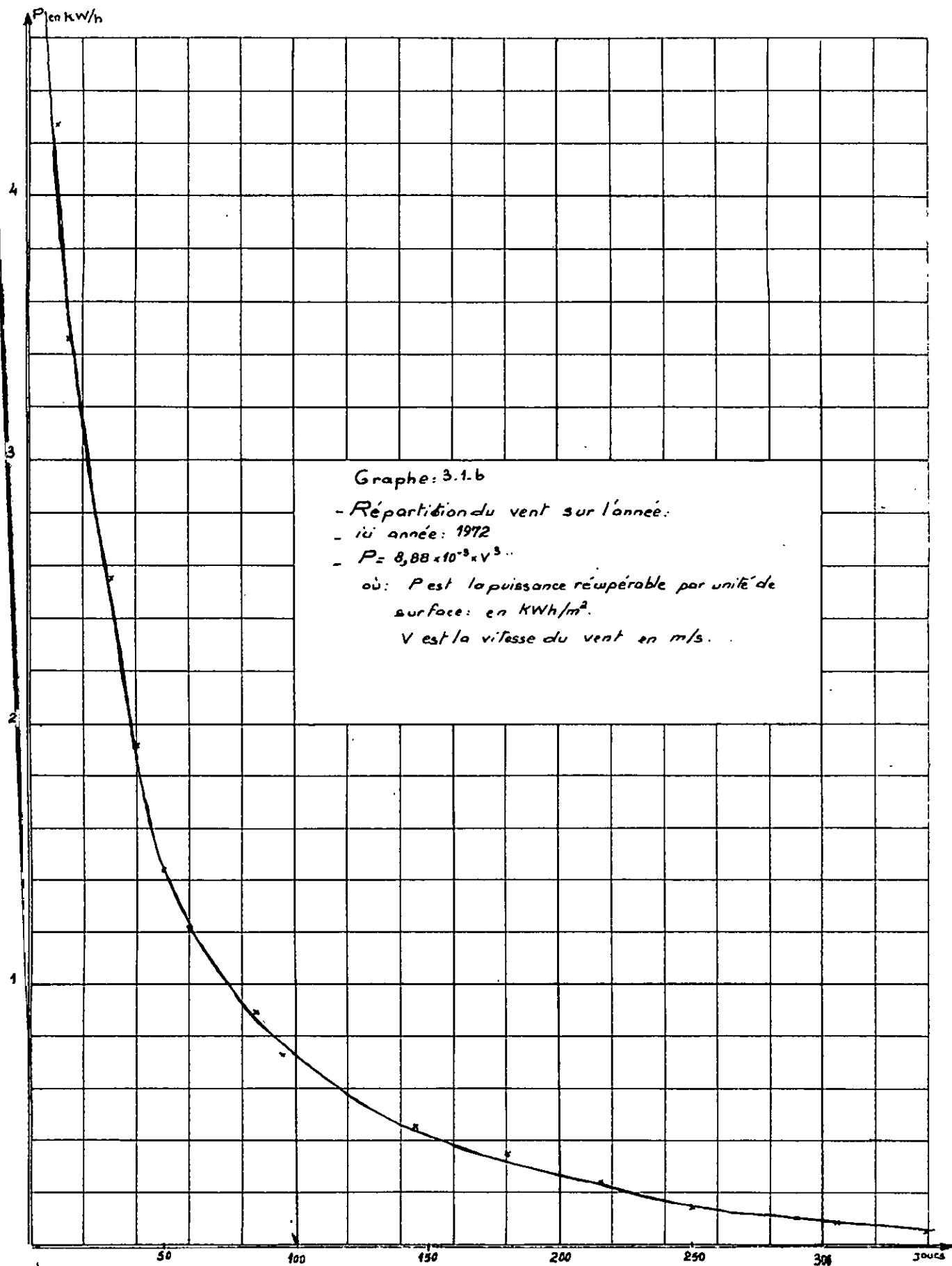
		1 9 7 1	1 9 7 2	1 9 7 4
3,1	$2,64 \times 10^{-1}$	13	169	12 199 10 159
3,2	$2,91 \times 10^{-1}$			5 149
3,3	$3,19 \times 10^{-1}$	13	156	7 187 10 144
3,4	$3,49 \times 10^{-1}$	4	143	12 180 10 134
3,5	$3,80 \times 10^{-1}$	7	139	12 168 13 124
3,6	$4,14 \times 10^{-1}$	3	132	11 156 9 111
3,7	$4,45 \times 10^{-1}$		3	145
3,8	$4,87 \times 10^{-1}$	7	129	9 142 2 102
3,9	$5,27 \times 10^{-1}$	13	122	10 133 7 100
4,0	$5,68 \times 10^{-1}$	3	109	14 123 5 95
4,1	$6,12 \times 10^{-1}$	5	106	6 109 5 88
4,2	$6,58 \times 10^{-1}$	1	101	
4,3	$7,06 \times 10^{-1}$	7	100	5 103 5 83
4,4	$7,56 \times 10^{-1}$	6	93	2 98 8 78
4,5	$8,09 \times 10^{-1}$	5	87	15 96 6 70
4,6	$8,64 \times 10^{-1}$	4	82	7 81 4 64
4,7	$9,22 \times 10^{-1}$			2 60

		1 9 7 1	1 9 7 2	1 9 7 4
4,8	$9,81 \times 10^{-1}$	4 78	6 74	3 58
4,9	1,04	4 74	5 68	1 55
5,0	1,11	6 70	1 63	5 54
5,1	1,17	1 64	5 62	3 49
5,2	1,25			1 46
5,3	1,32	4 63	5 57	2 45
5,4	1,40	2 59	4 52	3 43
5,5	1,48	5 57	1 48	5 40
5,6	1,56	5 52	5 47	6 35
5,8	1,74	6 47	1 42	1 29
5,9	1,82	5 41	1 41	3 28
6,0	1,92	2 36	2 40	3 25
6,1	2,01	3 34	1 38	
6,2	2,12			1 22
6,3	2,22	3 31	1 37	
6,4	2,32	1 28	5 36	3 21
6,5	2,44	2 27	1 31	

		1971	1972	1974
6,6	2,55	3 25	4 30	
6,7	2,67			1 18
6,8	2,79	2 22	2 26	
6,9	2,92	3 20	5 24	2 17
7,0	3,04	3 17	2 19	1 15
7,1	3,18	1 14		
7,2	3,31			1 14
7,3	3,45	2 13	3 17	
7,4	3,60	2 11	3 14	
7,5	3,75			1 13
7,6	3,89		1 11	2 12
7,8	4,21	3 9		2 10
7,9	4,37		1 10	2 8
8,0	4,55	1 6	1 9	
8,1	4,72	1 5		1 8
8,4	4,72	3 4	3 8	

		1971	1972	1974
8,5	5,45		1 5	1 5
8,6	5,65	1 1		
8,8	6,05		1 4	
9,0	6,47			1 4
9,8	8,35		3 3	
11,3	1,28x10			1 3
11,4	1,32x10			1 2
14,1	2,49x10			1 1





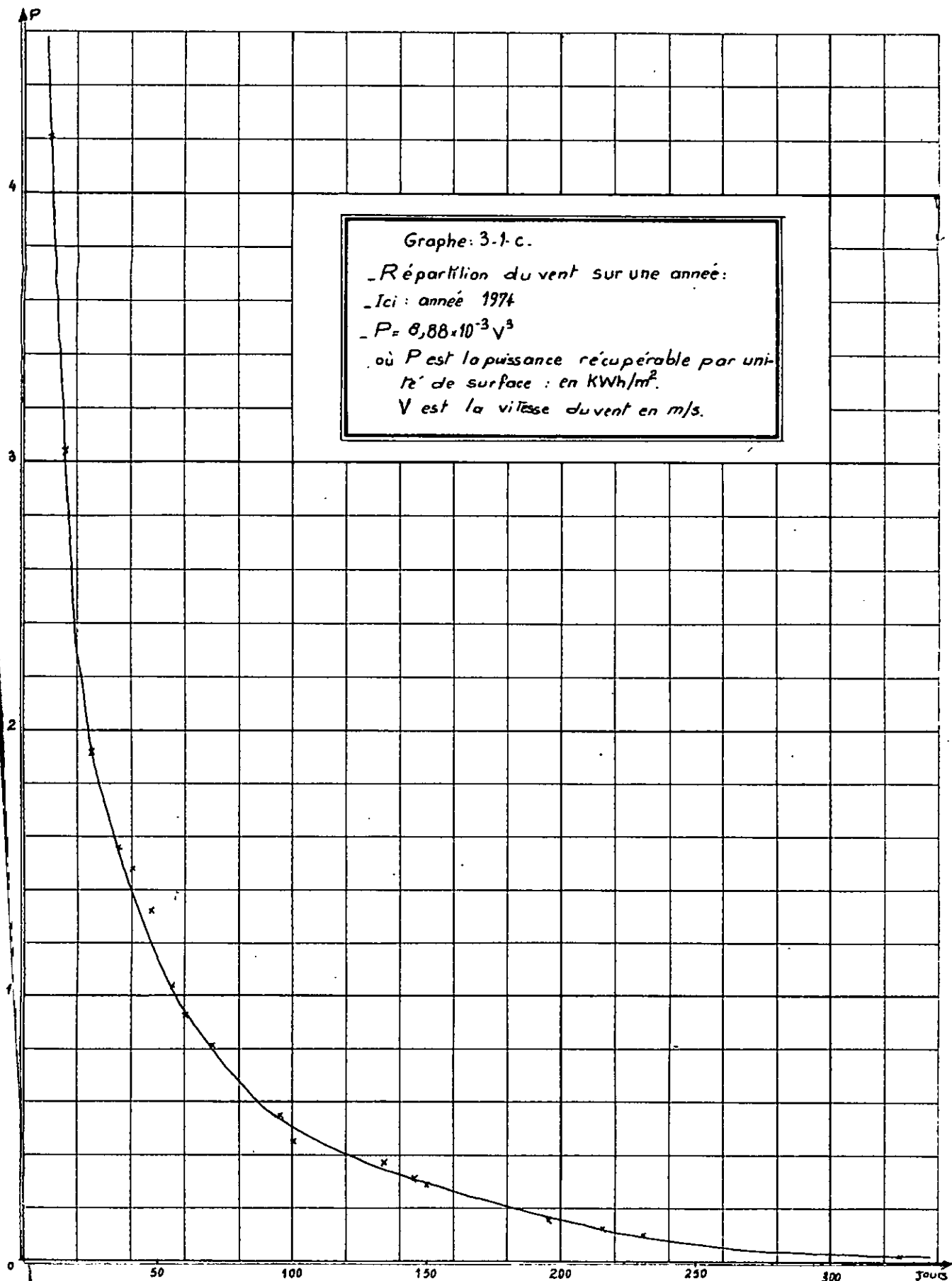
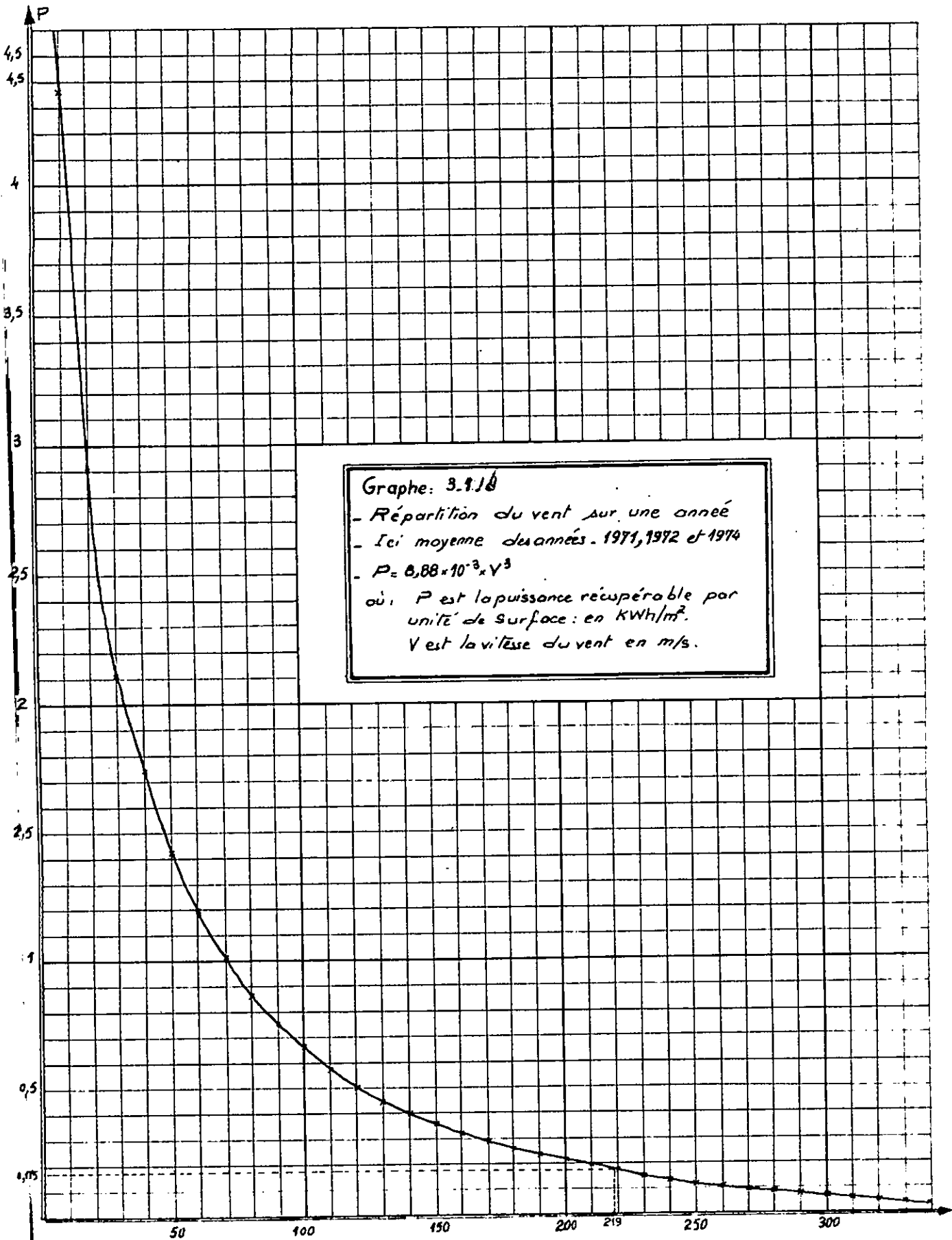


TABLEAU N° 3-2

Années ↓	Année: 1971		Année: 1972		Année: 1974		Moyenne	
	P ₇₁	V ₇₁	P ₇₂	V ₇₂	P ₇₄	V ₇₄	P _m	V _m
10	4,72	8,10	4,37	7,90	4,00	7,67	4,36	7,89
20	3,18	7,10	2,60	6,64	2,92	6,90	2,90	6,89
30	2,43	6,49	1,16	5,66	2,28	6,36	2,11	6,19
40	1,96	6,04	1,41	5,42	1,84	5,92	1,74	5,81
50	1,56	5,60	1,16	5,07	1,55	5,59	1,42	5,43
60	1,29	5,26	0,95	4,45	1,32	5,30	1,19	5,12
70	1,10	4,98	0,81	4,50	1,11	5,00	1,01	4,85
80	0,95	4,75	0,69	4,27	0,945	4,74	0,86	4,59
90	0,85	4,57	0,58	4,03	0,81	4,50	0,75	4,39
100	0,76	4,41	0,55	3,96	0,70	4,29	0,66	4,20
110	0,67	4,23	0,45	3,70	0,59	4,05	0,57	4,00
120	0,56	3,98	0,345	3,39	0,51	3,86	0,50	3,82
130	0,53	3,91	0,365	3,45	0,44	3,67	0,445	3,69
140	0,47	3,75	0,33	3,34	0,38	3,50	0,393	3,54
150	0,43	3,64	0,30	3,23	0,345	3,39	0,36	3,44

TABLEAU N°3_2 (suite)

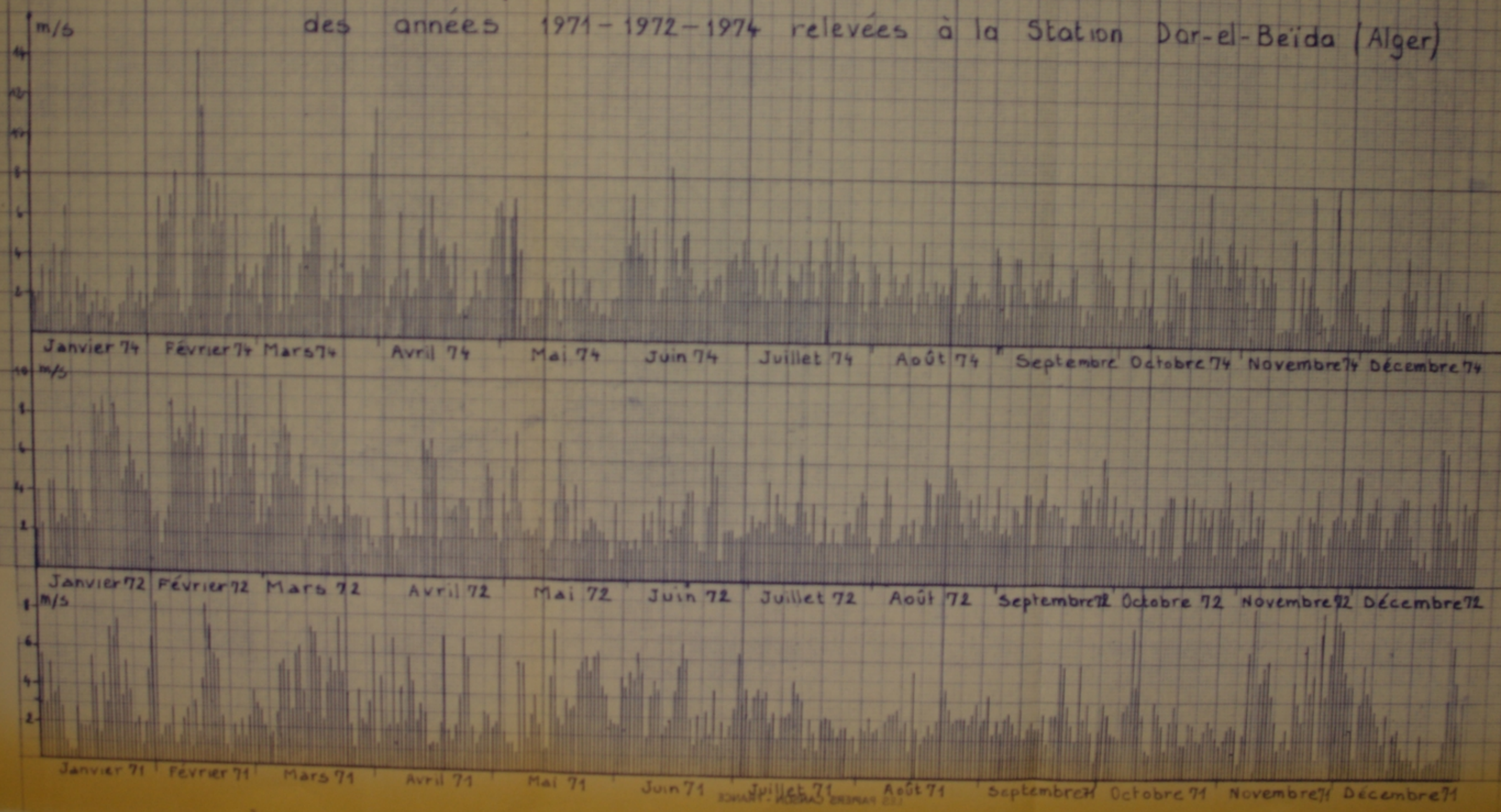
160	0,39	3,53	0,27	3,12	0,30	3,23	0,32	3,30
170	0,355	3,42	0,245	3,02	0,27	3,12	0,29	3,20
180	0,32	3,30	0,215	2,89	0,245	3,02	0,26	3,08
190	0,295	3,21	0,185	3,75	0,225	2,94	0,235	2,98
200	0,27	3,12	0,16	2,62	0,205	2,85	0,216	2,90
210	0,25	3,04	0,14	2,51	0,19	2,78	0,193	2,79
220	0,225	2,94	0,115	2,35	0,185	2,75	0,175	2,70
230	0,195	2,80	0,095	2,20	0,15	2,57	0,147	2,55
240	0,17	2,68	0,08	2,08	0,13	2,45	0,127	2,51
250	0,155	2,59	0,065	1,94	0,12	2,38	0,113	2,33
260	0,14	2,51	0,055	1,84	0,105	2,28	0,10	2,24
270	0,13	2,45	0,045	1,72	0,095	2,20	0,09	2,16
280	0,12	2,38	0,04	1,65	0,085	2,12	0,082	2,10
290	0,105	2,28	0,035	1,58	0,08	2,08	0,073	2,02
300	0,095	2,20	0,03	1,50	0,07	1,99	0,065	1,94
310	0,085	2,12	0,025	1,41	0,06	1,89	0,057	1,86
320	0,075	2,04	0,02	1,31	0,05	1,78	0,048	1,75
330	0,065	1,94	0,015	1,19	0,045	1,72	0,042	1,68



Graphe: 3.9.10
- Répartition du vent sur une année
- Ici moyenne des années 1971, 1972 et 1974
- $P = 0,88 \times 10^{-3} \times V^3$
où: P est la puissance récupérable par
unité de surface: en kWh/m^2 .
 V est la vitesse du vent en m/s .

Figure 3.2

Vitesses Moyennes Journalières du vent
des années 1971-1972-1974 relevées à la Station Dar-el-Beïda (Alger)



- Le nombre de jours où la vitesse V a été dépassée.
 - La puissance correspondante à la vitesse V en KW/m² par jour.
- Les graphes 3-1- sont les chronogrammes correspondants à ces tableaux.

III-1-3. Choix de la vitesse nominale:

Le choix de la vitesse nominale se fait sur le chronogramme, en se fixant au préalable, un pourcentage sur le nombre de jours de l'année.

Nous constatons qu'autour du pourcentage 60% la vitesse varie très peu autour de la valeur 3m/s.

Pour nos calculs nous prendrons comme vitesse nominale la vitesse 3 m/s qui correspond à 60% des jours de l'année.

III-1-4. Périodes défavorables:

L'aérogénérateur doit assurer une consommation moyenne, chaque jour. Etant donné le caractère aléatoire des vitesses du vent, il faut se prémunir contre les périodes défavorables.

Comme le montre le tableau ci-dessous, déduit du diagramme baton (graphe 3 2), ces périodes changent chaque année.

Année	Dates limitant la période		Durée de la Période (J)	Durée de la période maxi. (jours)
	Début	Fin		
1970	7-1	14-1	7	
1971	2-2	12-2	11	15
	20-2	6-3	15	
	14-12	28-12	14	

SUIITE				
1972	26-03	9-04	15	58
	5-05	2-07	58	
	1-11	17-11	17	
1974	11-01	2-02	22	53
	6-05	29-05	24	
	9-11	31-12	53	

TABEAU DONNANT LES PERIODES DEFAVORABLES

Nous constatons que la durée maximum de ces périodes est de deux mois environ. En connaissant la consommation journalière, on peut facilement calculer la capacité de stockage à prévoir.

III. 2. ETUDE DES CARACTERISTIQUES DE LA DYNAMO.

La génératrice utilisée a été récupérée d'une voiture.

Sa tension est de 12 volts. C'est une génératrice shunt qui fonctionne entre 1000 et 6000 tours/minuto.

Ces données étant insuffisantes, nous avons procédé à des essais à vide, en excitation séparée, à 1000 trs/mn et en charge pour une excitation constante de 2,3 ampères.

Nous donnons ci-dessous les relevées de ces essais.

Essai à vide à 1000 trs/mn:

Excitation (en A)	0,0	0,125	0,2	0,3	0,4	0,5	(1)
Tension (en V)	0,7	1,3	1,6	2,3	2,9	3,6	

(1)	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	(2)
	4,4	5,2	5,8	6,4	7,0	7,6	8,3	8,8	9,4	

(2)	1,55	1,7	1,85	1,9	2,17	2,5	2,2	2,1	1,9	(3)
	10,0	10,8	11,3	11,5	12,5	13,4	12,8	12,5	11,8	

(3)	1,7	1,5	1,4	1,3	1,2	1,0	0,9	0,8	0,7	(4)
	11,2	10,4	10,0	9,3	8,6	7,8	7,3	6,5	5,8	

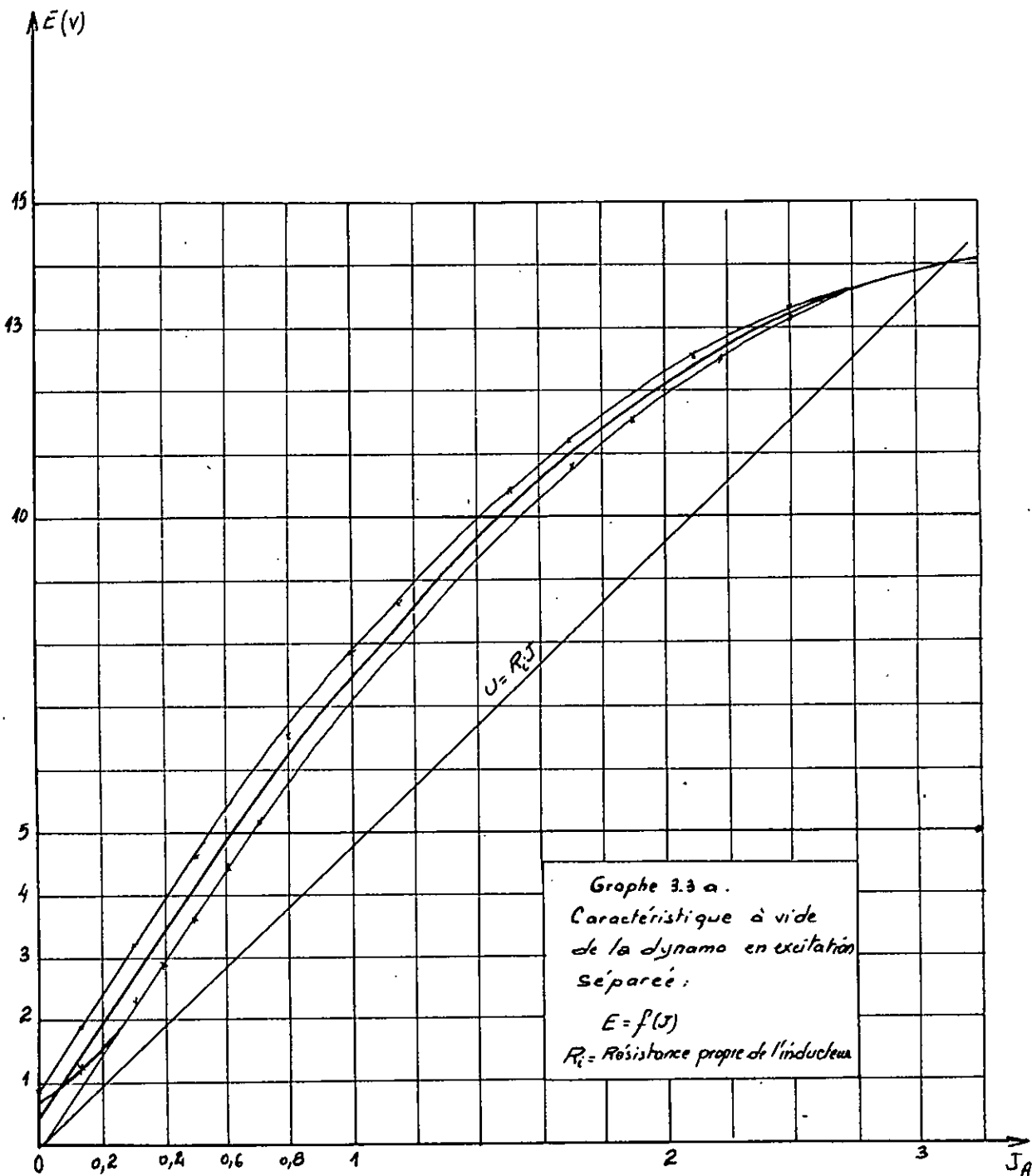
(4)	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,12	0,0
	5,4	4,6	3,8	3,2	2,4	1,9	0,8

Essai en charge à 1000 trs/mn pour une excitation de :
J=2,3A.

Débit (en A)	0,0	5,3	6,0	6,5	7,0	7,6	8,0	9,5	(1)
Tension (en V)	13,0	12,6	12,45	12,4	12,3	12,25	12,2	12,05	

(1)	10,8	11,5	12,0	12,9	14,65	15,0	16,6	18,0	(2)
	11,95	11,8	11,7	11,5	11,45	11,1	10,9	10,5	

(2)	19,5	20,3	21,0	22,1
	10,2	9,7	9,6	9,3



Graph 3.3 a.
Characteristic at no load
of the dynamo in separate
excitation:
 $E = f(J)$
 R_i = Resistance proper of the inductor

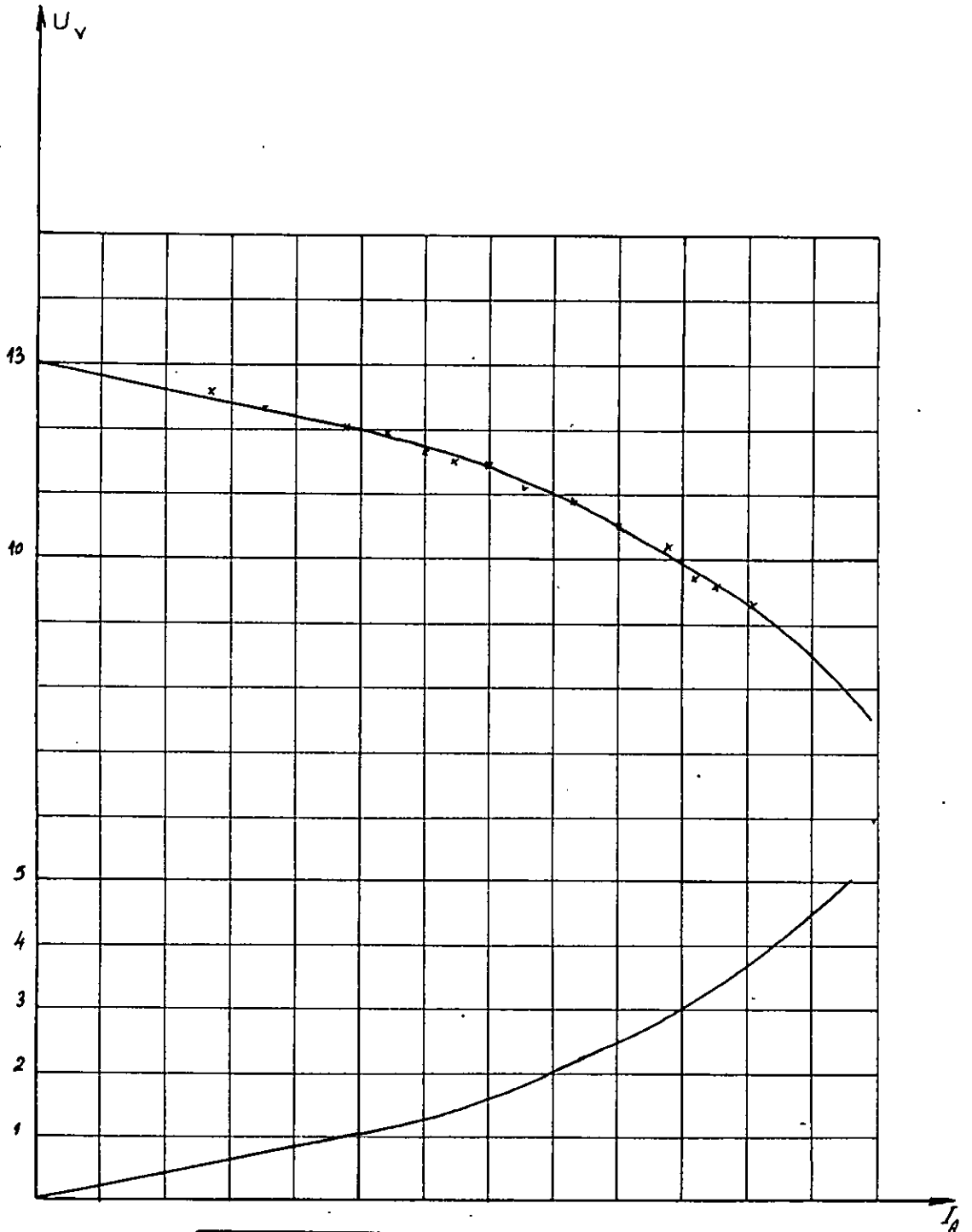
Les graphes (3.2.a et 3.2.b) résument ces deux tableaux et de ces deux graphes nous avons déduit les caractéristiques à vide et les chutes de tensions en charge pour les vitesses de rotation de 1000, 2000 et 3000 trs/mn.

Tableau donnant la tension à vide en fonction de l'excitation pour les trois vitesses citées:

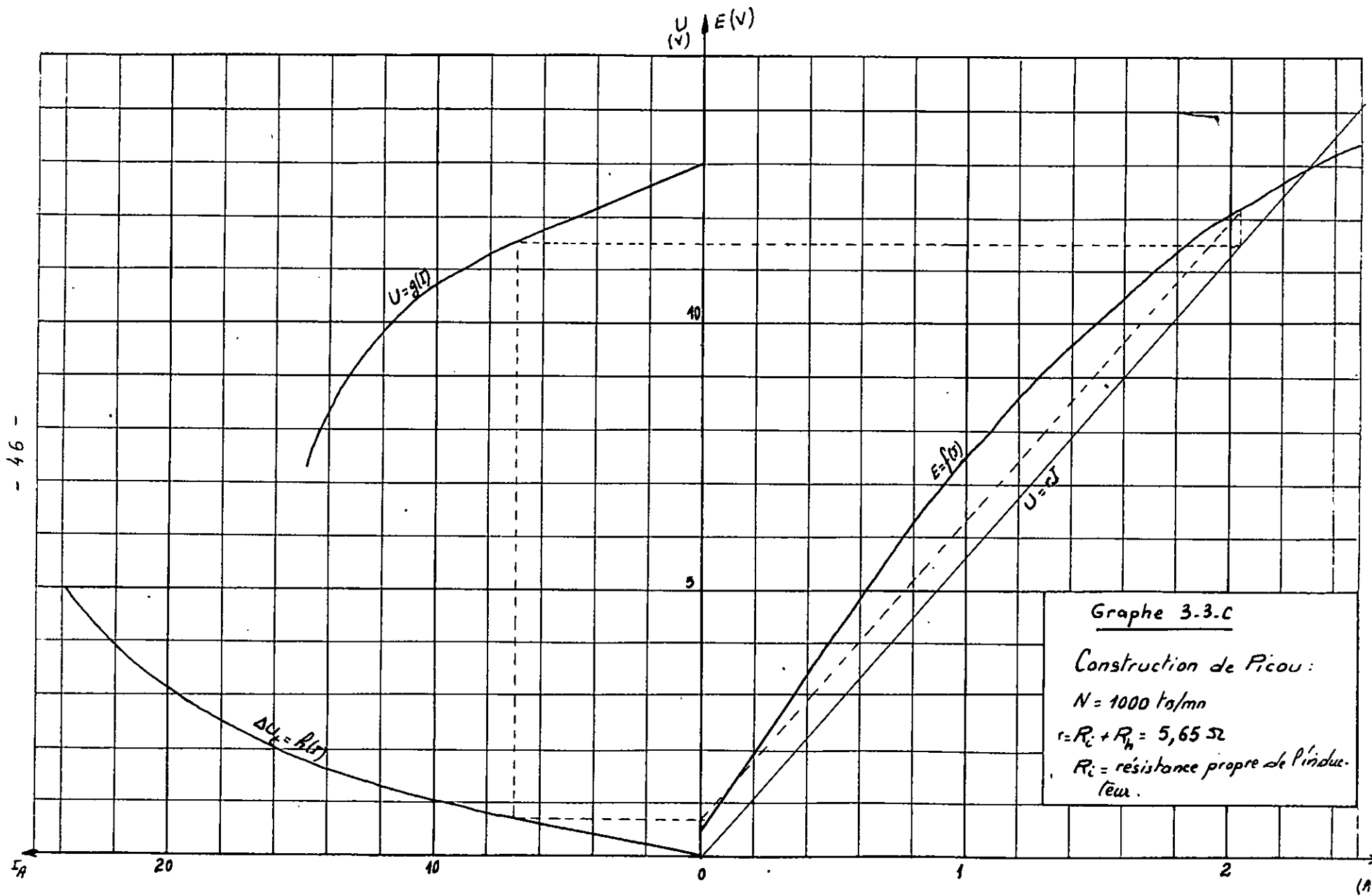
J (A)	E ¹⁰⁰⁰ (V)	E ²⁰⁰⁰ (V)	E ³⁰⁰⁰ (V)	J (A)	E ¹⁰⁰⁰ (V)	E ²⁰⁰⁰ (V)	E ³⁰⁰⁰ (V)
0,4	3,4	6,8	10,2	2,0	12,1	24,2	36,3
0,6	4,9	9,8	14,7	2,1	12,4	24,8	37,2
0,8	6,3	12,6	18,9	2,2	12,7	25,4	38,1
1,0	7,45	14,9	22,35	2,3	13,0	26,0	39,0
1,2	8,6	17,2	25,8	2,4	13,2	26,4	39,6
1,4	9,65	19,3	28,95	2,5	13,4	26,8	40,2
1,6	10,55	21,1	31,65	2,6	13,6	27,2	40,8
1,8	11,4	22,8	34,2	2,7	13,75	27,5	41,25

Tableau donnant les tensions en charge et la chute de tension en fonction du débit en excitation séparée.
N = 1000 trs/mn et J = 2,3 ampères.

Débit (A)	0,0	2,0	4,9	6,0	8,0	10,0	12,0
Tension (V)	13,0	12,8	12,6	12,4	12,2	12,0	11,7
Chute (V)	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,3



Graph 3-3.b.
- Characteristic in charge
of the dynamo in separate excitation.
- ① $U = f(I)$
- ② $\Delta U_e = g(I)$
 $N = 1000 \text{ tours/mn} ; J = 2,3 \text{ A}.$



$\Delta U_L = R_L I$

$U = g(I)$

$E = E_0$

$U = E - R_a I$

10

5

20

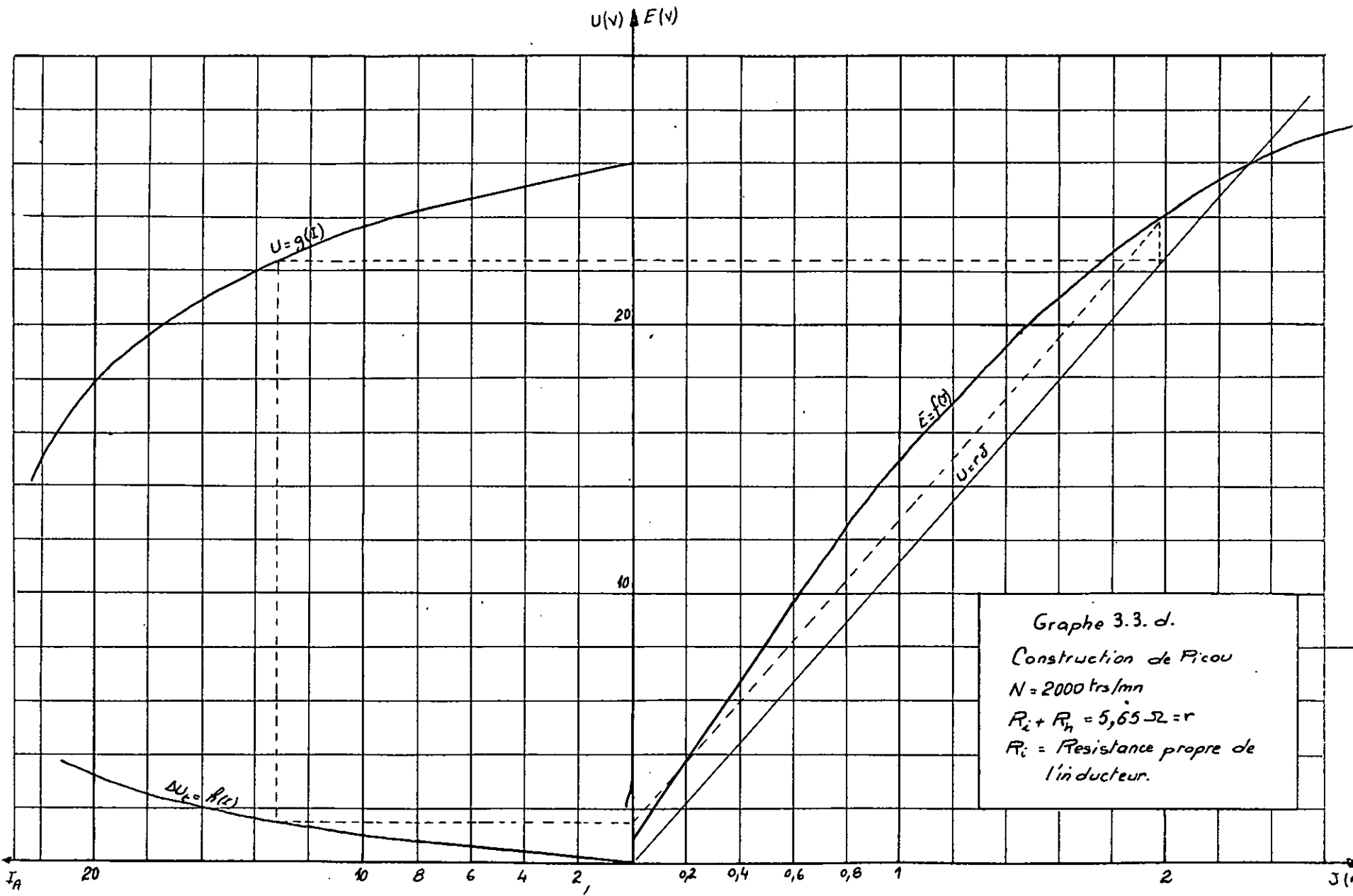
40

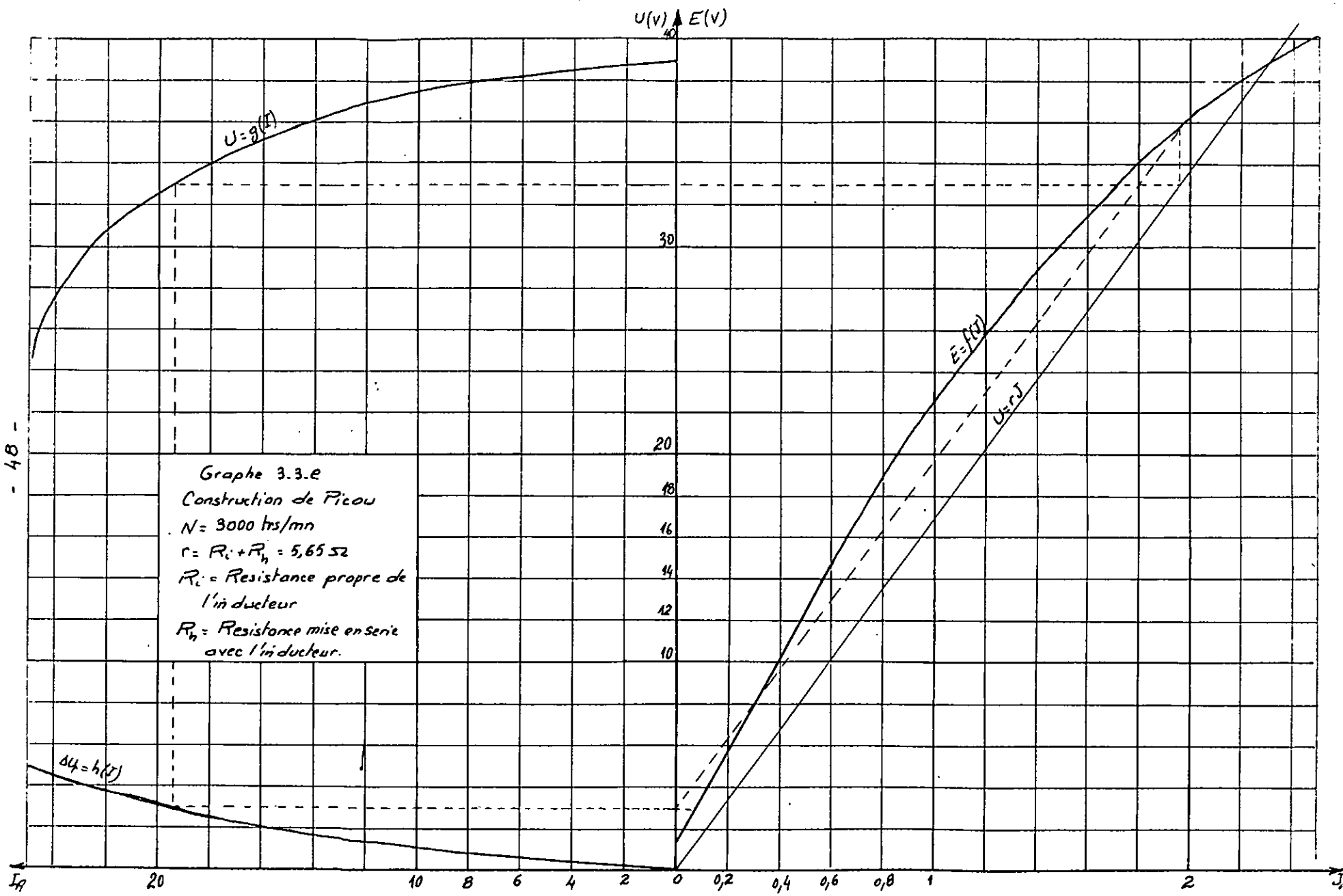
0

1

2

(A)





	14,0	16,0	18,0	20,0	22,0	24,0	25,0
(1)	11,4	11,0	10,5	9,9	9,3	8,55	7,0
	1,6	2,0	2,5	3,1	3,7	4,45	5,0

A partir de ces deux tableaux et par construction de Picoou (voir graphes 3-3-a, 3-3-d et 3-3-e) nous avons déduit la tension en charge de la dynamo montée en shunt aux trois vitesses de rotation; Le tableau ci-dessous donne ces caractéristiques.

N = 1000 trs/mn		N = 2000 trs/mn		N = 3000 trs/mn	
Débit (A)	Tension (V)	Débit (A)	Tension (V)	Débit (A)	Tension (V)
10,0	13,0	0,0	26,0	0,0	39,0
0,217	12,5	4,5	25,0	5,5	38,0
4,750	12,0	8,8	24,0	10,6	37,0
7,0	11,5	11,6	23,0	13,5	36,0
9,0	11,0	14,0	22,0	15,8	35,0
10,5	10,5	16,0	21,0	17,6	34,0
11,7	10,0	17,5	20,0	19,0	33,0
12,5	9,5	18,8	19,0	20,5	32,0
13,3	9,0	19,9	18,0	21,6	31,0

III.3. DIMENSIONNEMENT ET CHOIX DES PALES:

III.3-1. Diamètre, largeur et nombre de pales:

La vitesse nominale du vent est : $V_n = 3$ m/s. Par pos-

sibilité de construction, nous avons adopté un diamètre de 3 m, soit 1,5 m par pale.

La vitesse de rotation des pales est imposée par la dynamo qui ne débite correctement qu'à partir de 1000 trs/mn.

En imposant un multiplicateur de rapport 6, la vitesse de rotation des pales est: $N = 1000/6$ trs/mn.

La vitesse périphérique sera donc:

$$U = \pi D.N/60 = \pi \times 3 \times 1000/60 \times 6 = 26,17 \text{ m/s}$$

Le rapport $U/V_n = 26,17/3 = 8,72$ nous amène à prendre 2 pales pour avoir un pourcentage sur la limite de Betz acceptable. Finalement nous adopterons trois pales pour faciliter l'équilibrage et pour augmenter le couple au démarrage.

La largeur des pales est donnée par l'inégalité:

$$D/25 \leq Y \leq D/12 \quad \text{soit} \quad 12 \text{ cm} \leq Y \leq 15 \text{ cm}$$

III.3.2. Choix du profil aérodynamique

Le profil aérodynamique est choisi de façon à récupérer le maximum de puissance.

La puissance récupérée par une tranche de pale, située à une distance y du centre de rotation (cf CH.2)

$$dP_u = \frac{\rho}{2} (C_z \sin \beta - C_x \cos \beta) (V^2 + y^2 \omega^2) y ds$$

La puissance fournie par le vent est:

$$dP_f = \frac{\rho}{2} (C_z \cos \beta + C_x \sin \beta) (V^2 + y^2 \omega^2) y ds$$

où: $ds = Y dr$. Y étant la corde de la pale,

en appelant la distance de la tranche de pale au centre de rotation r et en remplaçant ds par sa valeur, les expressions précédente deviennent :

$$dP_u = \frac{\rho Y \omega}{2} (C_z \sin \beta - C_x \cos \beta) (V^2 + r^2 \omega^2) r dr$$

$$dP_f = \frac{\rho Y \omega}{2} (C_z \cos \beta + C_x \sin \beta) (V^2 + r^2 \omega^2) r dr$$

Pour la pôle entière de longueur R (rayon de l'hélice)
nous avons:

$$P_u = \frac{\rho w V}{2} \int_0^R (C_z \sin \beta + C_x \cos \beta) (V^2 + r^2 w^2) r dr$$

$$P_f = \frac{\rho w V}{2} \int_0^R (C_z \cos \beta + C_x \sin \beta) (V^2 + r^2 w^2) r dr$$

Le rendement d'une pôle est:

$$\eta = \frac{P_u}{P_f}$$

Le calcul des deux puissances ne peut se faire par calcul mathématique, car les termes C_x et C_z ne se prêtent pas à une expression mathématique simple. Ils sont donnés pour chaque profil aérodynamique par une courbe déterminée expérimentalement en soufflerie, en fonction de l'angle d'incidence.

La détermination de ces deux intégrales peut se faire soit par des essais en soufflerie soit par calcul approché sur ordinateur. La première solution n'étant pas possible pour nous, nous avons fait un programme pour le calcul par ordinateur, pour quatre profils, à différentes valeurs de la vitesse du vent et de l'angle de calage.

Les profils retenus pour le calcul sont des profils d'ailes d'avion : N.A.C.A. 0012; N.A.C.A. 0015, N.A.C.A. 4409 et N.A.C.A. 4412. (Voir fig. 3-4-a et 3-4-b)

LES DEUX PREMIERS SONT DES PROFILS SYMÉTRIQUES.

Le calcul que nous avons fait n'a pas porté sur toute la longueur de la pôle, mais sur les 2/3 à partir de la périphérie, car les valeurs de C_x et de C_z ne sont données que pour des incidences allant de (-3) à (+20) degrés.

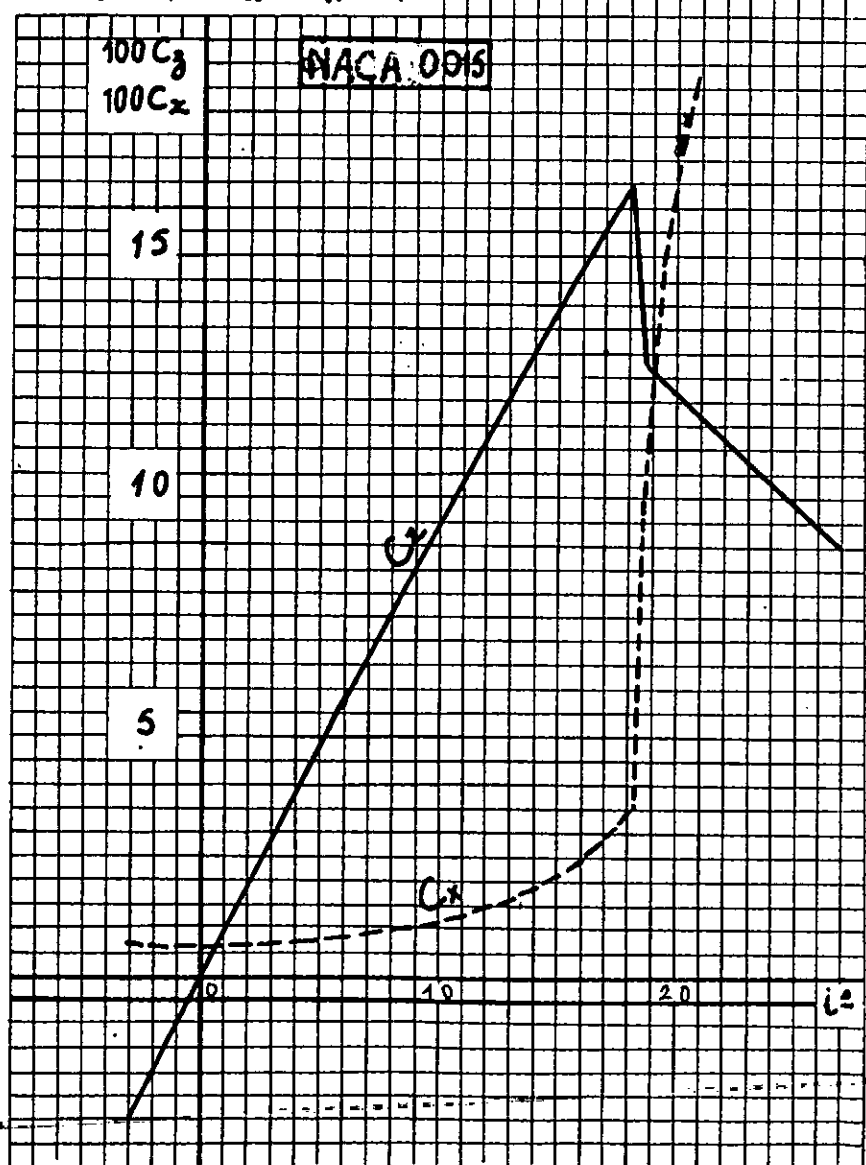
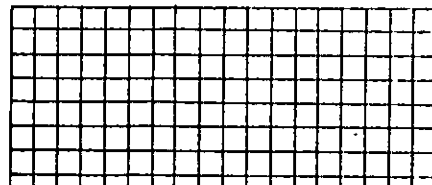
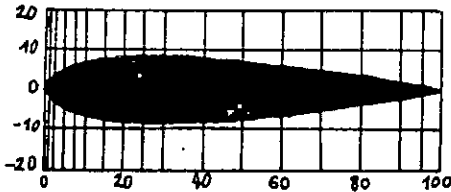
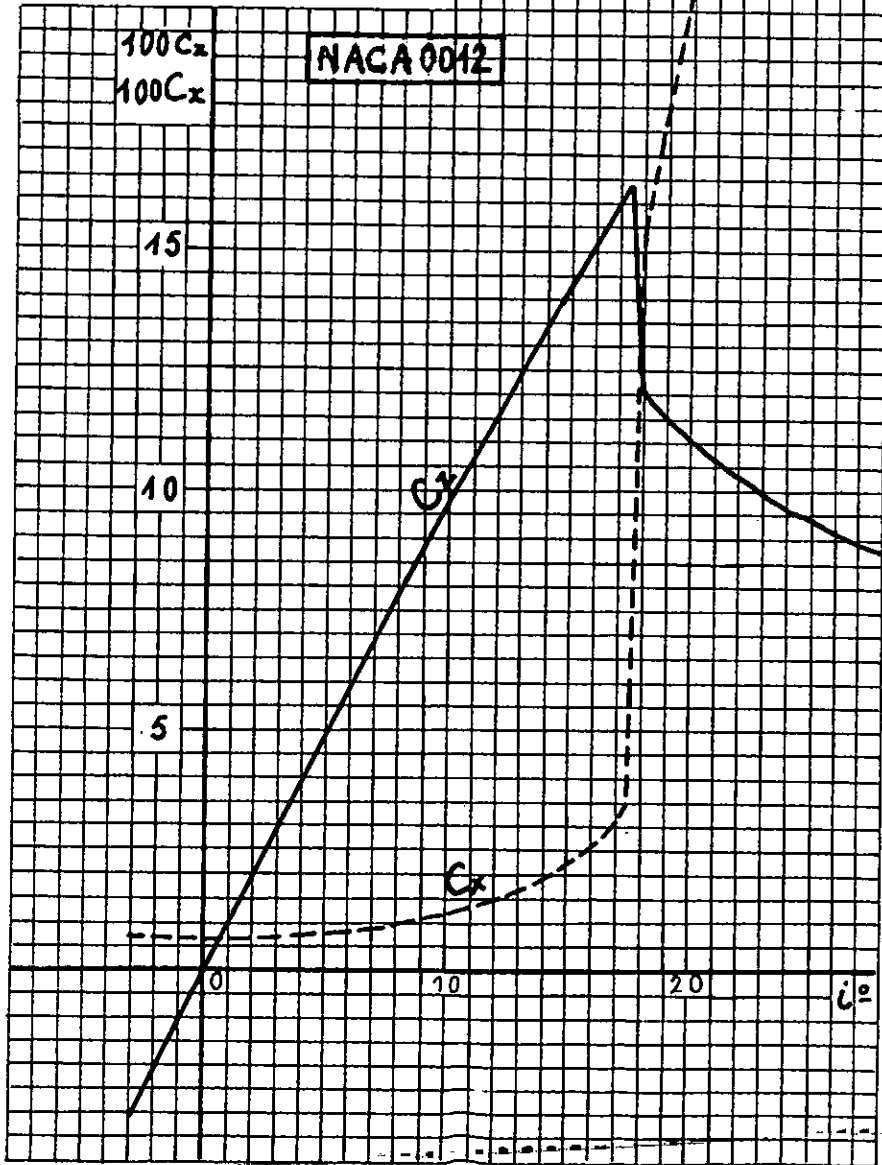
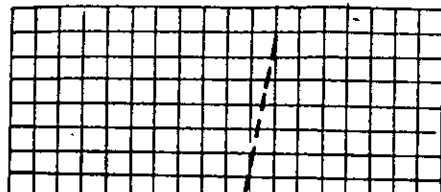
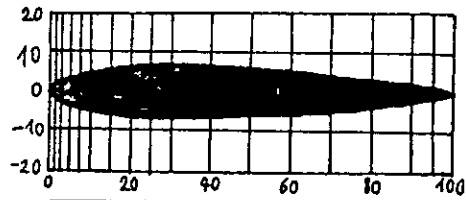


fig. 3.4.a

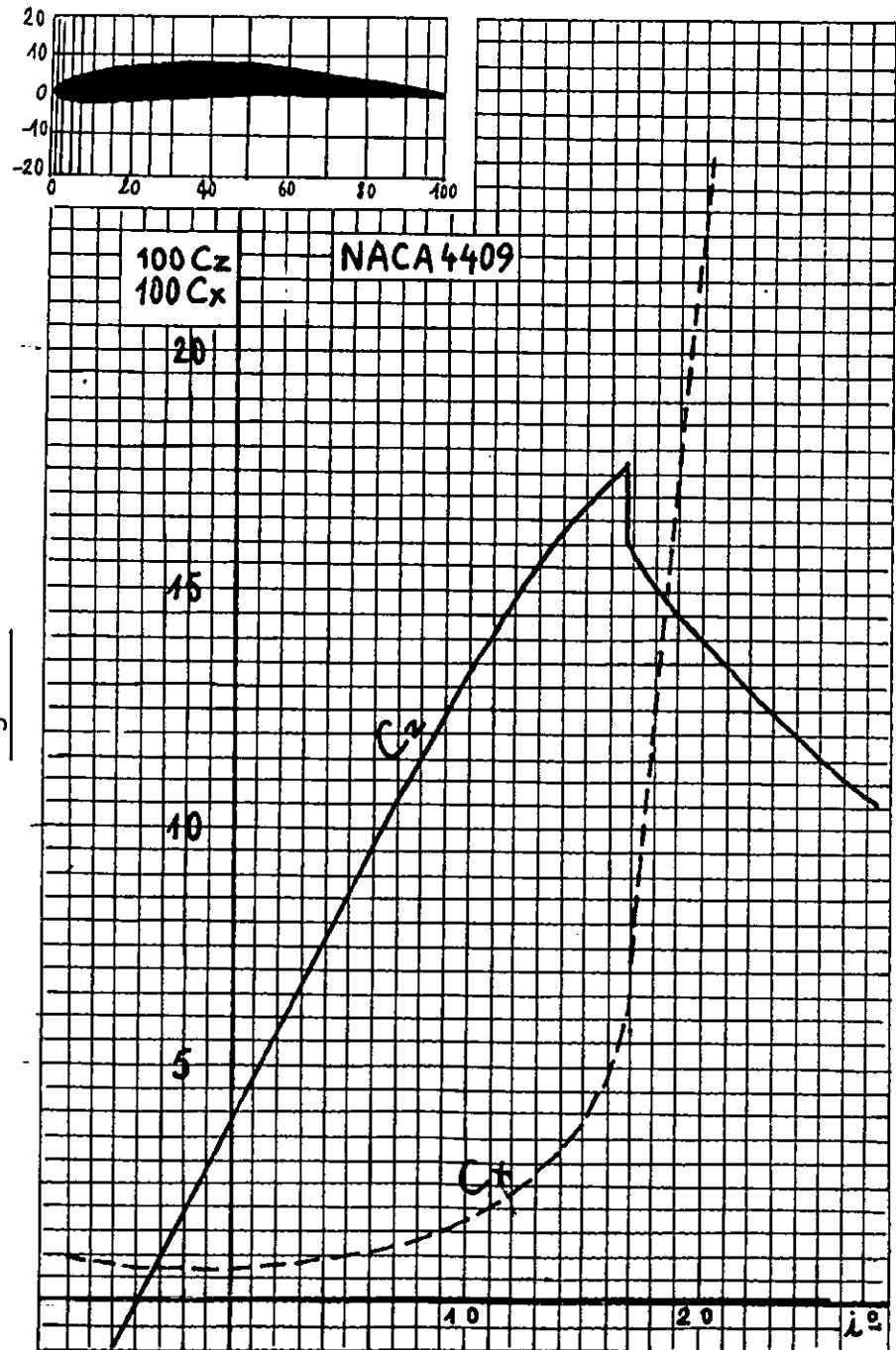
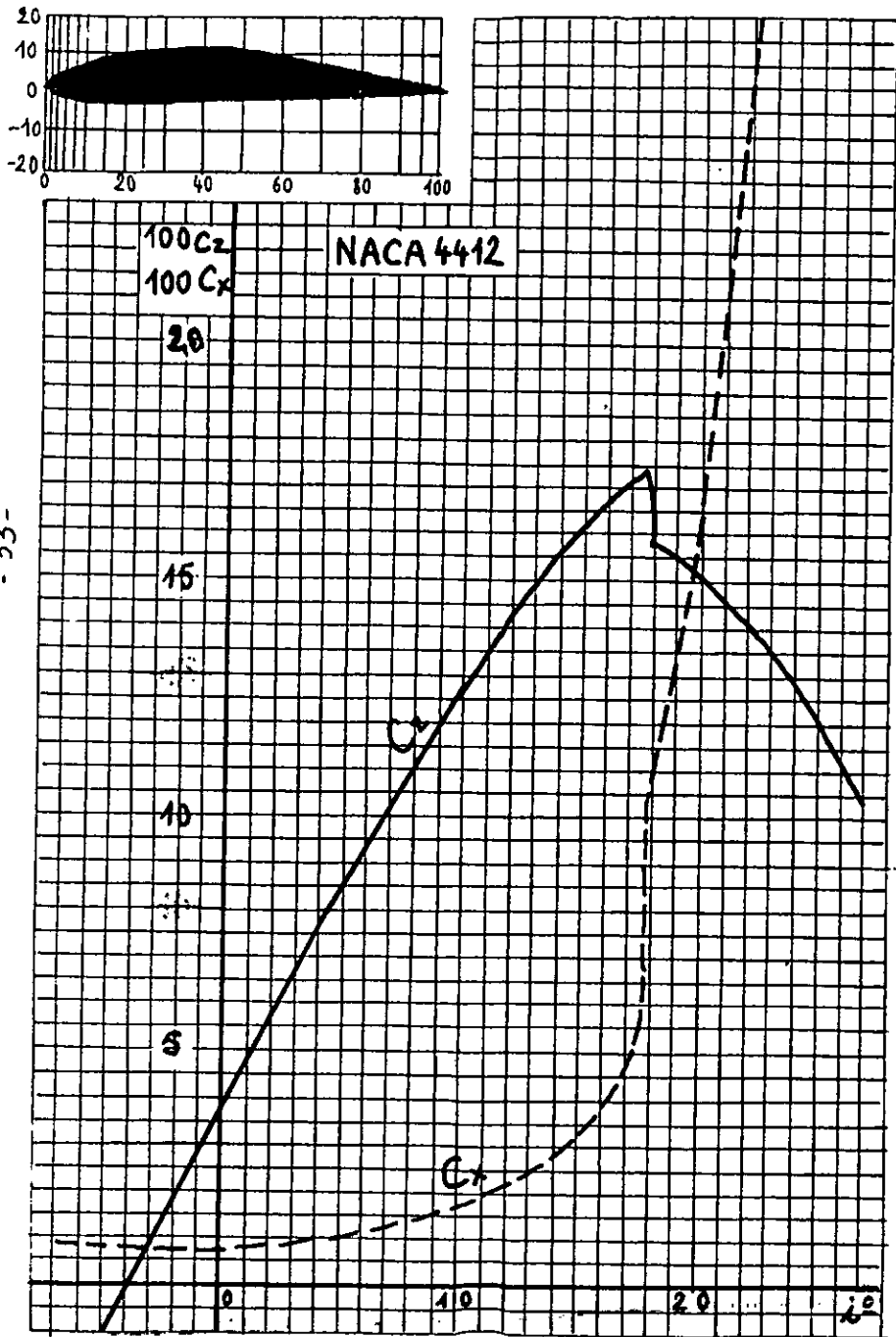
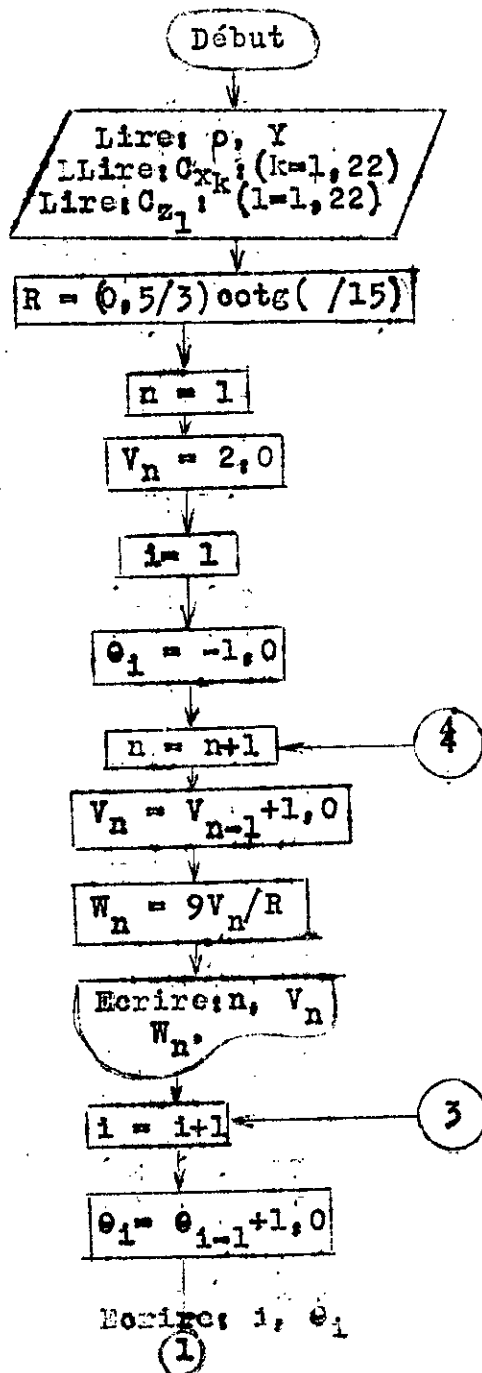


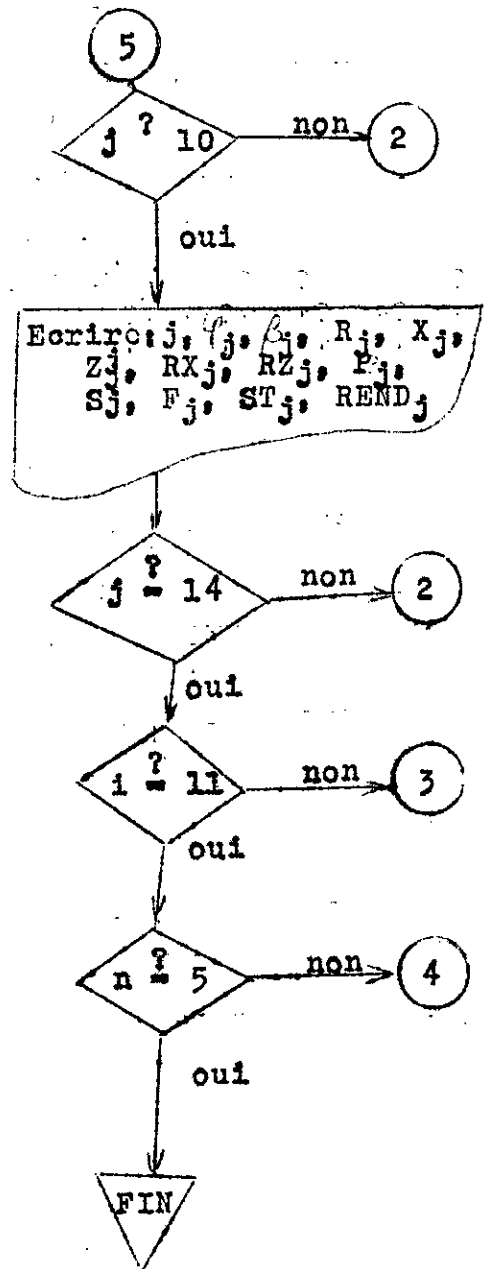
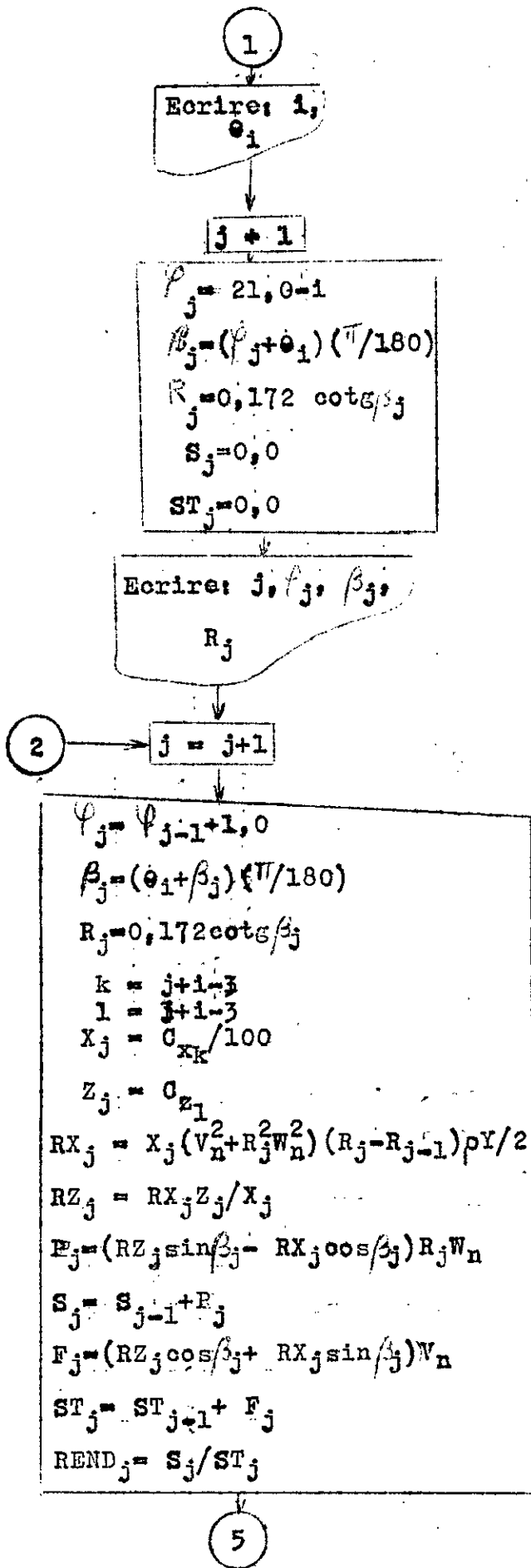
fig. 3.46

L'insertion de tous les résultats du programme occuperait beaucoup de place et sont d'une lecture fastidieuse. Ils sont présentés ici par les tableaux N°3-3-a, 3-3-b, 3-3-c et 3-3-d.

Toutefois, les personnes intéressées trouveront ci-dessous l'organigramme et sa traduction en fortran.

ORGANIGRAMME





- 56 -

```

*****
* PROGRAMME          FORTRAN *
*****

```

```

DIMENSION CX(25),CZ(25),V(10),TET(15),PHI(15),BET(15),R(15),
1 1X(15),Z(15),RX(15),RZ(15),P(15),S(15),F(15),ST(15),W(10),REND(15)
100 FORMAT(2(1X,F4.2))
101 FORMAT(1X,F4.1,15(1X,F4.2),/,6(1X,F4.2))
102 FORMAT(13(1X,F5.3),/,6(1X,F5.3),3(1X,F6.3))
103 FORMAT(30X,24(1H*))
104 FORMAT(30X,24H* PROFIL N.A.C.A. .... *)
105 FORMAT(/,16X,2HI=,I2,8X,6HBETTA=,F2.0)
106 FORMAT(/,8X,1HJ,6X,3HPHI,6X,5HBETTA,8X,1HR)
107 FORMAT(/,7X,I2,5X,F4.0,5X,F6.4,5X,F6.4)
108 FORMAT(/,5X,1HJ,4X,3HPHI,5X,5HBETTA,7X,2HCX,8X,2HCZ,8X,1HR,7X,
13HDRX,6X,3HDRZ,6X,2HDP,7X,1HS,7X,2HDF,7X,2HSR,5X,4HREND)
109 FORMAT(I6,F7.0,4F10.4,7F9.3)
110 FORMAT(/,16X,2HN=,I2,8X,2HV=,F2.0,6X,4HOME=,F6.3)

READ(2,100)RO,Y
READ(2,101)(CX(K),K=1,22,1)
READ(2,102)(CZ(L),L=1,22,1)
PSI=0.11/1.05
RD=(COS(PSI)/SIN(PSI))*(1.5/9.0)
WRITE(3,103)
WRITE(3,104)
WRITE(3,103)

N=1
V(N)=2.0
I=1
TET(I)=-1.0
DO3ON=2,5,1
V(N)=V(N-1)+1.0
W(N)=(V(N)/RD)*9.0
WRITE(3,110)N,V(N),W(N)
DO 10 I=2,11,1
TET(I)=TET(I-1)+1.0
WRITE(3,105)I,TET(I)

J=1

```

```
PHI(J)=21,0-I
BET(J)=(PHI(J)+TET(I))*(0,11/6,3)
R(J)=(COS(BET(J))/SIN(BET(J)))*0,172
S(J)=0,0
ST(J)=0,0
WRITE(3,106)
WRITE(3,107)J,PHI(J),BET(J),R(J)
WRITE(3,108)
DO 20 J=2,14,1
PHI(J)=PHI(J-1)-1,0
BET(J)=(PHI(J)+TET(I))*(0,11/6,3)
K=J+I-3
X(J)=CX(K)/100,
L=J+I-3
Z(J)=CZ(L)
R(J)=(COS(BET(J))/SIN(BET(J)))*0,172
RX(J)=X(J)*V(N)**2+(R(J)*W(N))**2**R(J)-R(J-1))*RO*Y/2
RZ(J)=RX(J)*Z(J)/X(J)
P(J)=(RZ(J)*SIN(BET(J))-RX(J)*COS(BET(J)))*R(J)*W(N)
S(J)=S(J-1)+P(J)
F(J)=(RZ(J)*COS(BET(J))+RX(J)*SIN(BET(J)))*V(N)
ST(J)=ST(J-1)+F(J)
REND(J)=S(J)/ST(J)
IF(J-10)20,15,15
15WRITE(3,109)J,PHI(J),BET(J),X(J),Z(J),R(J),RX(J),RZ(J),
1P(J),S(J),F(J),ST(J),REND(J)
GO TO 20
20 CONTINUE
10 CONTINUE
30 CONTINUE
```

F I N

TABLEAU N° 3-3-a

Résultats du programme Fortran pour les profils : N.A.C.A.0012 et 0015

PROFIL N.A.C.A. 0012

θ (°)	REND	Valeurs de la puissance utile en watts pour les différentes vitesses du vent			
		V = 3 m/s	V = 4 m/s	V = 5 m/s	V = 6 m/s
0	0,025	5,552	13,161	25,705	44,418
1	0,011	2,222	5,268	10,290	17,782
2	-0,060	-9,964	-23,620	-46,133	-79,780
3	-0,173	-23,878	-56,599	-110,546	-191,024
4	-0,353	-38,757	-91,869	-179,433	-310,061
5	-0,724	-59,312	-140,592	-274,594	-474,498
6	-1,528	-82,611	-195,819	-382,459	-660,890
7	-4,095	-107,422	-259,632	-497,328	-859,382
8	83,442	-133,096	-315,487	-616,186	-1064,770
9	5,416	-159,292	-377,581	-737,404	-1274,338

PROFIL N.A.C.A. 0015

θ (°)	REND	Valeurs de la puissance utile en watts pour les différentes vitesses du vent			
		V = 3 m/s	V = 4 m/s	V = 5 m/s	V = 6 m/s
0	0,031	6,700	15,881	21,019	53,601
1	-0,015	-2,885	-6,839	-13,357	-23,081
2	-0,081	-13,169	-31,217	-60,970	-105,353
3	-0,202	-27,052	-64,124	-125,243	-216,420
4	-0,380	-40,772	-96,647	-188,763	-326,183
5	-0,756	-60,685	-143,846	-280,930	-485,482
6	-1,578	-83,564	-198,079	-386,873	-668,518
7	61,246	-108,075	-256,179	-500,350	-864,605
8	62,752	-133,555	-316,577	-618,314	-1068,447
9	5,539	-164,653	-390,290	-762,287	-1317,231

TABIEAU N° 3-3-b

Résultats du programme Fortran des profils:
N.A.C.A. 4409 et N.A.C.A. 4412

PROFIL N.A.C.A. 4409

e (°)	REND	Valeurs de la puissance utile en watts pour les différentes vitesses du vent			
		V = 3 m/s	V = 4 m/s	V = 5 m/s	V = 6 m/s
0	0,063	20,170	47,812	93,384	161,567
1	0,128	37,537	88,978	173,785	300,301
2	0,128	34,068	80,754	157,723	272,545
3	0,131	31,495	74,656	145,812	251,964
4	0,106	22,781	54,001	105,471	182,254
5	0,058	10,983	26,035	50,858	87,871
6	-0,003	-0,493	-1,170	-2,285	-3,949
7	-0,198	-24,610	-58,336	-113,937	-196,883
8	-0,437	-44,639	-105,790	-206,621	-347,042
9	-0,939	-72,498	-171,848	-335,641	-579,988

PROFIL N.A.C.A. 4412

e (°)	REND	PUISSANCE UTILE EN WATTS			
		V = 3 m/s	V = 4 m/s	V = 5 m/s	V = 6 m/s
0	0,039	12,593	29,852	58,305	100,751
1	0,080	23,447	55,579	108,552	264,881
2	0,085	22,740	53,902	105,278	181,921
3	0,063	15,358	36,407	71,107n	122,874
4	0,053	11,594	27,482	53,677	92,753
5	0,0111	2,198	5,212	10,179	17,590
6	-0,061	-10,109	-23,964	-46,805	-80,879
7	-0,213	-29,062	-68,888	-134,546	-232,496
8	-0,471	-51,363	-121,749	-237,791	-410,904
9	-0,926	-75,492	-178,945	-349,502	-603,939

Interprétation des résultats:

Nous constatons que pour un profil donné, le rapport REND (ou rendement de la pale) ne dépend pas de la vitesse du vent mais uniquement de l'angle de calage θ .

Ceci est normal, car le rendement d'une tranche de pale ne dépend pas de la vitesse du vent, comme le montre la formule:

$$r = (1 - (f/tg\beta)) / (1 + ftg\beta)$$

Les valeurs négatives de la puissance (de S) utile indiquent que la pale tourne dans le sens contraire à celui qui est prévu par la formule. Donc ces valeurs sont à rejeter.

Les profils symétriques n'offrent guère de possibilité d'utilisation pour la construction d'éolienne.

Le profil N.A.C.A. 4412 est moins performant que le N.A.C.A. 4409 qui doit être retenu.

III-3-3 CALCUL DE LA PALE A LA RESISTANCE ET DE LA VITESSE

CRITIQUE DU VENT:

III-3-3-1 Description de la pale et du système de fixation:

La pale et ses accessoires sont représentés à la figure (fig. 3-5)

Faute de moyens, et de matière chaque pale a été faite en trois morceaux de 0,5 mètre chacun, reliés entre eux par 16 vis M6 en bronze. La matière est la tôle en acier laminé de 1,2 mm d'épaisseur. Chaque pale est reliée au rotor par un axe de diamètre 25 mm qui assure le réglage manuel de l'angle de calage. Trois boulons $\varnothing 8$ en acier et 2 boulons $\varnothing 12$ en acier assure la liaison entre cet axe et la pale.

Une pale pèse 5 kg, la résistance à la traction de l'acier utilisé est de 30 daN/mm². Sa résistance au cisaillement est: 15 daN/mm². La résistance au cisaillement du bronze: 3 daN/mm².

III.3.3.2. Vitesse critique:

a) LA PALE SUPPOSEE CONTINUE:

La pale est soumise à une traction due à la force centrifuge et à une flexion due à la traînée du vent.

Dans une section droite de la pale située à une distance x de l'axe de rotation, l'effort de traction s'écrit:

$$N(x) = \int_x^R m w^2 x dx = m w^2 (R^2 - x^2) / 2$$

m = masse linéaire de la pale.

w = vitesse angulaire de la pale,

R = longueur de la pale.

La traînée exercée sur les trois pales est:

$$F = C_x \rho V^2 S / 2$$

C_x = coefficient de traînée maximum.

ρ = masse volumique de l'air.

V = vitesse du vent.

S = surface balayée par les pales.

Si nous considérons que cette force est répartie uniformément sur la longueur des pales, la charge par longueur de pale sera donc:

$$q = F / 3R \quad \text{en N/m}$$

D'où le moment fléchissant:

$$M(x) = \int_x^R q x dx = q (R^2 - x^2) / 2 = F (R^2 - x^2) / 6R$$

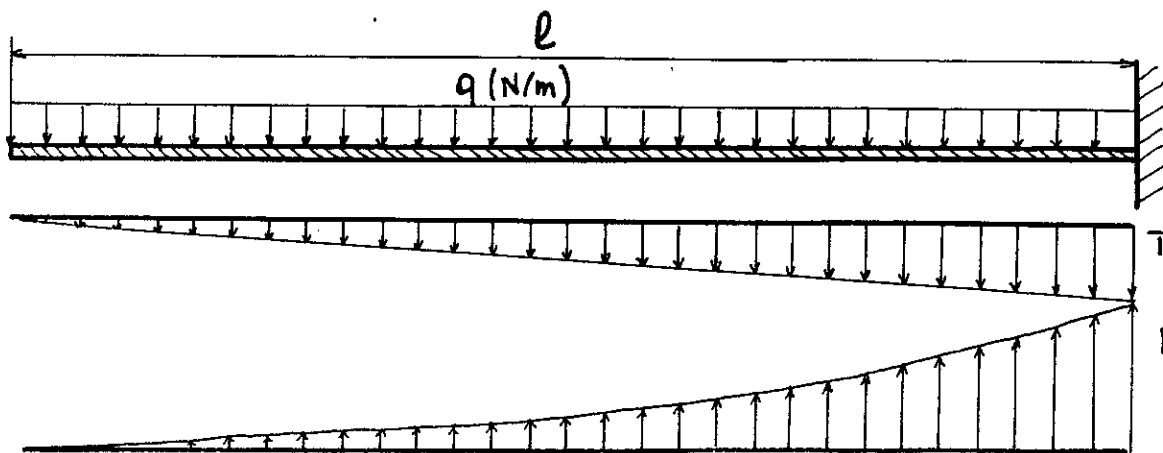
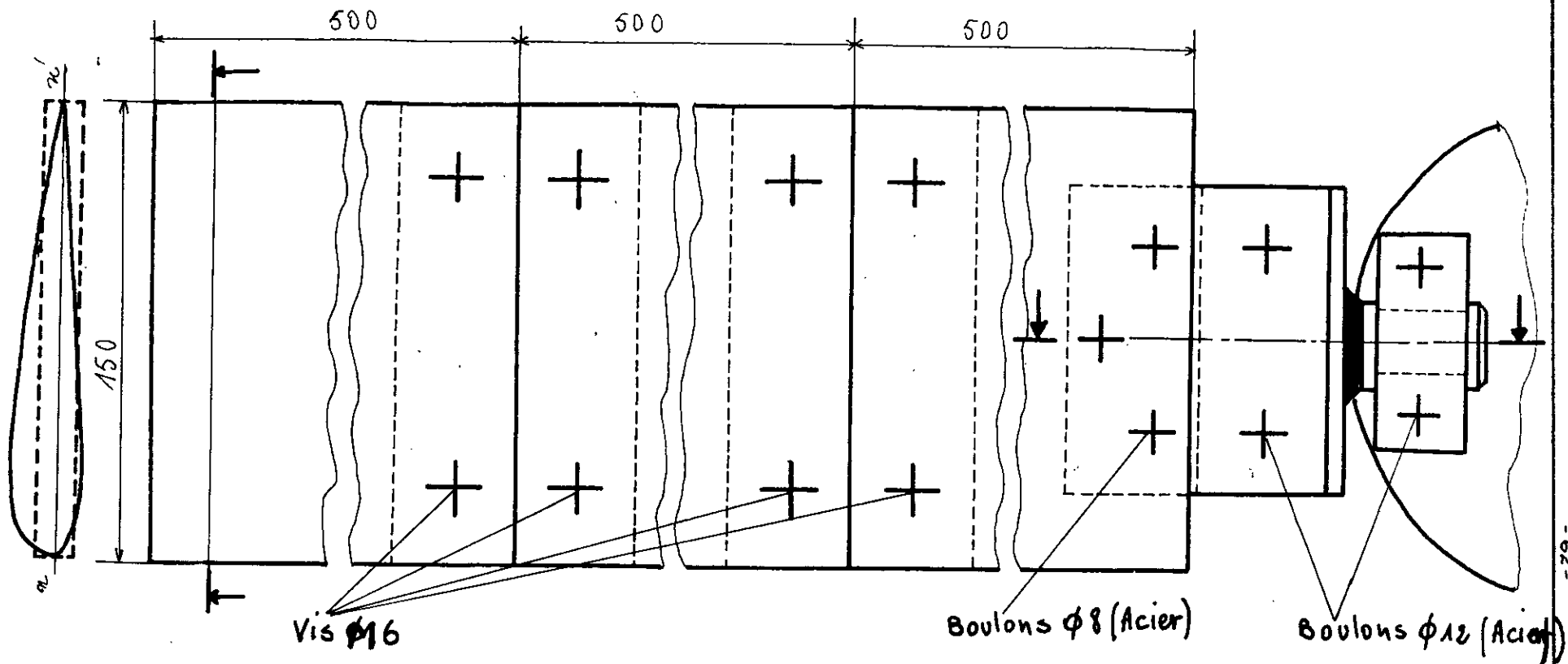
La condition de résistance de la tôle s'écrit:

$$\frac{N}{S_0} + \frac{M_f}{(I/v)} \leq \sigma_t$$

La section dangereuse se trouve en $x = 0$. Sachant que :

$$U/V = (Rw/V) = 9, \text{ nous trouvons:}$$

$$N(0) = 81 m V^2 / 2 \quad \text{et} \quad M_f(0) = \pi C_x \rho V^2 R^3 / 12$$



$$T_{\max} = q \cdot l \text{ (N)}$$

$$M_{f \max} = \frac{q l^2}{2} \text{ (N} \cdot \text{m)}$$

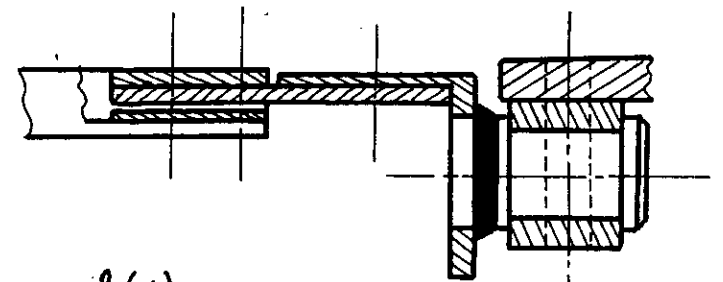


fig. 3-5

d'où: $81mV^2/2S + \pi \sigma_x \rho V^2 R^3 / (I/v) \times 12 \leq \sigma_t$

$$V \leq \sqrt{\frac{\sigma_t}{\frac{81m}{2S} + \frac{\pi \sigma_x \rho R^3 v}{12I}}}$$

Pour le calcul à la flexion, nous avons considéré que la pàle a une section droite creuse et rectangulaire, représentée en pointillé sur la figure 3.5.

Nous avons:

$I = 9000 \text{ mm}^4$	$m = 10/3 \text{ Kg/m}$	$R = 1,5 \text{ m}$
$S = 310 \text{ mm}^2$	$\rho = 1,229 \text{ Kg/m}^3$	$\sigma_x = 0,3$
$v = 6 \text{ mm}$	$\sigma_t = 300 \text{ N/mm}^2$	

d'où l'on trouve une vitesse critique:

$$V_{cr} = 21 \text{ m/s}$$

b) Axe assurant le réglage du calage.

L'axe qui assure le réglage de l'angle de calage est soumis aux mêmes contraintes que la pàle.

On a: $I/v = \pi d^3/64$ et $S = \pi d^2/4$ avec $d = 25 \text{ mm}$

En appliquant la formule précédente on trouve:

$$V \leq 20,7 \text{ m/s}$$

c) Les vis de bronze:

Les vis de bronze sont soumises à un effort de cisaillement maximum, à la distance $x = 0,5 \text{ m}$.

d'où nous avons:

$$N(0,5) = 81mV^2(R^2 - 0,25)/2R^2$$

La condition de résistance s'écrit:

$$\frac{N(0,5)}{S} \leq \sigma_{cis} \quad \text{avec} \quad S = \frac{8\pi d^2}{4} = 2 \times 25 \times 3,14 \text{ mm}^2$$

avec $\sigma_{cis} = 30 \text{ N/mm}^2$

Nous trouvons : $V \leq 6 \text{ m/s}$

d) Les boulons:

Les boulons sont soumis à l'effort normale $N(0)$.

Les vitesses critiques sont:

$V \leq 8,1 \text{ m/s}$ pour les trois boulons $\phi 8$.

$V \leq 10,0 \text{ m/s}$ pour les deux boulons $\phi 12$.

En conclusion, la vitesse du vent admissible est $V = 6 \text{ m/s}$.

III.4. CALCUL DU MULTIPLICATEUR DE VITESSE:

En réalité dans ce calcul nous partirons des caractéristiques des roues dont nous disposons et nous vérifierons leurs résistances.

III.4.1- Calcul de la résistance pratique R_{pe} :

Nous disposons d'une roue et d'un pignon dont les caractéristiques sont les suivantes:

- Roue: Nombre de dents: $Z = 123$ dents

Diamètre de tête: $D_t = 218,75 \text{ mm}$

Largeur de la denture: $l = 12,25 \text{ mm}$

- Pignon: Nombre de dents: $Z_1 = 20$ dents

Diamètre de tête: $D_{t1} = 38,5 \text{ mm}$

Largeur de la denture: $l = 12,25 \text{ mm}$

a) Calcul des diamètres primitifs et du coefficient de

la largeur des dents:

- Diamètres primitifs:

Nous avons:

$$D_p = D_t + 2M \quad \text{et} \quad D_{p1} = ZM$$

où M est le module de la denture, D_p est le diamètre primitif et D_t le diamètre de tête.

Pour la roue nous tirons:

$$M = D_p / (Z + 2) = 218,75 / 125 = 1,75 \text{ mm}$$

Et par suite les diamètres primitifs sont:

pour la roue: $D_p = 123 \times 1,75 = 215,25 \text{ mm}$

pour le pignon: $D_{p1} = 20 \times 1,75 = 35 \text{ mm}$

Coefficient de largeur de la denture:

Nous avons: $l = kM$ où: l est la largeur de la denture et k est le coefficient de la largeur de denture;

D'où on tire: $k = l/M$

car avec $l = 12,25 \text{ mm}$ et $M = 1,75 \text{ mm}$

On trouve $k = 7$

b) Calcul de la résistance pratique:

La vitesse critique du vent à ne pas dépasser est:

$$V = 6 \text{ m/s.}$$

Nous avons: $U/V = 9$ où U est la vitesse périphérique de l'hélice.

Nous avons adopté une hélice de 3 mètres de diamètre;

Sa vitesse angulaire sera donc:

$$\omega = U/R = 9V/R = 6 \times 9 / 1,5$$

$$\omega = 36 \text{ rds/s}$$

A la vitesse du vent de 6 m/s les pales récupèrent une puissance de: $P = 0,37SV^3$ où S est la surface balayée;

D'où: $P = 0,37 \times 3,14 \times 1,5^2 \times 6^3 = 564,92 \text{ watts.}$

En prenant 60% sur la limite de Betz nous avons:

$$P = 0,6 \times 564,92 = 338,95 \text{ W/}$$

Vitesse de rotation de la roue:

La roue est directement couplée à l'hélice par l'intermédiaire d'un arbre, sa vitesse angulaire est donc la même que celle de cette dernière: $\omega = 36 \text{ rds/s.}$

sa vitesse de rotation sera:

$$N = 36/2 = 5,73 \text{ trs/s}$$

La vitesse de rotation du pignon est:

$$N_1 = N \cdot Z/Z_1 = 5,73 \times 123/20 = 35,24 \text{ trs/s}$$

Le couple sur la roue est:

$$C_m = P/W = 338,92/36 = 9,41 \text{ Nm}$$

En admettant un rendement du multiplicateur de 0,85, la force tangentielle sur le pignon sera de:

$$F_t = 0,85 C_m / R_p \quad \text{où } R_p \text{ est le rayon primitif de la roue.}$$

d'où:

$$F_t = 0,85 \times 2 \times 9,41 / 215,25 \times 10^{-3} = 74,318 \text{ N}$$

Le couple sur le pignon est:

$$C_{m1} = F_t \cdot R_{p1} = 74,318 \times 35 \times 10^{-3} / 2 = 1,301 \text{ Nm}$$

$$\text{ou encore: } C_{m1} = 1301,2 \text{ Nmm}$$

La formule de Lewis nous donne:

$$M \geq \sqrt[3]{\frac{2C_{m1}}{kR_{p0}^3 Z_1 Y}}$$

où: $k = 7$ coefficient de largeur de la denture.

$M = 1,75$ mm module de la denture.

$C_{m1} = 1301,2$ Nmm couple sur le pignon.

$Z_1 = 20$ dents

$Y = 0,154 - \frac{1,12}{20} = 0,094$ coefficient caractérisant l'épaisseur à la base de la dent.

D'où

$$R_{p0} \geq \sqrt[3]{\frac{2C_{m1}}{kM^3 Z_1 Y}}$$

L'application numérique nous donne:

$$R_{p0} \geq 11,75 \text{ N/mm}^2$$

Les roues dont nous disposons sont en acier demi-dure dont la résistance pratique est de: $140 \text{ N/mm}^2 > 11,75 \text{ N/mm}^2$

III.4.2. Influence de l'usure:

Le coefficient d'usure se calcule d'après la formule empirique:

$$U = \frac{F_t N_1}{k M^2 \cos \varphi}$$

Où N_1 est la vitesse de rotation du pignon en tours par seconde et φ généralement 20 degrés pour la denture droite.

Avec $F_t = 74,318 \text{ N}$; $N_1 = 2114,4 \text{ trs/s}$; $k = 7$ et $M = 1,75 \text{ mm}$ on trouve: $U = 1242,1$

Cette valeur est supérieure à la valeur de U correspondante à l'acier mi-dure qui est de 1100.

III.4.3. Influence de la vitesse:

Le coefficient de sécurité se calcule d'après la formule:

$K = 5(8+V)/8$ où V est la vitesse circonférentielle du pignon en m/s.

On a : $V = 2\pi N_1 R_p$ avec N_1 en trs/s.

$$\text{d'où } V = 2 \times 35,24 \times 3,14 \times 35 \times 10^{-3} = 9,84$$

Il nous faut donc un acier dont la résistance à la rupture est:

$$R_r = R_p K = 11,75 \times 9,84 = 115,61 \text{ N/mm}^2$$

Donc l'acier mi-dure convient pour ce multiplicateur puisque sa résistance est de 140 N/mm².

III.4.4. Calcul de la pression locale:

La pression locale est donnée par la formule:

$$p = 0,6 \sqrt{\frac{F_t \rho^{0,8}}{k M \cos \varphi}}$$

$$\text{où: } \rho = \frac{1}{\sin \varphi} (1/D_p + 1/D_{p1}) = (1/D_p + 1/D_{p1}) / \sin 20$$

$$\rho = (1/215,25 + 1/35) / \sin 20 = 0,097$$

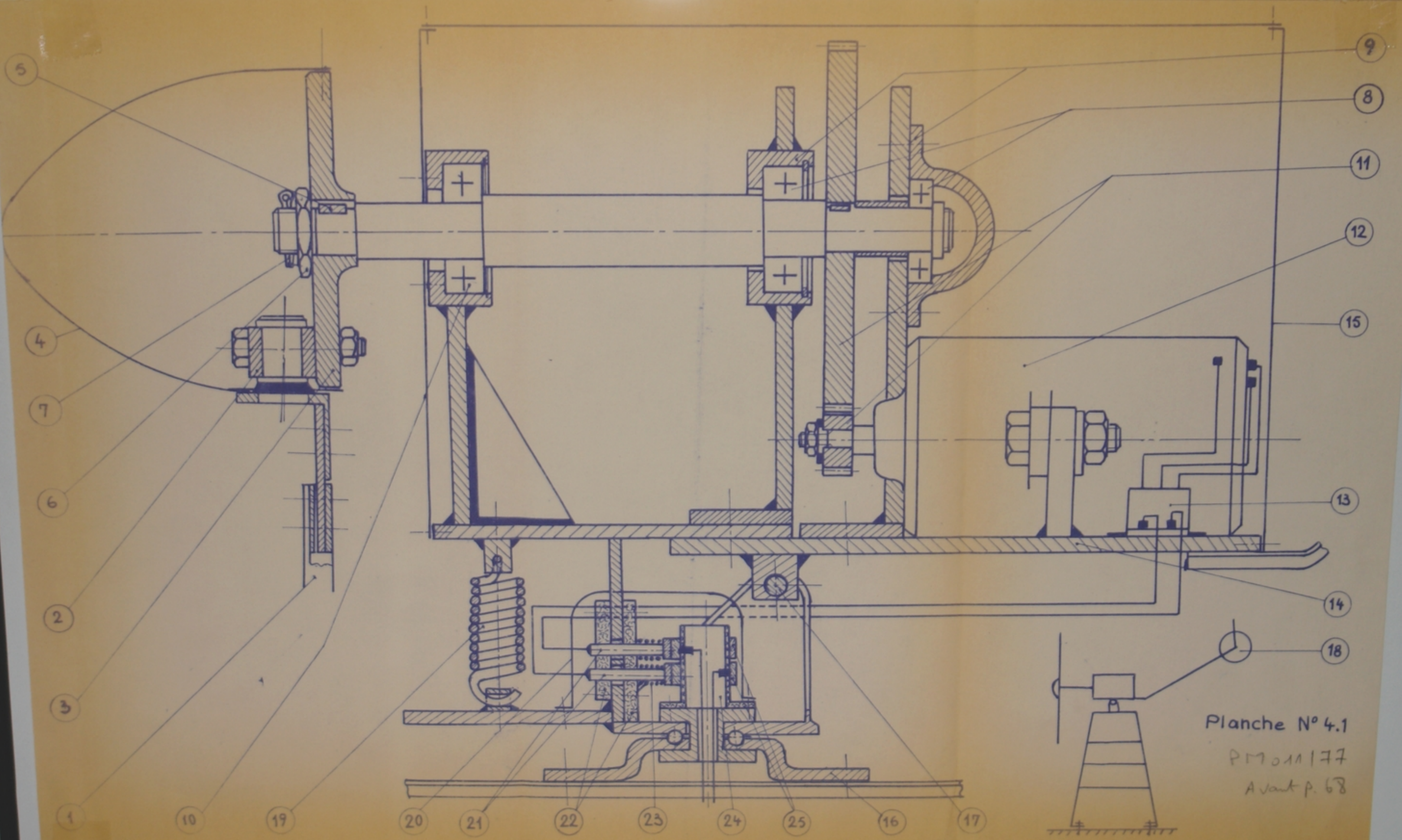
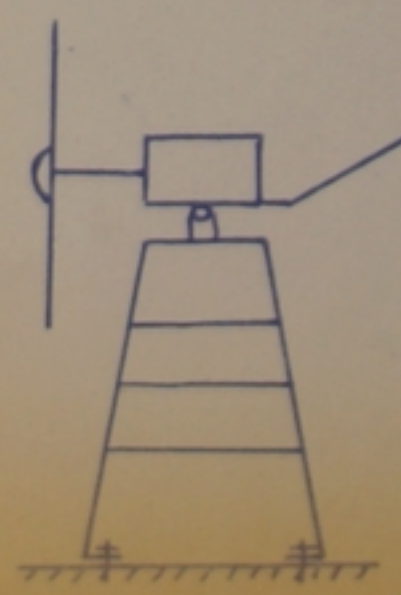


Planche N° 4.1
PM 011177
Avant p. 68



$$\rho^{0,8} = 0,155$$

Et nous avons:

$\alpha = (1/E + 1/E_1)/2$ où E et E_1 sont les modules de Young des matériaux constituant la roue et le pignon.

La roue et le pignon sont tous les deux en acier dont:

$$E = 22 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{d'où nous tirons: } \alpha = 0,045 \times 10^{-4} \text{ mm}^2/\text{N}$$

Avec $F_t = 74,318 \text{ N}$, $k = 7$ et $M = 1,75 \text{ mm}$

Nous trouvons: $p = 200,11 \text{ N}$ à $2114,4 \text{ trs/mn}$.

A 2500 trs/mn : Nous avons

$$p = 200,11 \times 2500 / 2114,4 = 231,96 \text{ NN/mm}^2$$

Cette pression correspond à celle de l'acier A56.

L'influence de la vitesse et de la pression locale présentent des valeurs acceptables pour les engrenages utilisés, mais le facteur d'usure nous impose un ^{acier allié} ~~acier allié~~ qui n'est pas intéressant pour notre cas puisque notre but est de construire un aérogénérateur à partir de matériel de récupération. Néanmoins nous avons conservé les deux engrenages pour 2 raisons: D'une part, nous ne disposons pas de roue et de pignon ayant un rapport acceptable, et d'autre part la vitesse critique sur laquelle nous avons basé nos calculs est très rarement atteinte d'après les statistiques.

Remarquons que pour diminuer le facteur d'usure en conservant le même matériau, il faudrait augmenter le coefficient de largeur de denture k et le module M.

- CHAPITRE IV -

TECHNOLOGIE ET REGULATION

Dans les chapitres précédents, nous avons présenté les différentes parties de l'aérogénérateur, sans donner le montage technologique qui doit assurer un bon fonctionnement de l'ensemble. C'est ce que nous nous proposons de faire dans ce chapitre.

Le dessin d'ensemble est donné par la planche N° 4.1.

Analysons donc chaque élément en détail, en justifiant son emploi et son choix, puisque comme nous l'avons mentionné dans l'introduction, le montage doit être fait avec du matériel récupéré.

La liste du matériel est:

- .. Les pâles
- .. Le rotor
- .. La roue et le pignon du multiplicateur
- .. La dynamo et le régulateur de tension
- .. La butée
- .. Les roulements et leur bague
- .. Une partie des boulons.

IV-1. Montage mécanique:

IV-1.1. Les pâles:

Les pâles (1) doivent être faites en matière légères; bois dur, fibres synthétiques etc...

Ne disposant pas de ce genre de matériaux, nous les avons faites avec des morceaux de tôles de 0,50 m. de longueur, soudés et boulonnés.

Par pliage, nous avons approché le plus possible le profil

théorique choisi.

Leur système de fixation (2) par pincement sur le rotor permet le réglage manuel de l'angle de calage.

IV.1.2. Le rotor:

Il est constitué d'un disque (3) où vient se fixer le système de liaison des pales et d'un chapeau (4) qui assure le bon écoulement de l'air et joue un rôle de carter qui protège l'ensemble des intempéries.

Le rotor est lié à l'arbre de transmission par une clavette (5), un écrou (6) et une goupille (7).

IV.1.3. Le multiplicateur

L'arbre de transmission est soumis à une charge radiale, compensée par les deux roulements (8) montés dans deux bagues (9) qui sont l'une soudée au support du multiplicateur et l'autre fixée par trois vis en bronze. Le roulement (10) placé près du rotor évite le porte-à-faux de l'arbre de transmission.

Le pignon du multiplicateur (11) est lié directement à l'arbre de la dynamo (12). L'ensemble constitué par le multiplicateur, la dynamo et le régulateur de tension (13) est monté sur une plateforme (14) recouverte par un carter (15) en tôle d'aluminium, pour le préserver des intempéries, auxquels il sera soumis.

IV.1.4. Butée à bille:

La butée à bille (16) repose sur le mat et supporte la plateforme de l'ensemble de l'aérogénérateur, à laquelle elle est reliée par un axe (17). Ce dispositif assure l'orientation de l'axe des pales suivant la direction du vent et l'efficacité du plan de rotation dans le lit du vent. Ces mouvements

sont commandés par un gouvernail (18).

Sur la partie mobile viennent se fixer deux plaques soudées l'une verticale servant de support à la plateforme en position normale, l'autre horizontale permettant la fixation du ressort de rappel.

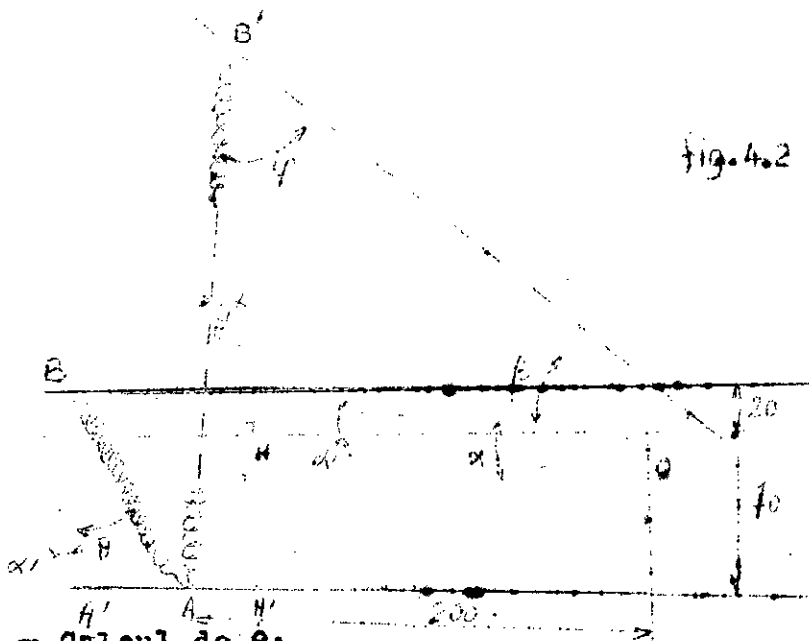
IV.1.5. Ressort et gouvernail

Le gouvernail (18) se compose de deux plaques perpendiculaires verticales. La première en forme circulaire, située dans le plan de l'axe, assure l'orientation des pâles de façon à les mettre face au vent. La seconde, de surface plus petite et de forme elliptique, permet le décrochage en cas de vent très fort.

Le ressort (19) permet de ramener l'axe en position horizontale.

CALCUL DU RESSORT:

a/ Calcul des angle (voir fig. 4.2 ci-dessous)



De la figure on tire :

$$\cos\theta = A'B/AB$$

$$\text{Or } A'B = 20 + 70 = 90 \text{ mm}$$

$$AB = 105 \text{ mm} = \text{longueur du ressort au repos}$$

$$\text{D'où } \theta = \text{Arccos}(90/105) = 31^\circ \text{ (environ)}$$

- Calcul de α' et α :

Nous avons:

$$\sin\alpha' = 20/OB$$

$$\text{et } OB = \sqrt{20^2 + (200 + 105\sin\theta)^2} = 255 \text{ mm}$$

$$\text{D'où } \alpha' = \text{Arcsin}(20/255) = 4,5^\circ$$

En considérant le triangle OAB, nous avons

$$AB^2 = OB^2 + OA^2 - 2OA \cdot OB \cos\alpha$$

$$\text{Or } OB = 255 \text{ mm}$$

$$OA = \sqrt{70^2 + 200^2} = 212 \text{ mm}$$

$$\text{d'où l'on tire } \alpha = \text{Arccos} \frac{212^2 + 255^2 - 105^2}{2 \times 212 \times 255}$$

$$\alpha = 24^\circ$$

- Calcul de β :

Le triangle AOB' nous donne:

$$AB'^2 = OA^2 + OB'^2 - 2OA \cdot OB' \cos(\alpha + \beta)$$

$$AB' = 225 \text{ mm} = \text{longueur maximale du ressort tendu.}$$

$$OB' = OB = 255 \text{ mm}$$

$$OA = 212 \text{ mm}$$

$$\beta = \text{Arc} \frac{212^2 + 255^2 - 225^2}{2 \times 212 \times 255} = 24^\circ = 33^\circ$$

- Calcul de θ' :

Du triangle OHB', on a:

$$B'H = OB' \sin(\alpha' + \beta) = 255 \sin(33^\circ + 4,5^\circ) = 154,98 \text{ mm}$$

d'où nous tirons une force F_0 de:

$$F_0 = 1,22 \times 1,229 \times 0,127 \times 6^2 / 2 = 3,4 \text{ N}$$

2°) Force de traînée sur les pâles F_p

Elle est donnée par la même formule que précédemment:

Pour la valeur du C_x , nous avons pris une valeur moyenne:

$$C_x = 0,15$$

la surface balayée par les pâles est:

$$S = \pi 3^2 / 4 = 7,06 \text{ m}^2$$

Nous trouvons donc une force F_p de 23,5 N.

3°) Force devant équilibrer les deux efforts précédents: F_r

À l'équilibre, l'équation des moments nous donne:

$$OB \cdot F_r = 1130 F_0 + 211 F_p$$

avec $OB = 255 \text{ mm}$

nous trouvons: $F_r = 98,5 \text{ N}$

c/ - Calcul de la contrainte de rotation du ressort à l'équi-

libre: R_t

À l'équilibre, le ressort est soumis à l'effort:

$$P = F_r / \cos(\theta + \alpha) = 34,5 / \cos(32^\circ 4,5') = 42,4 \text{ N}$$

La contrainte de rotation du ressort est donnée par:

$$P = \frac{d^3 \cdot R_t}{5,1r}$$

où: d = diamètre du fil constituant le ressort,

r = rayon moyen de l'enroulement

$$R_t = \frac{5,1P \cdot r}{d^3}$$

Si nous prenons $d = 2 \text{ mm}$ et $r = 15 \text{ mm}$ nous aurons alors:

$$R_t = 405 \text{ N/mm}^2 \quad \text{ou encore} \quad R_t = 40,5 \text{ daN/mm}^2$$

d/ - Nombre de spires:

Le ressort au repos a pour longueur totale: 105 mm.

Si on enlève 2 demi-spire qui servent à la fixation, la longueur de l'enroulement devient:

$$105 - 2r = 105 - 30 = 75 \text{ mm}$$

le nombre de spires est égal au rapport longueur d'enroulement sur diamètre du fil:

$$\text{d'où } n = 75/2 = 32,5 \text{ spires.}$$

d/ Flèche maximale:

Le ressort tendu à son maximum à pour longueur 225 mm.

D'où nous avons une flèche maximale de:

$$f_{\max} = 225 - 105 = 120 \text{ mm}$$

e/ Effort exercé par le ressort tendu à son maximum:

Nous avons la formule:

$$f_{\max} = \frac{64 n \cdot r^3 \cdot P_m}{G \cdot d^4}$$

Pour l'acier à ressort nous avons $G = 8500 \text{ daN/mm}^2$.

$$\text{D'où nous tirons: } P_m = \frac{120 \times 8500 \times 2^4}{64 \times 32,5 \times 15^3}$$

$$P_m = 2,325 \text{ daN}$$

$$\text{ou encore: } P_m = 23,25 \text{ N}$$

f/ Effort du vent assurant l'équilibre après décrochage:

1.) Effort axial sur l'hélice:

Quand le système se met en drapeau, l'effort équilibrant le ressort est uniquement l'effort exercé par le vent sur l'hélice.

L'équation des moments est:

$$211 F_p' = P_m \cos(90^\circ - \varphi) \cdot 0B$$

$$\text{d'où: } F_p' = P_m \cdot 0B \cos(90^\circ - \varphi) / 211$$

$$F_p^* = 22,44 \text{ N}$$

2°) Calcul de l'angle d'incidence du vent:

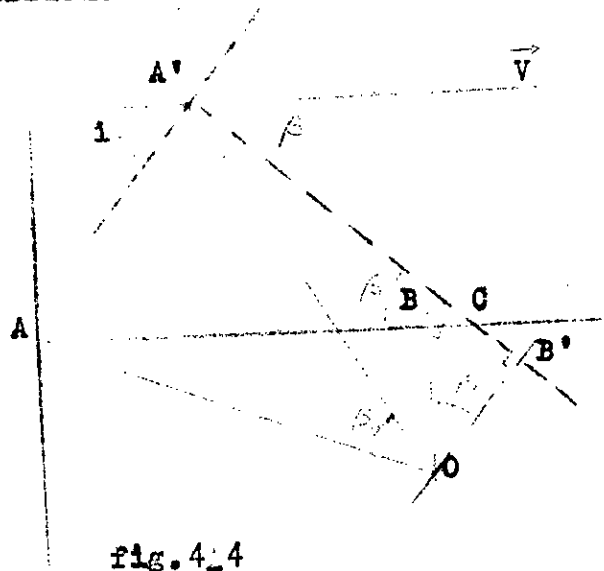


fig. 4.4

Nous avons:

$$\hat{ACA}' = 180^\circ - \hat{BCB}'$$

$$\text{Or } \hat{BCB}' + \hat{B'OB} = \hat{BCB}' + \beta = 180^\circ$$

$$\text{D'où } \hat{ACA}' = 180^\circ - \hat{BCB}' = \beta$$

Les angles \hat{ACA}' et $(\vec{A'C}, \vec{V})$ sont égaux d'après la propriété des angles alternes-internes.

$$\text{D'où } \hat{ACA}' = (\vec{A'C}, \vec{V}) = \beta = 33^\circ$$

Et nous tirons l'angle d'incidence du vent:

$$i = 90^\circ - \beta = 90^\circ - 33^\circ = 57^\circ$$

3°) Vitesse du vent:

L'effort axial du vent sur l'hélioc est: $F_p^* = 22,44 \text{ N}$

D'après la formule:

$F_p^* = C_x \rho S V_a^2$ où V_a est la composante de la vitesse du vent perpendiculaire au plan des pâles.

$$\text{Nous tirons: } V_a = \sqrt{\frac{2 \times 22,44 \times 4}{1,229 \times 0,15 \times 3,14 \times 9}} = 5,87 \text{ m/s}$$

La vitesse réelle du vent est: $V = V_a / \cos i = 10,77 \text{ m/s}$

Remarquons que le calcul que nous venons de faire n'est qu'approximatif et ne prétend pas donner les caractéristiques exactes du ressort. Ceci est dû aux approximations que nous avons faites sur les coefficients de traînée.

IV.2. Montage électrique:

IV.2.1. Dynamo (12):

C'est une génératrice shunt, récupérée sur une voiture.

Elle débite 25 ampères sous une tension de 12 volts. Sa vitesse de fonctionnement va de 1000 à 6000 tours par minute.

Ces renseignements ont été tirés de la revue automobile. A titre de vérification, nous avons procédé (cf chapitre III) à des essais pour tracer les caractéristiques à vide et en charge en excitation séparée, pour les vitesses 1000, 2000, 3000 trs/mn et nous nous avons déduit la caractéristique en charge en excitation shunt d'après la construction de Picou.

IV.2.2. Régulateur (13)

Ce type d'éolienne est généralement destiné à l'éclairage d'une habitation isolée. Par conséquent, les surtensions doivent être évitées, pour ne pas endommager les batteries de stockage et les appareils d'éclairage. D'où la nécessité d'une régulation de la tension, qui peut se faire de deux manières: par la régulation de la vitesse de rotation du générateur ou par la régulation de son excitation.

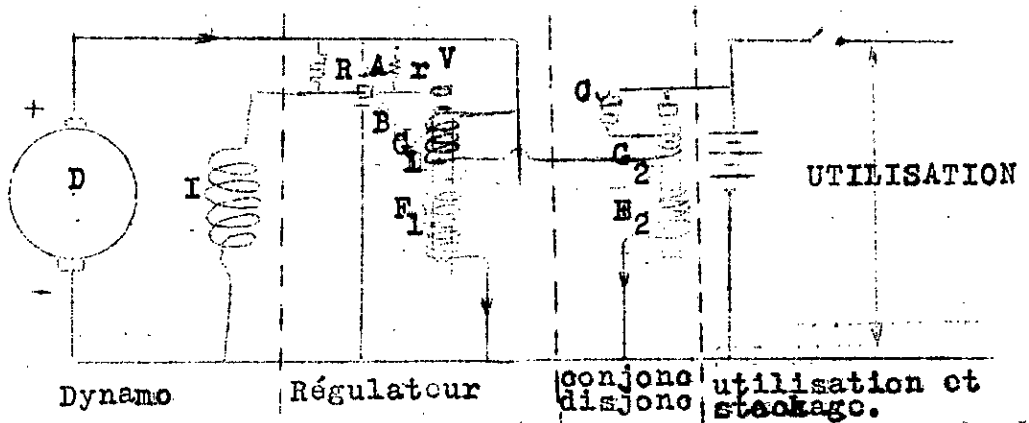
La régulation de la vitesse peut être assurée par une variation de l'angle de calage par boucle mécanique (force centrifuge), électrique, ou électronique (comparaison de la tension de sortie par rapport à la tension désirée), par un frein actionné par des maslottes ou par un régulateur de Watt.

La régulation de l'excitation peut être faite par boucle électrique ou électronique.

Pour notre générateur, nous avons opté pour une régulation électrique de l'excitation, en utilisant un type de régulateur très utilisé pour l'équipement électrique des voitures, car il est facilement récupérable sur les voitures hors d'usage et d'une utilisation très simple.

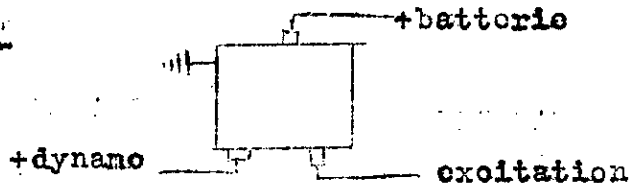
Toutefois, il doit répondre à la dynamo utilisée, ce qui est le cas ici.

Le schéma de montage est le suivant:



Les pointillés indiquent les différentes parties du circuit: la dynamo, le régulateur, le conjoncteur-disjoncteur et les batteries de stockage.

Le régulateur et le conjoncteur-disjoncteur sont présentés dans une boîte, que nous présentons sur le schéma ci-contre.



Examinons maintenant le fonctionnement du régulateur et du conjoncteur disjoncteur.

a/ Régulateur:

En marche normale, le vibreur V rappelé par le ressort r est

en contact avec la borne A. La résistance R est court-circuitée et l'inducteur I est alimenté normalement.

En cas de vent fort, la tension de sortie dépasse la tension demandée et la bobine F_1 attire le vibreur V pour le séparer de plôt A. La résistance R se trouvant ainsi en série avec l'inducteur I, le flux de ce dernier baisse et la tension aux bornes de la dynamo D également. L'attraction de la bobine F_1 devient insuffisante pour compenser l'effort du ressort r et le contact en A se rétablit. Un mouvement de vibration entre les deux positions s'ensuit réglant la tension.

Si la vitesse de rotation augmente considérablement, la résistance R n'est plus suffisante pour limiter la tension à ce moment c'est la bobine G_1 qui vient remplacer F_1 . Le contact avec la borne B se produit, l'inducteur se trouve court-circuité et l'excitation devient très faible. Une vibration entre les bornes A et B s'enclenche, réglant la tension de la dynamo.

b/- ~~Conjoncteur-disjoncteur~~

La régulation est complétée par un conjoncteur-disjoncteur dont la fonction est d'éviter que les batteries de stockage débitent sur la dynamo, quand leur tension est supérieure à celle de cette dernière.

Une bobine F_2 , reliée directement aux bornes de la dynamo, établit le contact avec l'utilisation en C, quand sa tension est supérieure à celle des batteries. La bobine G_2 , montée en série avec le circuit d'utilisation ouvre le contact C sous l'effet du courant débité par les batteries sur la dynamo dont la tension est faible.

La bobine F est appelée conjoncteur, G_2 est le disjoncteur.

IV.2.3. Frotteurs et bagues

Le courant produit par l'aérogénérateur ne peut pas être transmis directement par fil conducteur. Pour cela nous avons installé un système de bagues (25) et de frotteurs (21) en bronze.

Les bagues sont fixées sur un isolant (24) solidaire à la partie immobile de la butée. Les frotteurs maintenus par deux ressorts (23) sur les bagues, sont guidés par deux plaques isolantes (22) solidaires au support sur lequel vient s'appuyer l'aérogénérateur en position normale.

Un couvercle (20) en matière plastique préserve le système d'un éventuel court-circuit qui peut être provoqué par la pluie.

CONCLUSION

Avant d'entamer ce sujet, nous n'ignorions pas les difficultés théoriques et pratiques que nous allions rencontrer tout au long de notre travail. En effet, la documentation sur ce domaine est presque inexistante; toutes les études et réalisations faites jusqu'à ce jour, ne sont pas divulguées.

Nous ne savions pas que le manque de matière et les problèmes administratifs viendraient sans cesse retarder la réalisation pratique.

C'est pourquoi, nous n'avons pas pu effectuer les mesures des performances de l'aérogénérateur.

L'expérimentation nous aurait permis de connaître la variation de la puissance récupérée en fonction de la vitesse du vent et de l'angle de calage, la capacité de stockage et de comparer les résultats théoriques avec ceux pratiques.

Il est facile d'en déduire l'énergie récupérable par an, en effectuant une extrapolation statistique, le meilleur angle de calage, la capacité de stockage à prévoir et le rendement de l'installation.

L'aérogénérateur est prévu pour recevoir facilement d'autres pâles, ce qui permet d'expérimenter différents types de profils aérodynamiques pour en dégager le plus performant.

Nous laisserons donc ce soin aux promotions suivantes pour approfondir les possibilités d'utilisation des éoliennes.

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

P. REBUFFET Aérodynamique expérimentale T.1 DUNOD 1969

R. FONTAINE Aide mémoire de construction mécanique T.1 DUNOD 1967

R. MERLET Technologie d'électricité T.1 DUNOD 1974

REVUE : ANNUAIRE HELIOTECHNIQUE 1975

REVUE : ECOLOGIE N°6 1976

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION	1
CHAPITRE I: LIMITE DE BETZ.....	3
I.1. Principe de l'éolienne.....	3
I.2. Théorème de Betz.....	3
CHAPITRE II: ETUDE AERODYNAMIQUE DES PALES.....	10
II.1. Généralités.....	10
II.2. Action du vent sur une plaque.....	13
II.3. Profil aérodynamique.....	14
CHAPITRE III: DETERMINATION DES DIFFERENTS ELEMENTS DE L'INSTALLATION.....	20
III.1. Etude statistique.....	20
III.2. Etude des caractéristiques de la dynamo....	41
III.3. Dimensionnement et choix des pâles.....	49
III.4. Calcul du multiplicateur de vitesse.....	64
CHAPITRE IV: TECHNOLOGIE ET REGULATION.....	68
IV.1. Montage mécanique.....	68
IV.2. Montage électrique.....	76
CONCLUSION.....	80
BIBLIOGRAPHIE.....	81

