

16/85
200

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
«O»

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
«O»

المدرسة الوطنية للعلوم الهندسية
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE D'ALGER
«O»

DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE
«O»

PROJET DE FIN D'ETUDES
«O»

en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état

THEME

Experimentation et optimisation
d'une station de pompage
photovoltaïque
- DE FAIBLE PUISSANCE -

Proposé par :

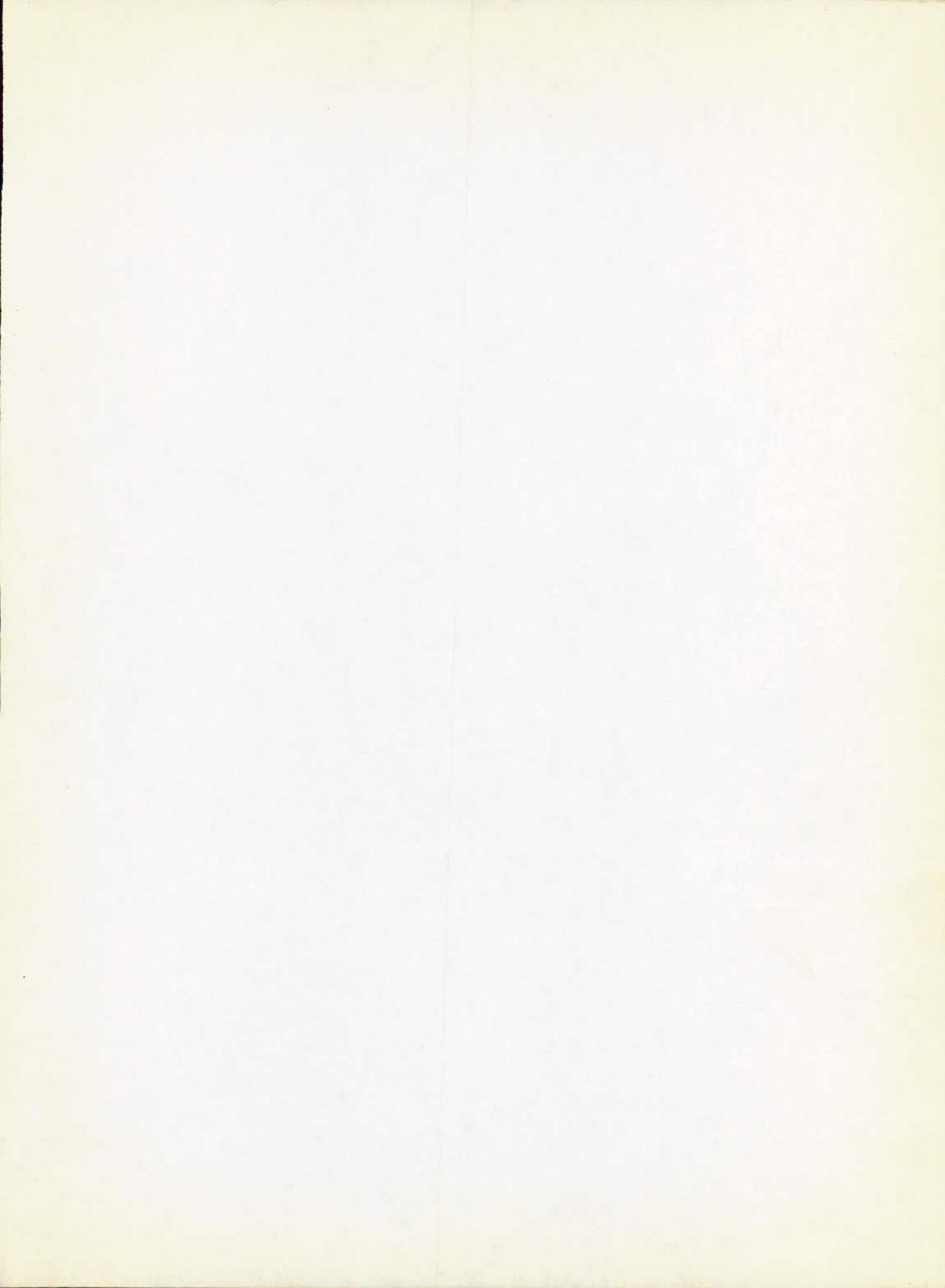
M. S. A. DARRADJI

Etudié par :

KACI Layachi

YOUBI Mohamed

Promotion Janvier 1985



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
«O»

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
«O»

المدرسة الوطنية للعلوم الهندسية
ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE D'ALGER
«O»

DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE
«O»

PROJET DE FIN D'ETUDES
«O»

en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état

THEME

*Experimentation et optimisation
d'une station de pompage
photovoltaïque
- DE FAIBLE PUISSANCE -*

Proposé par :

S.A. DARRADJI

Etudié par :

KACI Layachi

YOUBI Mohamed

Remerciements

Ce travail a été fait sous la direction de M^r S.A DARRADJI, professeur à L'ENPA, chargé de recherche au C.E.N ; Qu'il veuille bien trouver ici le témoignage de gratitude et de nos sincères remerciements pour son aide précieuse et ses bons conseils.

Nos sincères remerciements à M^r BELHAMEL directeur de la station de l'énergie solaire de BOUZARÉAH de nous avoir autorisés à travailler à la station et d'avoir mis à notre disposition tous les moyens pour assurer notre travail.

Nous, tenons de même à remercier M^r NASRI Ingénieur d'état et responsable de l'équipe de pompage solaire pour nous avoir apporté son aide à l'élaboration de cette thèse ainsi qu'à l'ensemble du personnel de la station.

Toute notre sympathie à tous ce qui ont directement ou indirectement contribué à notre formation.



DÉDICACES

- À La mémoire de ma grand-mère
À - ma mère ; mon père et mon oncle BRAHIM
- mes frères et sœurs sans oublier le petit Ammar
- Tous mes amis

KACI LAYACHI

À mes Parents.

- à mes frères Ahmed et Slimane
- à mes fils Ibrahim et Youcef
- à toute ma famille.
- à tous mes amis

Je dédie ce modeste travail.

Youbi Mohamed.

DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

Experimentation et optimisation d'une station de pompage photovoltaïque de faible puissance.

RESUME

Ce projet aborde l'étude d'un système de pompage d'eau de faible puissance à conversion photovoltaïque. Les grandeurs nécessaires au dimensionnement du système sont examinées.

Une étude des parties essentielles de la chaîne a été faite dans le cas d'un couplage direct entre groupe moto-pompe à c.c et le générateur [P.V], ainsi que la réalisation d'un régulateur de charge de batteries au plomb.

SUMMARY

This project deals with the study of a low power solar pumping system. The main parameters needed for sizing of the equipment are examined. A study of the essential parts of the chain has been undertaken in the case of a direct coupling between [P.V] generator and d.c motor pump set. Also we have realised a regulator of charge and discharge of battery.

ملخص

هذا المشروع ينص على دراسة نظام ضخم القدرة لضخ الماء. درست فيه كل القياسات الضرورية لتحديد هذا النظام. كما درست القسم الرئيسي للحملة في حالة الترابط المباشر بين المولد الكهروضوئي ومحرك التيار المستمر الموصل بالفضحة وكذلك تحقيق جريان ضابط لتعمير وتفريغ مجموعة بطاريات.

Noms et Prénoms:

KACI LAYACHI
YOUBI Mohamed.

PROMOTEUR :

S.A DARRADJI

TABLE DE MATIÈRES

Introduction

CHAPITRE I : ETUDE DU RAYONNEMENT SOLAIRE SUR LE SITE DE BOUZAREAH

I.1. Généralités	1
I.1.1 Répartition spectrale du rayonnement solaire	1
I.1.2 Comportement du rayonnement solaire sur le sol	1
I.2 Energie solaire reçue sur une surface plane en fonction de son orientation	3
I.3 Optimisation de l'orientation du capteur	5
I.3.1 Energie solaire captée quotidiennement durant l'année pour différentes orientations du capteur	5
I.4 Cas de l'installation du groupe motopompe à Alger	6
I.4.1 Durée d'ensoleillement	6
I.5.1 Exploitation des données météorologiques mesurées à la station de Bouzareah - Alger	8
I.6 Prédétermination de la courbe d'ondulation minimale $\theta = \hat{L} = 37^{\circ} 45'$	

CHAPITRE II DIMENSIONNEMENT DE L'INSTALLATION DE POMPAGE AVEC STOCKAGE ÉLECTRIQUE

II.1 Schéma synoptique	16
II.2 Courbe de charge	16
II.3 Détermination du nombre optimal de panneaux	17
II.3.1 Hypothèse de dimensionnement	17
II.4 Calcul de la capacité des accumulateurs de stockage	19
II.4.1 Stockage de la consommation quotidienne	19
II.4.2 Stockage du surplus d'énergie saisonnière	20
Conclusion	23

CHAPITRE III : ETUDE THÉORIQUE DES PARTIES ESSENTIELLES DE LA CHAÎNE

III.1	Couplage direct entre le générateur [P.V] et le moteur	24
III.2	Equations des moteurs à courant continu	25
III.3	Equations de base	25
III.4	Courbe de fonctionnement de l'ensemble motopompe	27
III.5	Démarrage des moteurs à c.c en couplage direct	28
III.5.1	Equations électriques de démarrage des moteurs à c.c	28
III.5.2	Couple de démarrage des moteurs à c.c	29
III.5.3	Comparaison des trois types de moteurs	29
III.6	Condition de bonne adaptation [générateur - motopompe]	30
III.6.1	Étude des conditions de charge	30
	- Conclusion	33

CHAPITRE IV : ETUDE EXPERIMENTALE DE LA CHAÎNE DE POMPAGE EN COUPLAGE DIRECT

IV.1	Conception du générateur Photovoltaïque	34
IV.1.a	Test des panneaux	34
IV.1.b	Évaluation du nombre de modules	35
IV.1.c	Protection des panneaux solaires	37
IV.1.d	Relevé de la caractéristique du générateur [P.V]	38
IV.2	Méthode d'étude de la chaîne	39
IV.2.1	Description de la méthode graphique d'analyse	39
IV.2.2	Notion du générateur mécanique équivalent	40
IV.2.3	Couplage du générateur mécanique équivalent avec la pompe	43
IV.2.4	Calcul du rendement de la chaîne	53
IV.2.5	Comparaison des résultats expérimentaux avec les résultats de la méthode graphique - conclusion	56
IV.3	Réalisation d'un régulateur électronique de charge et décharge de batteries	60
	Conclusion	66

INTRODUCTION

Autrefois le pompage d'eau se faisait par la force humaine ou animale avec tout ce que cela comporte comme limite de la production due à la fatigue.

L'apparition des groupes motopompes a remplacé les forces musculaires avec un gain de temps, débit important et faible assistance. Cette évolution ira en augmentant, mais les inconvénients sont les besoins en carburant, l'entretien permanent et le prix de revient suivant la source d'énergie utilisée.

En effet, dans des zones arides éloignées non électrifiées l'approvisionnement en carburant revient cher; Il s'est avéré que le pompage par conversion photovoltaïque est un concurrent sérieux du diesel.

Dans ce sens l'objectif de notre travail a été l'optimisation et le dimensionnement d'une installation de pompage de faible puissance [$P_n = 370W$] à conversion photovoltaïque.

Ce travail se décompose en quatre principaux chapitres
Chap I: Il consiste en l'étude du rayonnement solaire nécessaire pour l'optimisation de toute installation photovoltaïque.

Chap II: Il traite quant à lui le dimensionnement d'une installation de pompage avec stockage électrique.

Chap III: présente l'étude théorique des parties essentielles de la chaîne de pompage en couplage direct.

chap IV: Etude expérimentale de la chaîne en couplage direct
- Réalisation d'un dispositif électronique de charge et décharge de batteries.

- Conclusion.

Chap I: ÉTUDE DU RAYONNEMENT SOLAIRE SUR LE SITE DE BOUZARÉAH [ALGER]

I.1. Généralités

Le soleil est une sphère composée presque exclusivement d'hydrogène H_2 [70%] et d'hélium He [29%]. Il se comporte comme une bombe thermonucléaire transformant chaque seconde 564 millions de tonnes d'hydrogène en 560 millions de tonnes d'hélium.

La masse du soleil est telle qu'il peut encore rayonner pendant des millions d'années.

I.1.1 - Répartition spectrale du rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est réparti en un spectre compris entre les longueurs d'ondes $0,3 \mu m - 3 \mu m$ correspondant respect. à [U.V et I.R] avec un maximum d'énergie pour les longueurs d'onde se situant au voisinage de $\lambda = 0,47 \mu m$ dans le visible.

I.1.2 - Comportement du rayonnement solaire sur le sol

- À l'arrivée du rayon solaire sur terre, il est divisé en deux parties par l'atmosphère.

a) - Rayonnement direct [E_1]: C'est la fraction du rayon qui arrive directement sur terre sans subir aucune modification de trajectoire.

b) - Rayonnement diffus [E_2]: C'est la partie diffusée par les particules de la couche atmosphérique. Son flux n'a pas une direction bien déterminée mais il provient de toute la voûte céleste.

c) flux global [E]: Il est défini comme étant la somme du flux direct et diffus.

$$E_G = E_{dir} + E_{dif}$$

I.2 Energie solaire reçue sur une surface Plane en fonction de son orientation.

Comme il a été déjà mentionné, le flux global du rayonnement solaire est sous forme :

$$E = E_1 + E_2 \quad [I.1]$$

avec E_1, E_2 , respectivement les rayonnements direct et diffus.

En période de beau temps la contribution du rayonnement direct est plus importante que celle du diffus qui peut être négligée d'où l'expression du rayonnement.

$$E = \bar{E}_1(t) = E_0 \cdot \vec{n} \cdot \vec{u} = E_0 \cdot \cos \theta \quad [I.2]$$

où θ : angle d'incidence entre la normale à la surface de captation et la direction des rayons solaires

E_0 : éclairement reçu par une surface perpendiculaire aux rayons solaires

La fig [I.1] représente les paramètres définissant la position géographique d'un capteur solaire.

le plan $zO\Delta$ définit le plan méridien, $\vec{n} \in [zO\Delta]$

Le plan équatorial est défini par le plan (xOy) et $\vec{O\Delta} \in (xOy)$

Les rayons solaires arrivent parallèlement au plan (zOy) leur direction faisant un angle δ avec \vec{Oy} (δ : déclinaison de la terre.)

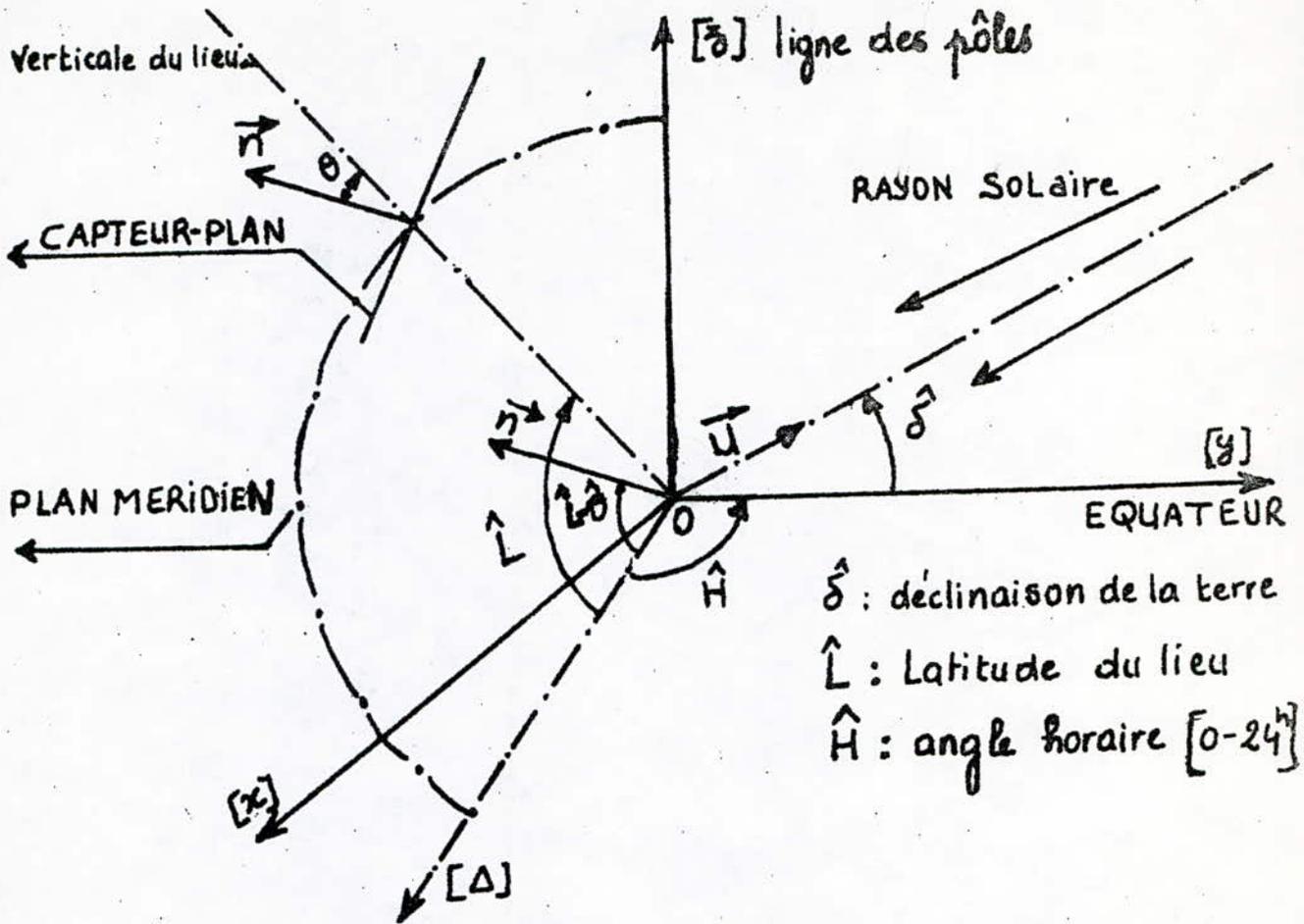


FIG [I.1 a]: Représentation de la position, d'un capteur plan en fonction, des paramètres \hat{L} , δ , \hat{H} et $\hat{\theta}$

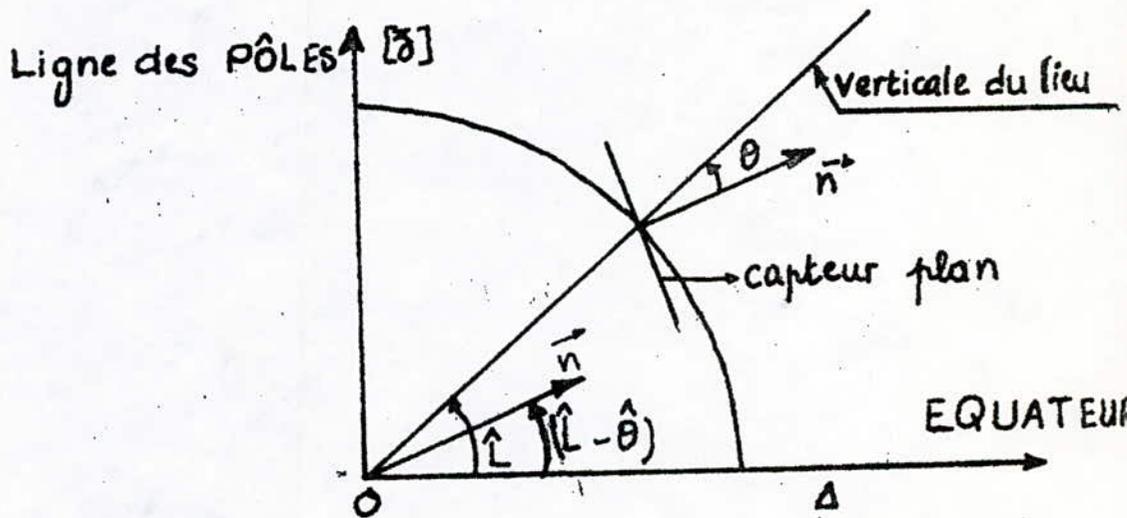


fig [I.1.b]: Représentation de la position du capteur plan dans le plan méridien

La latitude \hat{L} détermine la position de la verticale du lieu

Dans le plan $(zO\Delta)$ on a le vecteur

$$\vec{n} \begin{pmatrix} \cos(L-\theta) \\ \sin(L-\theta) \end{pmatrix} \quad [I.3]$$

Dans le système de référence $[oxyz]$, les composantes scalaires des vecteurs \vec{n} et \vec{u} sont : fig [I.1]

$$\vec{n} \begin{pmatrix} \cos(L-\theta) \cdot \sin H \\ \cos(L-\theta) \cdot \cos H \\ \sin(L-\theta) \end{pmatrix}$$

$$\vec{u} \begin{pmatrix} 0 \\ \cos \delta \\ \sin \delta \end{pmatrix}$$

L'expression $E(t)$ est :

$$E(t) = E_0 [\cos(L-\theta) \cos H \cos \delta + \sin(L-\theta) \sin \delta] \quad [I.4]$$

I.3 Optimisation de l'orientation du capteur

La captation de l'énergie solaire à l'aide des panneaux peut se faire selon plusieurs procédés. Nous citerons les trois principaux [7]

a) - Le système de poursuite automatique du soleil, permettant de positionner le panneau normalement aux rayons solaires incidents

L'inconvénient est que dans un tel système une partie de l'énergie produite est consommée par le dispositif d'asservissement.

b) - L'orientation manuelle du capteur à chaque saison vers une direction où l'intensité du rayonnement serait maximale

c) - L'utilisation la plus simple consiste à orienter définitivement les panneaux vers une direction pour laquelle l'énergie collectée durant l'année est maximale.

- Nous allons optimiser cette direction car c'est un procédé avantageux par rapport aux autres. Ce dernier ne nécessite aucune intervention manuelle ou automatique.

- Pour cela l'énergie captée quotidiennement ne s'écarte pas trop de sa valeur moyenne annuelle. Notre but est de faire fonctionner l'installation de pompage sous les mêmes conditions d'ensoleillement.

I.3.1 Énergie captée quotidiennement durant l'année pour différentes orientations du capteur.

L'expression [A.7] nous permet de tracer les variations

de l'énergie captée journalière durant l'année en prenant comme origine du temps le premier jour de l'hiver.

La valeur de E_0 étant constante et inconnue, on trace alors les variations de E_j/E_0 . Le Tab [I.1] donne les variations de E_j/E_0 pour les différentes orientations $\hat{\theta}$ du capteur. Ces valeurs ont été traduites par les courbes de la fig [I.2] ($\theta = 0^\circ$; $\theta = \frac{\pi}{2}$; $\hat{\theta} = \hat{L} = 37^\circ$ [ALGÈRE]).

On constate que les fluctuations d'énergie sont minimales pour l'orientation $\hat{\theta} = \hat{L} = 37^\circ$ et elles sont maximales pour $\hat{\theta} = 90^\circ$.

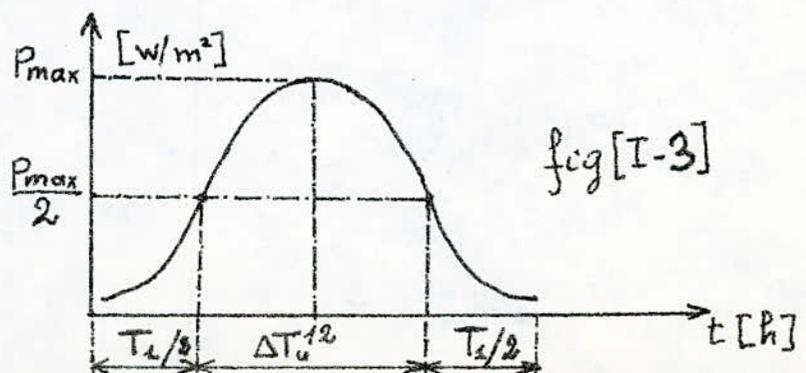
La caractéristique $\hat{\theta} = \hat{L} = 37^\circ$ est mieux exploitable dans le cas d'un stockage d'énergie; L'ondulation minimale de la courbe impose des conditions de stockage optimale.

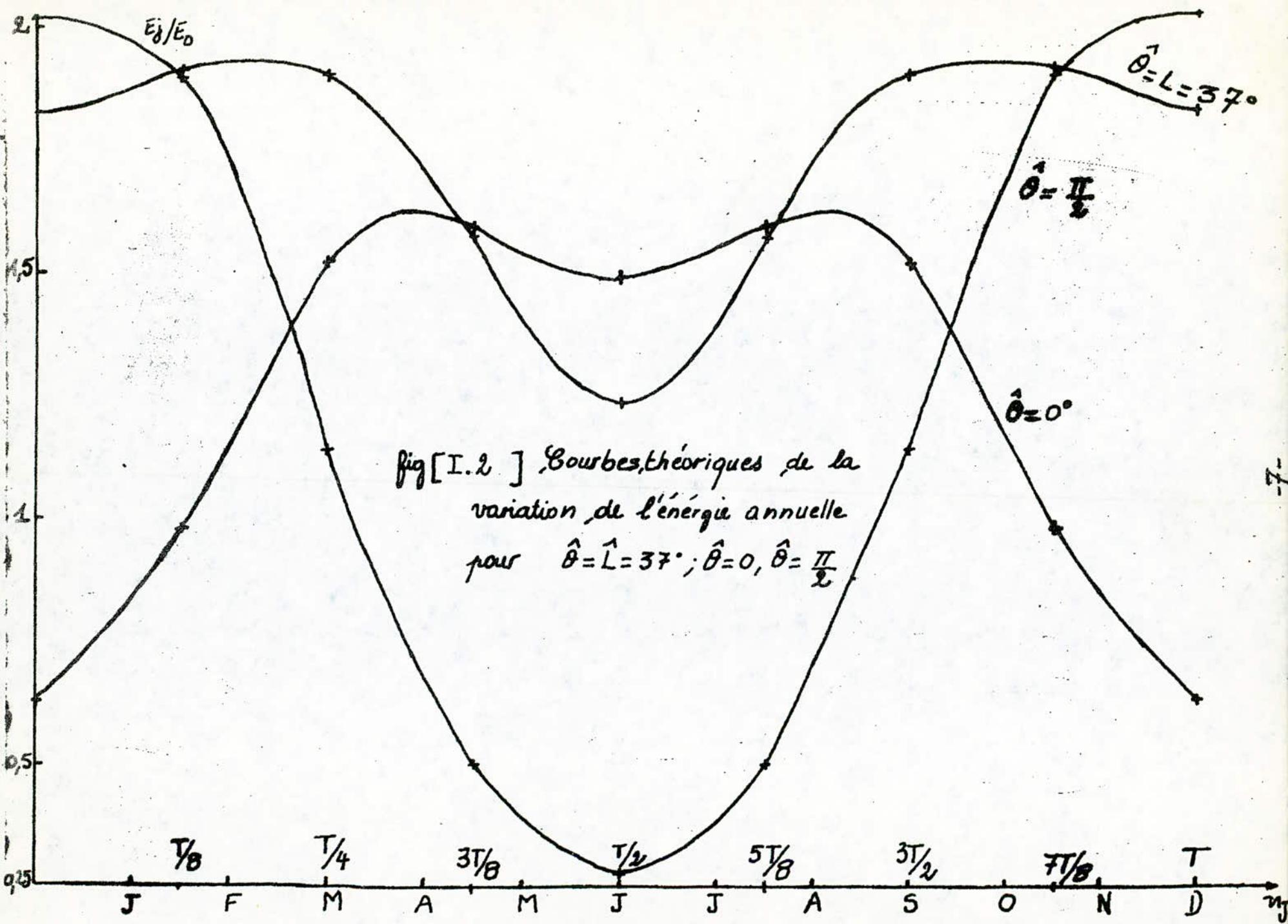
I.4 Bas de l'installation du groupe motopompe à Alger :

Afin de pouvoir faire un bilan énergétique rigoureux il faudra tenir compte de la variation dans l'année de la durée d'ensoleillement de chaque jour.

I.4.1 - Durée d'ensoleillement

Pendant une journée ensoleillée, la courbe de puissance est donnée par la fig [I.3]





L'installation de pompage doit pouvoir fonctionner quand la puissance convertie par les panneaux vaut la moitié de la puissance journalière. Pour cela on détermine la durée utile de cette puissance durant la journée du 24.10.84 et elle vaut $\Delta T_u = 7h$

Cette estimation est faite pour une journée d'automne nous avons extrapolé cette valeur aux autres saisons de l'année et on trouve une valeur moyenne annuelle de $\Delta T_u = 10h$

I.5-Exploitation des données météorologiques mesurées à la station de Bouzaréah [Alger]

Les données du rayonnement solaire global des trois années consécutives 1980, 1981 et 1982 enregistrées à la station S.E.E.S Tab [I.2; I.3; I.4] ont été traduites sous forme de courbes en moyennes décadaires, mensuelles et annuelles fig [I.4; I.5; I.6]

Les courbes moyennes décadaires nous permettent d'apprécier les fluctuations mensuelles.

Les valeurs expérimentales enregistrées pour $[\theta = 0]$ nous permettent d'évaluer la courbe expérimentale à ondulation minimale pour un capteur incliné $[\hat{\theta} = \hat{\lambda} = 37^\circ]$

L'étude des courbes obtenues pour les années 1980, 1981 et 1982 nous donnent respectivement les valeurs moyennes de l'énergie captée par un capteur horizontal

$$\begin{array}{lll} P_1 = 362 & W/m^2 & \text{fig [I.5]} \\ P_2 = 453 & W/m^2 & \text{fig [I.4]} \\ P_3 = 427 & W/m^2 & \text{fig [I.3]} \end{array}$$

Tab[I.1]: Tableau des valeurs théoriques de E_j/E_0 pour différentes θ la période T représentant une année.

n_j	0	$\frac{T}{8}$	$\frac{T}{4}$	$\frac{3T}{8}$	$\frac{T}{2}$	$\frac{5T}{8}$	$\frac{3T}{4}$	$\frac{7T}{8}$	T
$\delta_j(t)$ en degré	-24	$-12\sqrt{2}$	0	$+12\sqrt{2}$	+24	$12\sqrt{2}$	0	$-12\sqrt{2}$	-24
E_j/E_0 [$\hat{\theta}=\hat{\lambda}=33^\circ$]	1,817	1,913	1,900	1,565	1,225	1,565	1,900	1,913	1,817
E_j/E_0 [$\hat{\theta}=90^\circ$]	2,181	1,874	1,44	0,495	0,273	0,495	1,144	1,874	2,181
E_j/E_0 [$\hat{\theta}=0^\circ$]	0,632	0,983	1,518	1,587	1,491	1,587	1,518	0,983	0,632

MOIS	du 1 ^{er} - 10 E_m [KJ/m ² /J]	du 10 - 20 E_m [KJ/m ² /J]	du 20 - 30 E_m [KJ/m ² /J]	moy journalière mensuelle KJ/m ²
Janv	7909	3694	9058	6887
Fev	13425	9611	7536	10191
MARS	14306	18728	19996	17677
AVRIL	15113	23277	25115	21168
MAI	28291	25784	17501	23859
Juin	16225	21921	28855	22334
Juillet	24333	22441	18641	21805
AOÛT	19330	20120	8641	16050
Sept	13055	9863	14281	12400
Octobre	6109	8378	8351	7613
Nov	6701	7063	7853	7206
Déc	14532	14676	22658	17289

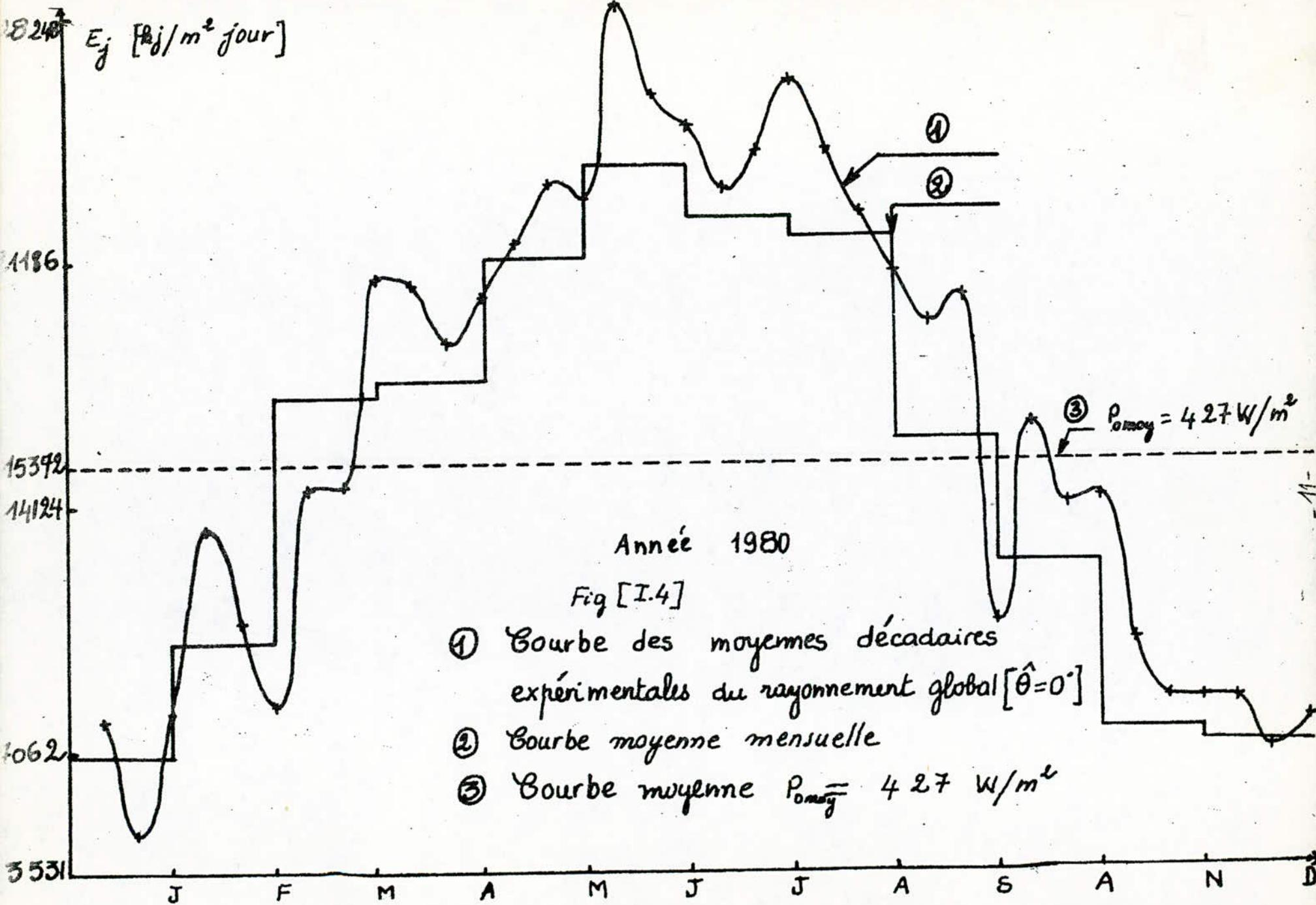
Tab[I.4]: Rayonnement journalier moyen par décade et mensuel de l'année [1982]

Tab [I.2] Rayonnement moyen journalier par décade et mensuel [1980]

Mois	du 1 ^{er} ÷ 10 E_{om} [KJ/m ² /J]	du 10 ÷ 20 E_{om} [KJ/m ² /J]	du 20 ÷ 30 E_{om} [KJ/m ² /J]	moy. journalière mensuelle [KJ/m ² /J]
Janv	8503	7572	7972	8016
Fev	11946	6137	7328	8470
Mars	17435	18079	15067	16860
AVRIL	21085	17658	20501	19748
Mai	12956	17679	21235	17290
JUIN	22842	26999	25472	25104
Juillet	16487	16952	15036	16158
AOÛT	14705	15631	3418	11251
SEPT	10180	13271	15785	13079
Oct	13590	5398	9885	9624
NOV	6106	7480	6942	6843
Décembre	4226	4232	3206	3888

Tab [I.3] Rayonnement moyen journalier par décade et mensuel [1981]

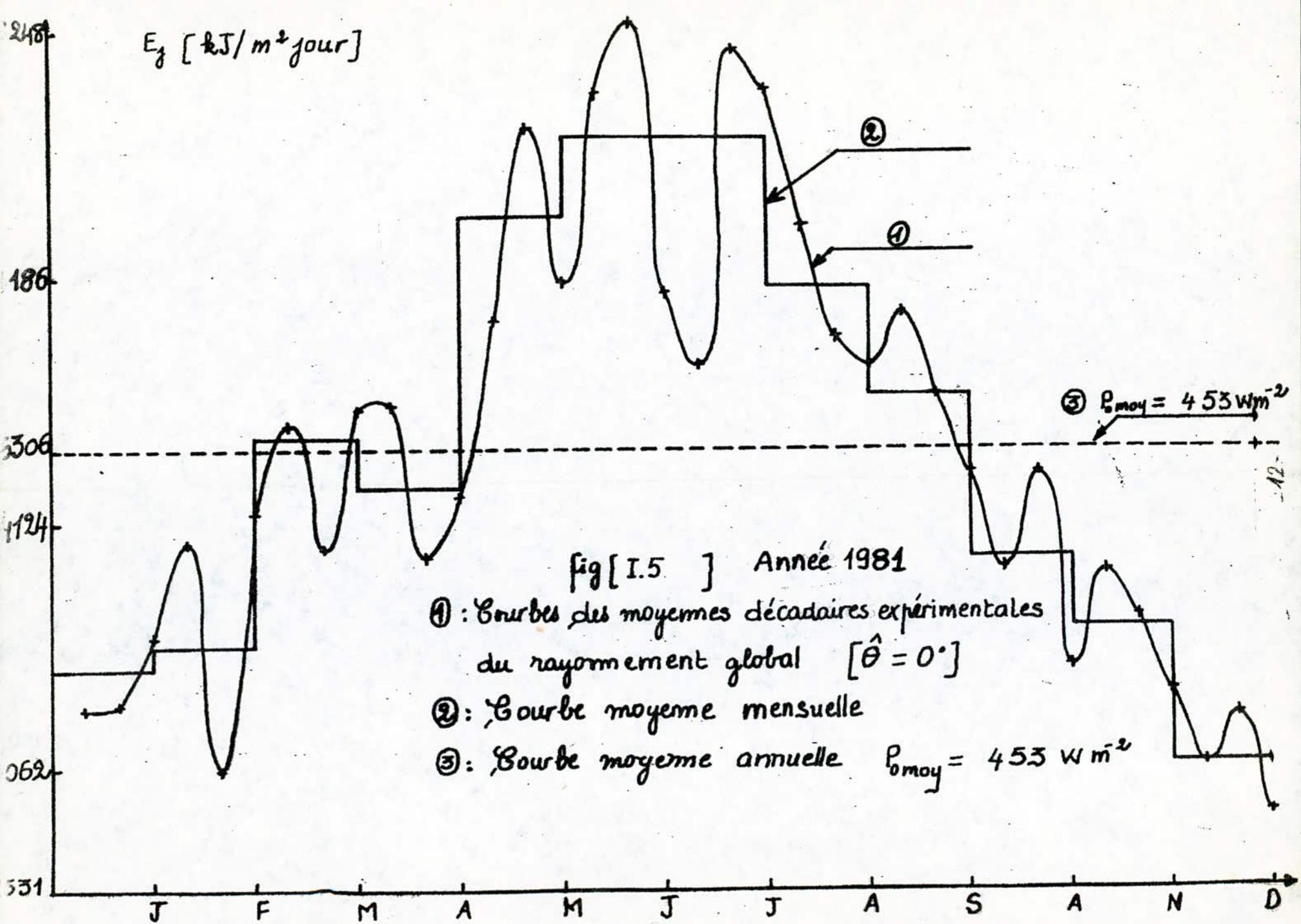
Mois	du 1 ^{er} ÷ 10 E_{om} [KJ/m ² /J]	du 10 ÷ 20 E_{om} [KJ/m ² /J]	du 20 ÷ 30 E_{om} [KJ/m ² /J]	moy. journalière mensuelle KJ/m ² /J
Janv	8888	8926	11917	9910
Fev	13547	7025	11587	10720
Mars	16927	13387	19128	16481
AVRIL	17495	13104	14799	15133
Mai	19978	25445	23150	22851
JUIN	26438	28401	20743	25194
Juillet	18679	27734	29194	25202
AOÛT	22499	19527	20578	20868
SEPT	20143	17787	15578	17836
Oct	12855	12521	10978	13111
NOV	12706	11457	9279	11147
Déc	7260	8608	5786	7218



Année 1980

Fig [I.4]

- ① Courbe des moyennes décadales expérimentales du rayonnement global [$\hat{\theta}=0^\circ$]
- ② Courbe moyenne mensuelle
- ③ Courbe moyenne $P_{\text{moy}} = 427 \text{ W/m}^2$



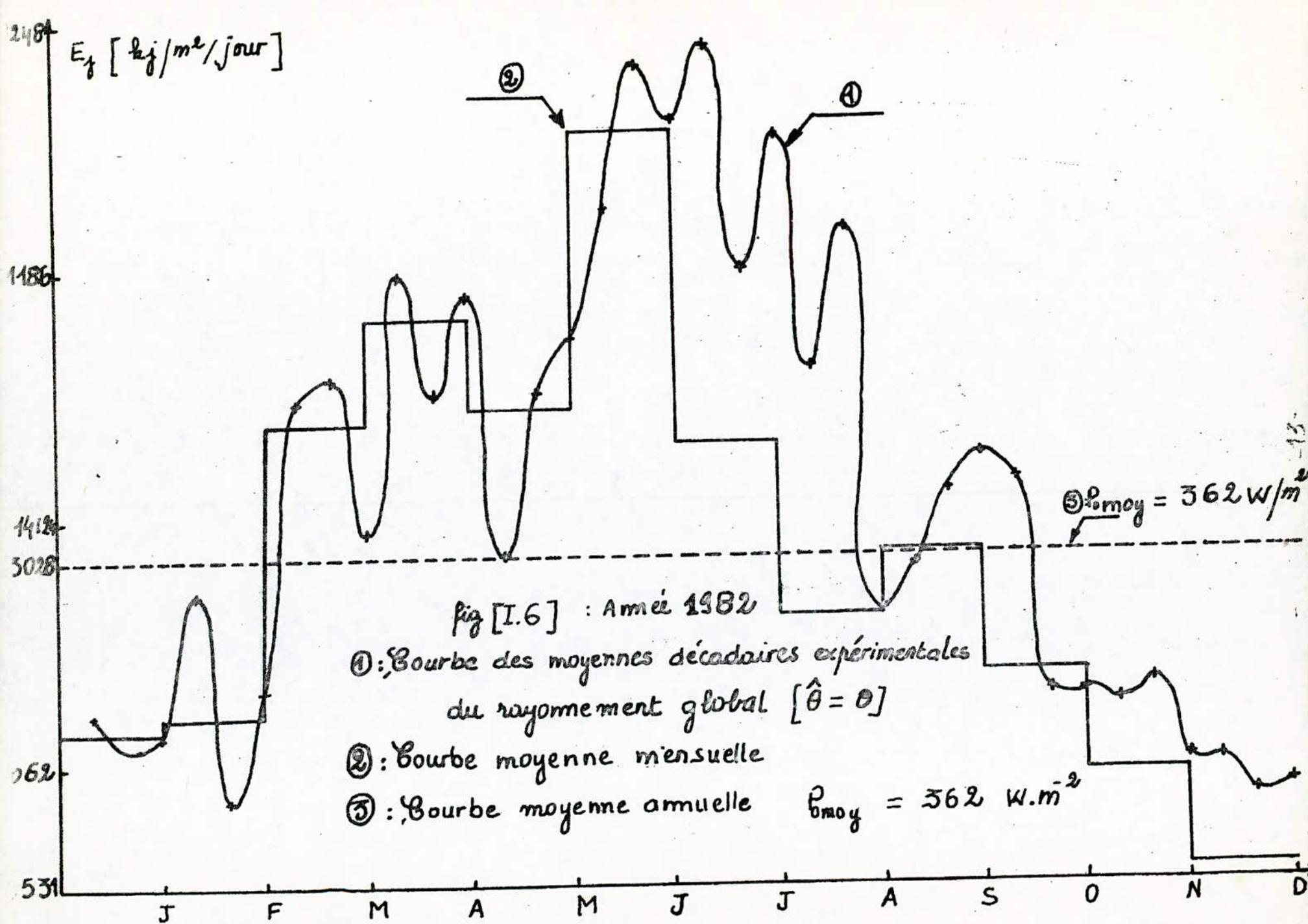
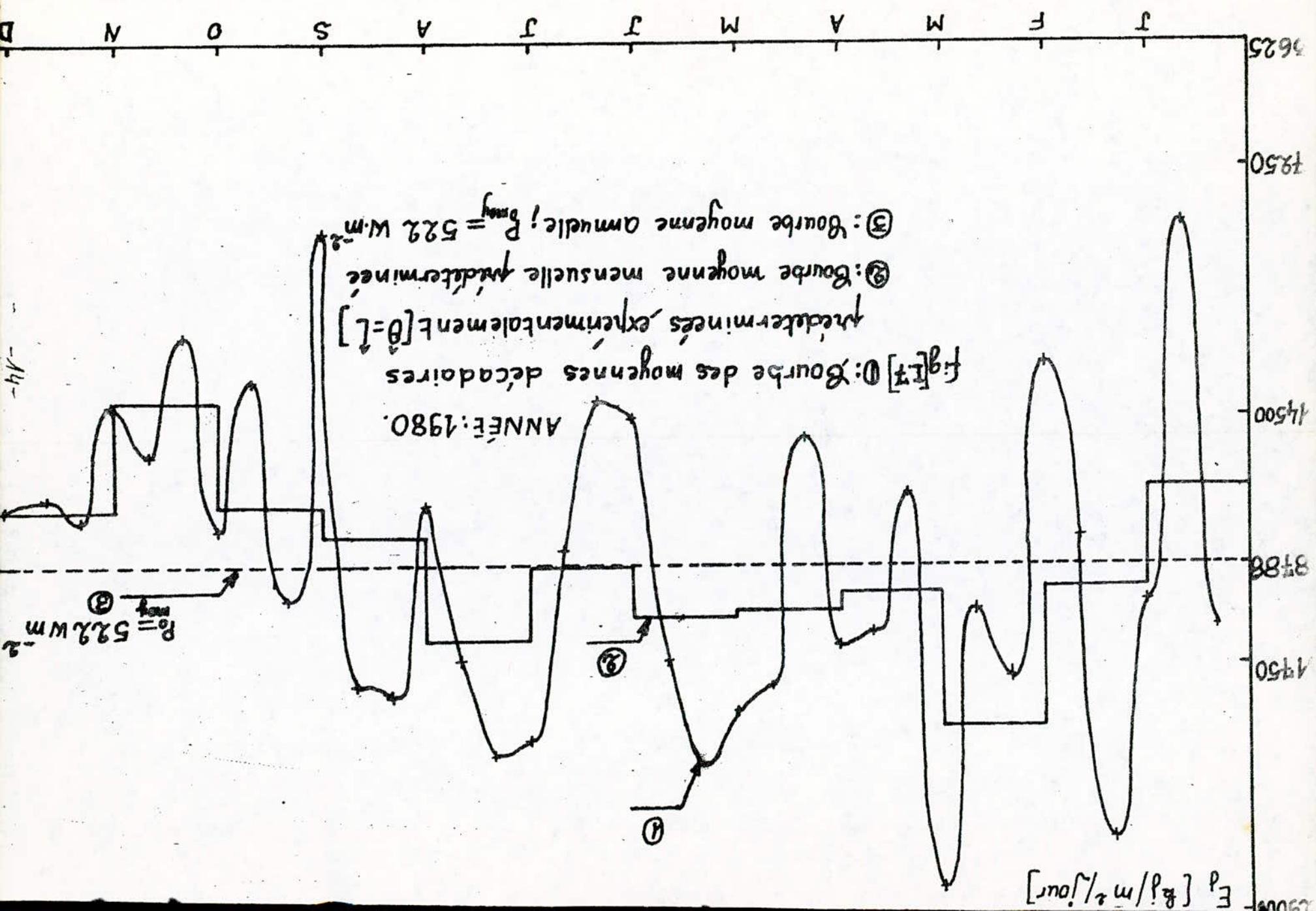


Fig [I.6] : Année 1982

①: Courbe des moyennes décadales expérimentales du rayonnement global $[\hat{\theta} = 0]$

②: Courbe moyenne mensuelle

③: Courbe moyenne annuelle $P_{\text{moy}} = 362 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$



ANNÉE: 1980.
 Fig[17] ①: Courbe des moyennes décadales
 prédéterminées expérimentalement [$\theta = L$]
 ②: Courbe moyenne mensuelle prédéterminée
 ③: Courbe moyenne annuelle; $P_{\text{moy}} = 52.2 \text{ W m}^{-2}$

Pour la suite de notre calcul on prendra une valeur moyenne intermédiaire égale à celle de l'année 1980 ;

$$P_{\text{moy}} = 427 \text{ W m}^{-2}$$

I.6. Prédétermination de la courbe d'ondulation minimale $[\hat{\theta} = \hat{L}]$ et calcul de l'ensoleillement moyen journalier annuel

Pour prédéterminer la courbe expérimentale $[\hat{\theta} = \hat{L}]$ on effectue les opérations suivantes :

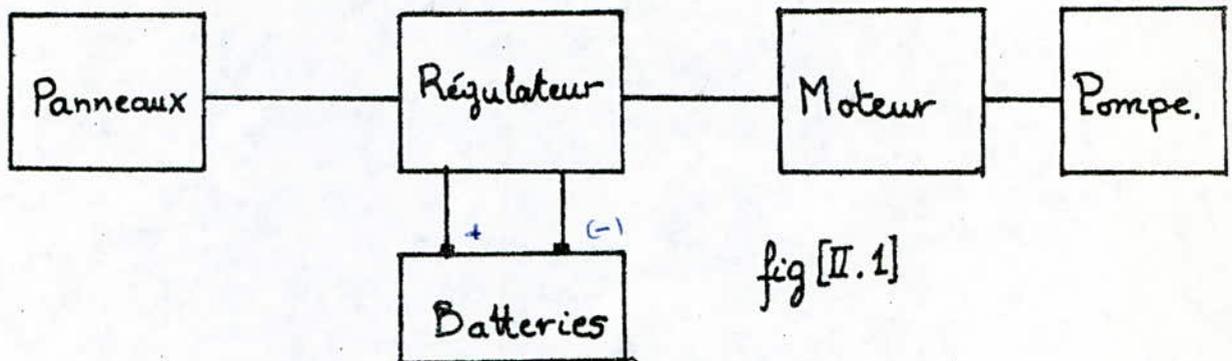
1- On prend les rapports des deux courbes théoriques fig[I.2] entre $\theta=0$ et $\theta=\hat{L}$, en particulier le rapport des maximums et des minimums

2. On multiplie chaque point de la courbe expérimentale $\theta=0$ Fig[I.3] par le rapport théorique correspondant et on obtient la courbe prédéterminée de l'énergie reçue pour l'orientation du capteur $[\hat{\theta} = \hat{L} = 37]$ Fig[I.7] qui a pour valeur moyenne annuelle

$$P_{\text{moy}} = 522 \text{ W/m}^2$$

CHII-DIMENSIONNEMENT DE L'installation de POMPAGE AVEC STOCKAGE ÉLECTRIQUE

II.1. Schéma synoptique de l'installation :

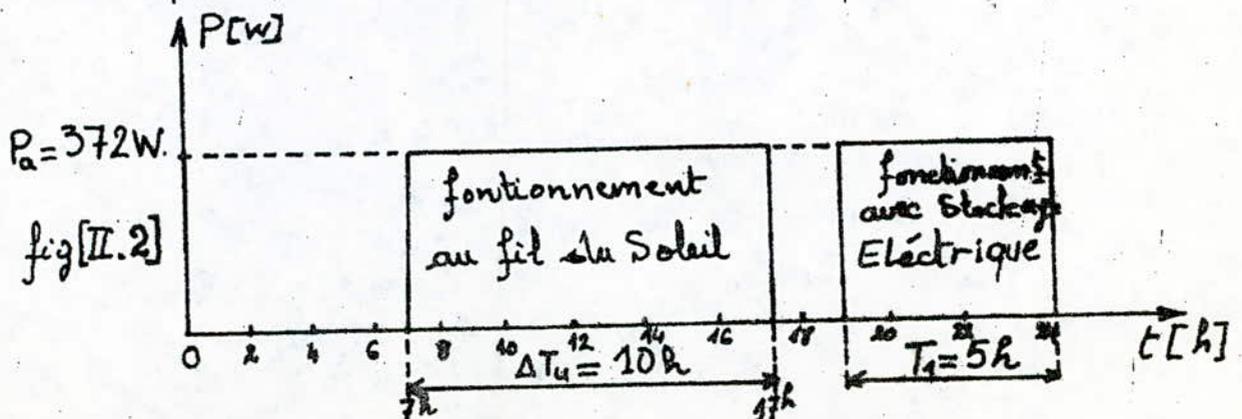


II.2. Courbe de charge :

L'installation de pompage utilise un moteur à courant continu à aimant permanent. Sa puissance nominale est de 372 W. On désire assurer cette puissance pendant 10^h de fonctionnement le jour et d'assurer un fonctionnement de 5 heures la nuit avec stockage électrique pour son autonomie.

Nous allons aborder cette étude dans le cas de contraintes réelles d'utilisation et de stockage électrique.

les besoins en énergie électrique sont pratiquement constants et sont définis par la courbe de charge ci-dessous.



où : ΔT_u est le temps moyen d'éclairément utile [10h]

T_1 : temps de pompage avec batteries d'accumulateurs

II.3. Détermination du nombre de Panneaux

Dans le calcul des dimensions de pompage solaire l'estimation du nombre de panneaux optimal est l'opération la plus importante étant donné le prix actuel des photopiles, très élevé.

L'énergie journalière convertie par les panneaux solaires de surface totale S_T et de rendement η_p est donnée par l'expression suivante

$$W_c(t) = \eta_p \cdot S_T \cdot E(t) \quad [II.1]$$

II.3.1. HYPOTHÈSES de dimensionnement .

1. On suppose que les conditions météorologiques satisfont durant toute l'année la valeur moyenne du rayonnement que l'on s'est fixé [$P_{s, moy} = 522 \text{ w/m}^2$]

2. Les panneaux sont dirigés vers la position $\theta = \hat{L} = 37^\circ$ [Alger]

L'énergie convertie par les panneaux doit être égale à l'énergie consommée pendant la journée plus l'énergie stockée dans des accumulateurs pour la resservir la nuit .

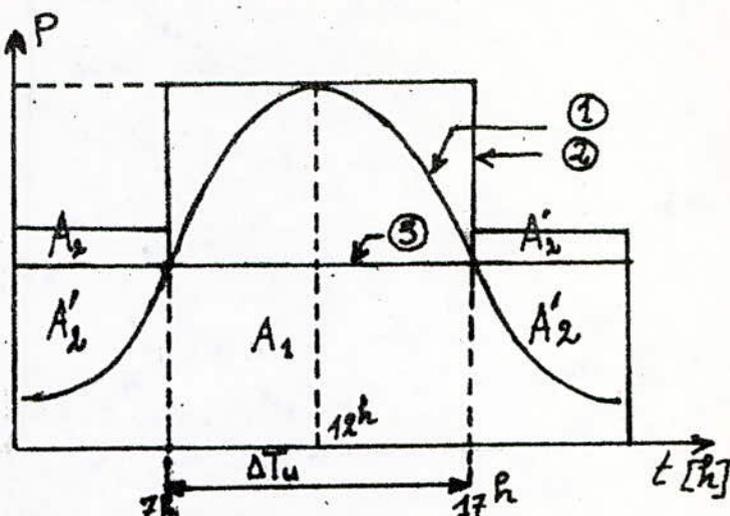
Pour les calculs nous étudions la courbe journalière de l'énergie par la méthode graphique comme elle a été enregistré.
fig [II.3] .

① Courbe de l'énergie journalière

② caractéristique approchée P_a

③ caractéristique de charge.

fig [II.3]



Soient : W_a la consommation totale quotidienne du groupe .

η_a : le rendement des accumulateurs

η_p : le rendement des panneaux

S_0 : Surface d'un seul module solaire [Type BELGO]

N : Nombre optimal de panneaux solaires nécessaires

P_a : Puissance absorbée (nominale) du groupe .

E_0 : Eclairage moyen annuel .

L'énergie convertie par la surface totale des panneaux doit être supérieure ou égale à l'énergie quotidienne consommée par le groupe .

$$W_a \leq \eta_p \cdot N \cdot S_0 \cdot E_0 \quad [\text{II.2}]$$

Avec $E_0 = P_{\text{moy}} \cdot \Delta T_u$

D'autre part $W_a = A_1 + 2A_2$ fig [II.3] $[\text{II.3}]$

A_1 : énergie consommée au "fil du soleil" pendant le jour

$$A_1 = P_a \cdot \Delta T_u \quad [\text{II.4}]$$

A_2 : énergie stockée par les accumulateurs dans la journée'

A'_2 : énergie distribuée par les accumulateurs au groupe .

$$A_2' = \eta_a \cdot A_2$$

$$A_2 = \frac{A_2'}{\eta_a} = \frac{P_a \cdot [H - \Delta T_u]}{\eta_a \cdot 2} \quad [\text{II.5}]$$

D'après les formules [II.5, II.4] on aura :

$$W_a = P_a \cdot \Delta T_u + \frac{P_a \cdot [H - \Delta T_u]}{\eta_a}$$

$H = 15$ heures durée de fonctionnement.

De l'expression [II.2] On en déduit le nombre de Panneaux

$$N \geq \frac{P_a}{P_o} \frac{1}{S_o \eta_p} + \frac{P_a [H - \Delta T_u]}{P_o \Delta T_u \eta_a \eta_p S_o} \quad [\text{II.6}]$$

APPLICATION numérique :

$$P_a = 372 \text{ W} ; \eta_p = 9\% ; \eta_a = 80\%$$

$$S_o = 0,44 \text{ m}^2 ; P_{\text{moy}} = 522 \text{ W m}^{-2} ; \Delta T_u = 10 \text{ h}$$

$$H = 15 \text{ h} .$$

D'où le nombre de panneaux est $N = 29$ Panneaux.

II.4 - Calcul de la capacité des accumulateurs de stockage

Le stockage a pour but essentiel de mettre en réserve une certaine quantité d'énergie pour une utilisation ultérieure.

II.4.1 - Stockage de la consommation quotidienne.

Le stockage d'énergie quotidienne concerne seulement

les besoins en période nocturne et l'autonomie du système.
L'énergie électrique stockée est donnée par l'expression:

$$W_s = \frac{P_a [H - \Delta T_u]}{\eta_a} \quad [\text{II.7}]$$

La capacité des accumulateurs devant stocker cette énergie sous une tension $U_0 = 12 \text{ V}$ est:

$$C_1 = \frac{P_a [H - \Delta T_u]}{U_0 \eta_a}$$

finalement on trouve :

$$C_1 = 193,75 \text{ AH}$$

II.4.2 - STOCKAGE DU SURPLUS D'ÉNERGIE SAISONNIÈRES

Pour mieux prévoir les fluctuations d'énergie on peut se contenter de tracer la courbe $E(t) = f(\eta_j)$ pour des valeurs mesurées au maximum d'énergie pendant la journée.

Pour cela on prend $H_{\max} = H(t) = 0 \Rightarrow \cos H = 1$

L'expression (I.4) devient

$$E_j = E_0 \cdot \cos (L - \theta - \delta_j) \quad [\text{II.8}]$$

Dans notre cas $\hat{\theta} = \hat{L} = 37^\circ$ [région d'Alger]

$$E_j = E_0 \cdot \cos \delta_j \quad [\text{II.9}]$$

L'expression [II.9] est représentée par la courbe fig [II.4] qui peut être approximée par une expression analytique de la forme

$$E(t) = E_0 - E_m \cos \frac{4\pi t}{T} \quad [\text{II.10}]$$

où E_0 valeur moyenne de $E(t)$

E_m : est l'amplitude maximale des fluctuations d'énergie saisonnières
 T : durée de l'année en jours.

D'après la courbe fig [II.4] on reçoit un excès d'énergie ΔW^+ au printemps et en automne et un creux d'énergie ΔW^- en été et en hiver.

Si à première approche on suppose qu'il y a compensation des variations saisonnières.

$$\Delta W^+ = \Delta W^- = \Delta W$$

De plus si les batteries installées ne comportent pas de perte par autodécharge. L'excès d'énergie aura comme expression

$$\Delta W = \eta_a \eta_p S_T \int_{T/8}^{3T/8} [E(t) - E_0] dt \quad [\text{II.11}]$$

Avec $E(t) = E_0 - E_m \cos \frac{4\pi t}{T}$

- On intègre on trouve que

$$\Delta W = 58 \cdot \eta_a \eta_p S_T E_m \quad [\text{II.12}]$$

La valeur de E_m est déterminée de la fig (II, 4)

$$E_m = 0,06 E_0$$

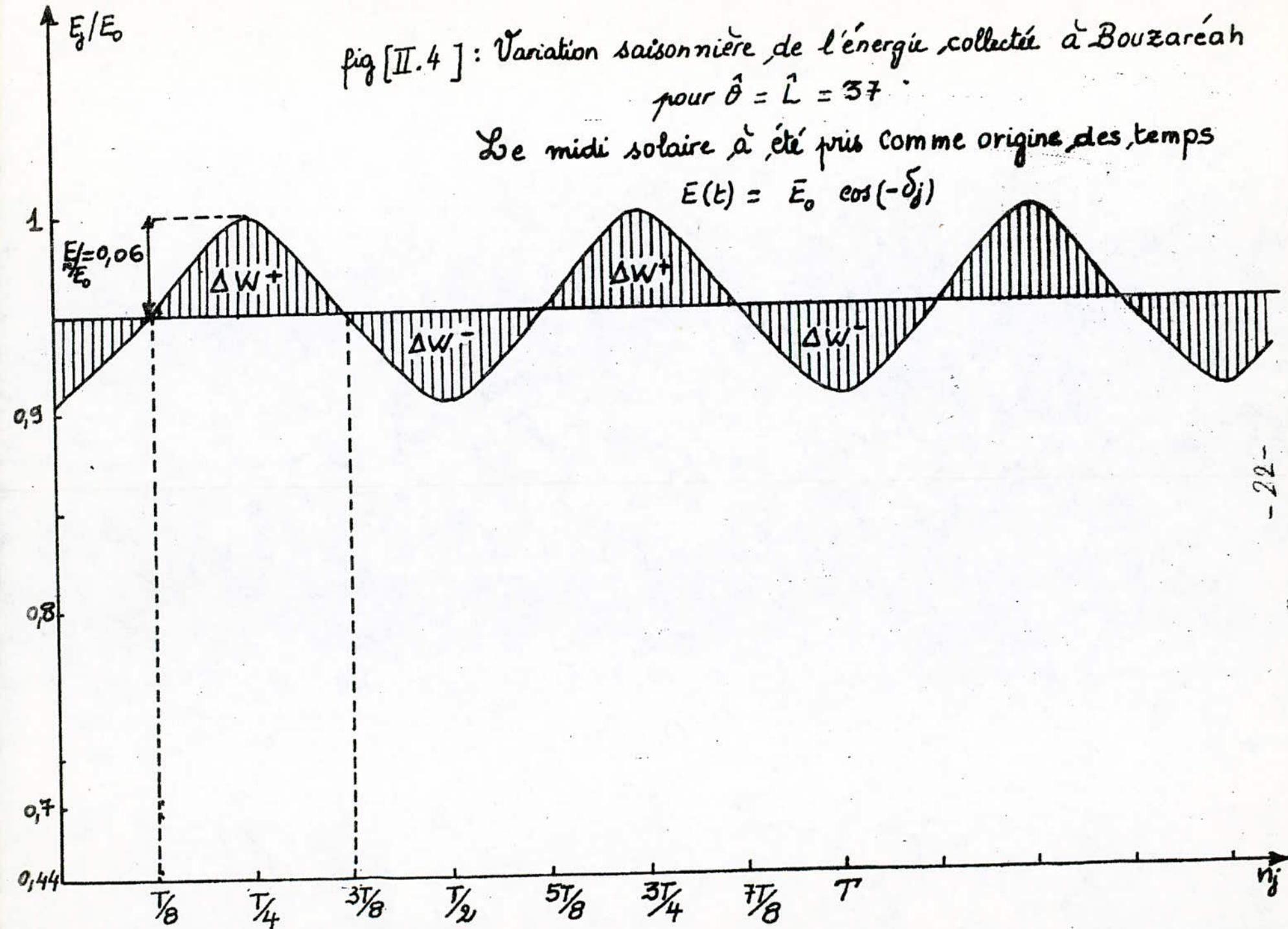
La capacité nécessaire pour le stockage du surplus sous une tension des batteries [$U_0 = 12V$] est :

$$C_2 \geq \frac{\Delta W}{U_0} \Rightarrow \quad [\text{II.13}]$$

fig [II.4] : Variation saisonnière de l'énergie collectée à Bouzaréah
 pour $\hat{\theta} = \hat{L} = 37^\circ$

Le midi solaire a été pris comme origine des temps

$$E(t) = \bar{E}_0 \cos(-\delta_j)$$



La capacité totale des accumulateurs s'élève à :

$$C_T = C_1 + C_2 = 1585 \text{ A.H}$$

Conclusion :

Ce chapitre nous a permis d'estimer la taille d'une installation de pompage de faible puissance avec stockage électrique pour un fonctionnement nominal.

On constate que le nombre de panneaux est très élevé ainsi que la capacité des accumulateurs est très grande ce qui conduit à un nombre important de batteries qui nécessitent plus de maintenance et l'application de la régulation électronique

L'avantage est le fonctionnement du système au voisinage de ses valeurs nominales, ce qui donne un bon rendement.

En pratique, Il est préférable d'augmenter le nombre de pompes fonctionnant au "fil du soleil" en couplage direct.

Le stockage de l'eau est mieux adapté que celui de l'électricité du point de vue de sa gestion à moyen terme.

CHAP III : ÉTUDE THÉORIQUE DES PARTIES ESSENTIELLES DE LA CHAÎNE

Dans ce chapitre nous abordons l'étude de la possibilité d'effectuer une alimentation correcte des moteurs à courant continu en couplage direct moyennant certaines conditions de charge.

III.1 Couplage direct entre le générateur [PV] et le moteur

Sous un flux ϕ [W/m^2] et une température T les panneaux solaires sont caractérisés par une courbe de puissance (V_p, I_p) fig [IV.3]

$$V_p = f_{\phi, T}(I_p) \quad \text{Avec } \begin{cases} V_p \leq V_{co} [I_p = 0] \\ I_p \leq I_{cc} [V_p = 0] \end{cases} \quad [III.1]$$

Dans un moteur à courant continu le courant I_m demandé est fonction de la tension d'alimentation et du couple résistant de charge.

$$I_m = g[V_m, C_r] \quad [III.2]$$

Lors du couplage direct du moteur aux panneaux solaires on a l'égalité des courants et des tensions.

$$I_m = I_p \quad ; \quad V_m = V_p$$

A partir des équations [III.1] et [III.2] on en déduit

$$V_m = f_{\Phi, T}(I_m) \quad [III.3]$$

$$I_m = g(V_m; C_r) \quad [III.4]$$

La relation (III.3) montre que pour une température donnée on peut trouver le flux Φ correspondant pour chaque couple (V_m, I_m) . L'expression (III.4) va être examinée pour chaque type de moteur.

III.2. Equations des moteurs à courant continu.

Dans la deuxième étape on explicite les équations électriques et mécaniques pour trois types de moteurs à C.C.

- Moteur à aimant permanent
- Moteur série
- Moteur shunt

Le moteur à excitation séparée va créer le problème de l'adaptation à tous les niveaux du flux soigné entre les bobines utilisées pour l'excitation et l'inducteur.

III.3 Equations de base :

Les équations électriques et mécaniques d'un moteur à C.C sont :

$$V_m - R_a I_a = K' \Phi_{Im} N \quad [III.5]$$

$$C_e = K'' \Phi_{Im} I_a \quad [III.6]$$

Avec $K' \Phi_{Im} N$: f.c.e.m. du moteur.

Φ_{Im} : flux d'excitation.

R_a, I_a : résistance et courant d'induit.

K', K'' constantes du moteur

III.3.1 Cas du moteur à aimant permanent.

$$\Phi_m = \text{const} ; I_a = I_m$$

$$V_m - R_a I_m = K' \Phi_m N \quad [\text{III.7}]$$

$$C_e = K'' \Phi_m I_m \quad [\text{III.8}]$$

III.3.2 Moteur série

$$I_a = I_m ; \Phi_m = K_1 I_m$$

d'où

$$V_m - R_a I_m = K' K_1 I_m N \quad [\text{III.9}]$$

$$C_e = K'' K_1 I_m^2 \quad [\text{III.10}]$$

III.3.3 Moteur shunt :

Soient R_f, I_f la résistance et le courant inducteur.

$$I_f = \frac{V_m}{R_f} ; \Phi_m = K_2 \frac{V_m}{R_f}$$

$$I_m = I_a + I_f$$

$$V_m - R_a \left(I_m - \frac{V_m}{R_f} \right) = K' K_2 \frac{V_m N}{R_f}$$

$$\Rightarrow V_m \left(R_a + R_f - K' K_2 N \right) = R_a R_f I_m \quad [\text{III.11}]$$

L'équation du couple est donc :

$$C_e = K'' K_2 \frac{V_m}{R_f} \left[I_m - \frac{V_m}{R_f} \right]$$

$$\text{Soit } \alpha_N = \frac{R_a}{R_a + R_f - K'K_2 N}$$

$$\text{d'où } C_E = K''K_2 \alpha_N (1 - \alpha_N) I_m^2 \quad [\text{III.12}]$$

Pour chaque valeur de la vitesse N choisie comme paramètre On détermine le couple résistant $C_r = f(N)$ égal au couple moteur C_E à l'équilibre. A partir de l'équation mécanique on détermine le courant I_m , l'équation électrique nous donne la tension V_m . Pour chaque couple (V_m, I_m) On peut déterminer le flux lumineux Φ de l'équation $V_m = f_{\Phi, T}(I_m)$

III.4 Courbe de fonctionnement de l'ensemble motopompe

Indépendamment du générateur [P.V], il est possible d'associer à l'ensemble moteur-pompe un couple de valeurs (V_m, I_m) propre correspondant à chaque vitesse de rotation

Le problème posé au couplage direct ne se résoud ni en tension ni en courant mais seulement en transfert de puissance.

Le point de fonctionnement du générateur et le groupe sera obtenu par l'intersection des deux courbes $[I_g, V_g]$ et $[I_m, V_m]$ fig [IV.11]

- A flux solaire variable le point de fonctionnement se déplace le long de la courbe de fonctionnement $[T, U, V]$ zone de puissance maximale du générateur fig [IV.11]

- Lors de l'arrêt du moteur il apparait un effet d'hystérésis

III.5 Démarrage des moteurs à c.c en couplage direct

Le problème de démarrage du groupe motopompe est un facteur important pour son autonomie.

III.5.1 : Equations électriques de démarrage des moteurs à c.c

- A tension constante, les moteurs à c.c nécessitent une procédure spéciale de démarrage destinée à limiter le courant dans les bobinages.

Lors du couplage direct cette limitation est réalisée automatiquement car l'impédance $[Z_m]$ du moteur est très faible au démarrage donc le générateur fonctionne comme source de courant dans la zone OS fig [IV.10]

Dans le cas du moteur série et à aimant permanent.

- Au démarrage la vitesse est nulle ($N=0$)

Les équations électriques [III.7] et [III.9] deviennent:

$$V_m = R_a I_m \quad \text{[III.13]}$$

Cas du moteur shunt :

$$V_m = \frac{R_a R_f}{R_a + R_f} \cdot I_m \approx R_a I_m \text{ car } R_a \ll R_f \quad \text{[III.14]}$$

Les équations [III.13] et [III.14] montrent que les panneaux sont court-circuités sur une résistance d'induit très faible et le point de fonctionnement suit la droite OS.

III.5.2- Couple de démarrage

Sur la fig [IV.11]; I_{ps} est le courant de démarrage atteint pour un flux lumineux Φ_S tel que le couple de démarrage du moteur est égal au couple résistant de la charge.

a) Cas du moteur à aimant permanent :

Au démarrage le couple est : $C_D = K'' \Phi_m I_{ps}$ [III.15]

b) cas du moteur série : $C_D = K'' K_1 I_{ps}^2$ [III.16]

c) cas du moteur shunt : $C_D = \frac{K'' K_2 R_a R_f}{(R_a + R_f)^2} I_{ps}^2$ [III.17]

III.5.3 Comparaison des trois types de moteurs

Les expressions [III.15], [III.16] et (III.17) montrent que c'est le moteur à aimant permanent qui démarre le mieux possible en couplage direct et non pas le moteur série qui utilise une partie du courant pour générer le flux d'excitation.

Le moteur shunt est à rejeter pour le couplage direct car il ne peut démarrer qu'à courant élevé du fait que la résistance d'induit est trop faible devant celle de l'inducteur qui reçoit un courant faible et par conséquent ne peut créer un champ magnétique suffisant pour le démarrage.

III.6 Condition de bonne adaptation [Général-mot]

Une bonne adaptation en transfert d'énergie entre le générateur et le groupe implique l'augmentation du rendement de la chaîne de pompage.

Elle exige deux conditions essentielles .

- 1- faible couple résistant de charge au démarrage.
- 2- Une courbe de fonctionnement la plus verticale possible region D fig [III.1].

III.6.1 Etude des conditions de la charge.

Dans [III.6] la deuxième condition veut dire analytiquement que la tangente $\gamma = \frac{dV_m}{dI_m}$, doit être la plus faible possible

dans la zone D fig [III.1] quelle que soit la vitesse de rotation

En effet ; soit $C_T = h(N)$ caractéristique mécanique de la charge .

De l'équation [III.8] on tire :
$$\frac{dI_m}{dN} = \frac{1}{K'' \Phi_m} \cdot \frac{dc}{dN} \quad [III.18]$$

De l'équation (III.7) on déduit :
$$\frac{dV_m}{dI_m} = R_a + K' \Phi_m \cdot \frac{dN}{dI_m}$$

donc :
$$\frac{dV_m}{dI_m} = R_a + K'' K' \Phi_m^2 \frac{1}{dc/dN} \quad [III.19]$$

Dans l'équation [III.19] on constate que $\gamma = \frac{dV_m}{dI_m}$ est la plus faible possible quand $\gamma' = \frac{dc}{dN}$ est la plus grande possible dans la zone de fonctionnement .

De même, la première condition exige que :

- a) le couple de démarrage soit le plus faible possible.
- b) L'accélération $\gamma'' = \frac{dN}{dt}$ doit être élevée lors du démarrage pour atteindre la zone D fig [III.1]

Lors de la montée en vitesse au démarrage on a :

$$C_E - C_r = 2\pi J \cdot \frac{dN}{dt}$$

où J : moment d'inertie de la partie tournante.

C_E : couple moteur, croît avec le courant I_p , donc avec le flux lumineux ϕ

Si on désire avoir $\gamma'' = \frac{dN}{dt}$ très élevé, il suffit que

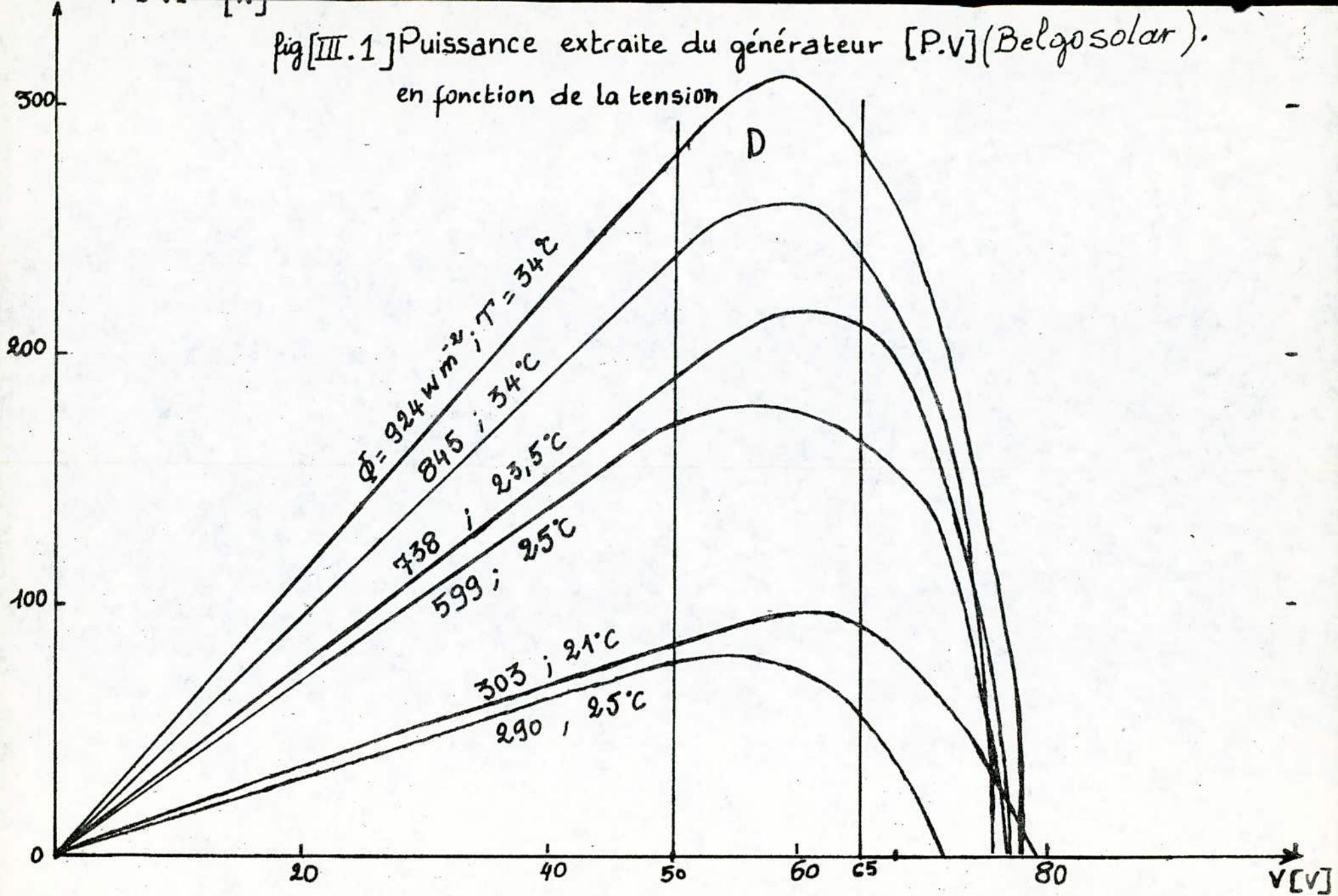
le couple résistant de la charge varie très peu avec la vitesse N au démarrage ; Soit $\frac{dC}{dN}$ petit à faible vitesse.

Les trois conditions ainsi définies.

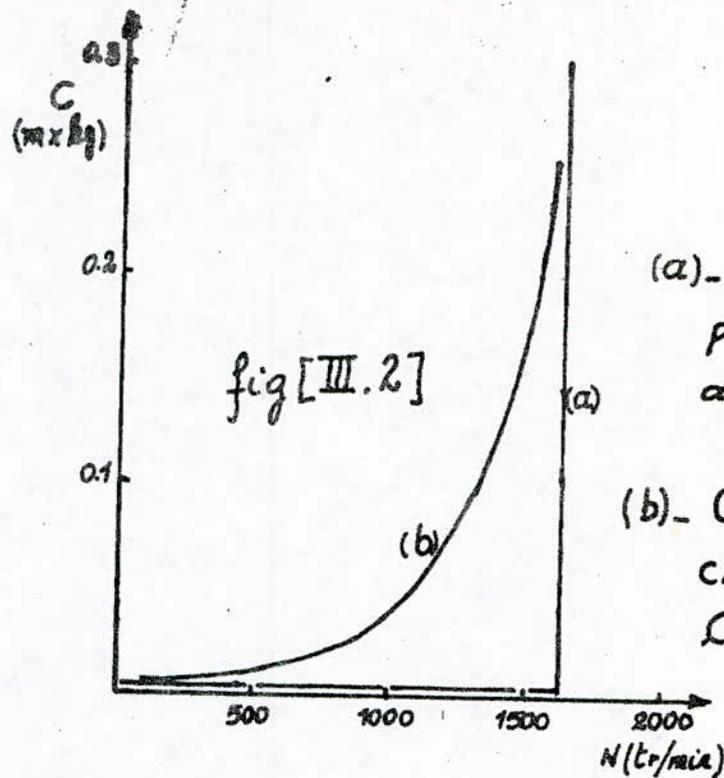
1. Faible valeur du couple de démarrage
2. Faible valeur de $\gamma' = \frac{dC}{dN}$ à faible vitesse.
3. Forte valeur de $\gamma' = \frac{dC}{dN}$ dans le régime d'utilisation

conduisent à la définition d'une charge mécanique idéale fig [III.2.a] pour le couplage direct des moteurs à C.C ; Mais en pratique toute caractéristique mécanique de charge se rapprochant de la courbe idéale fig [III.2.b] peut vérifier

Fig [III.1] Puissance extraite du générateur [P.V] (Belgosolar).
en fonction de la tension



ces trois conditions de l'adaptation :



(a) - Courbe idéale pour une bonne adaptation.

(b) - Courbe de charge de type centrifuge.

III.7 Conclusion :

Un choix judicieux du moteur à c.c conduit à des courbes de fonctionnement optimisées, ainsi que le choix de la charge permet d'obtenir des caractéristiques couple - vitesse $C_f = f(N)$ assez proches de la courbe idéale parfaitement adaptée.

On constate sur la fig [III.2] que toute charge de type centrifuge est caractérisée par une courbe (b) fig (III.2.b) se rapprochant de la courbe idéale ce qui est le cas de notre étude "pompe centrifuge entraînée par un moteur à aimant permanent".

DEUXIÈME

PARTIE

PARTIE EXPÉRIMENTALE

CHAP IV : ETUDE EXPERIMENTALE DE LA CHAINE DE POMPAGE EN COUPLAGE DIRECT

La partie expérimentale a été réalisée à la station S.E.S de Bouzareah dont le site est défini par les données suivantes:

ALTITUDE	345 m
LATITUDE	36° 48' 8 Nord
LONGITUDE	0° 08' 53 est

Le système de pompage solaire est composé de trois éléments essentiels.

- Générateur photovoltaïque
- Moteur à aimant permanent
- Pompe centrifuge

IV.1 Conception du générateur photovoltaïque

IV.1.a Test des panneaux

Avant d'installer le générateur (P.V) nous avons effectué des essais sur chaque module que nous voulons utiliser de type Belgo-solar.

Sous un flux lumineux $\Phi = 738 \text{ W m}^{-2}$ et une température ambiante $T = 23^\circ\text{C}$, on court-circuite le module sur un ampèremètre. On mesure le courant de court-circuit $I_{cc} = 1,3 \text{ A}$.

Le module étant ouvert, on branche un voltmètre à ses bornes et on mesure la tension à vide $U_0 = 12,9 \text{ V}$

Ce test a été fait sur plusieurs modules, le but étant de choisir des modules identiques qui ont la même tension à vide U_0 et le même courant de court-circuit pour la connexion en série et en parallèle.

IV.1.b Évaluation du nombre de modules

Le moteur à courant continu à aimant permanent de type [AH W 7] porte sur sa plaque signalétique les valeurs nominales suivantes.

$$\begin{aligned} V_{nom} &= 60V & ; & & I_{nom} &= 6,2 A \\ N_{nom} &= 2500 \text{ tr/min} & ; & & P_u &= 325 W \end{aligned}$$

- On détermine la puissance nominale absorbée par le moteur, elle vaut $P_n = 372 \text{ W}$ qui doit être égale ou inférieure à la puissance crête du générateur (P.V).

Comme chaque module délivre une puissance crête de $P_{max} = 33 \text{ W}$ sous une tension $V_{max} = 16,5 \text{ V}$ et un courant $I_{max} = 2 \text{ A}$.

La configuration la plus simple possible que l'on puisse adopter est la suivante :

- On place trois branches en parallèle pour assurer le courant nominal du moteur $I_{nom} = 6,2 \text{ A}$

- Chaque branche contient quatre modules pour générer la tension nominale $V_m = 60 \text{ V}$ dans la zone de puissance maximale du générateur [P.V].
Voire figure [IV.1]

"GÉNÉRATEUR PHOTOVOLTAÏQUE"

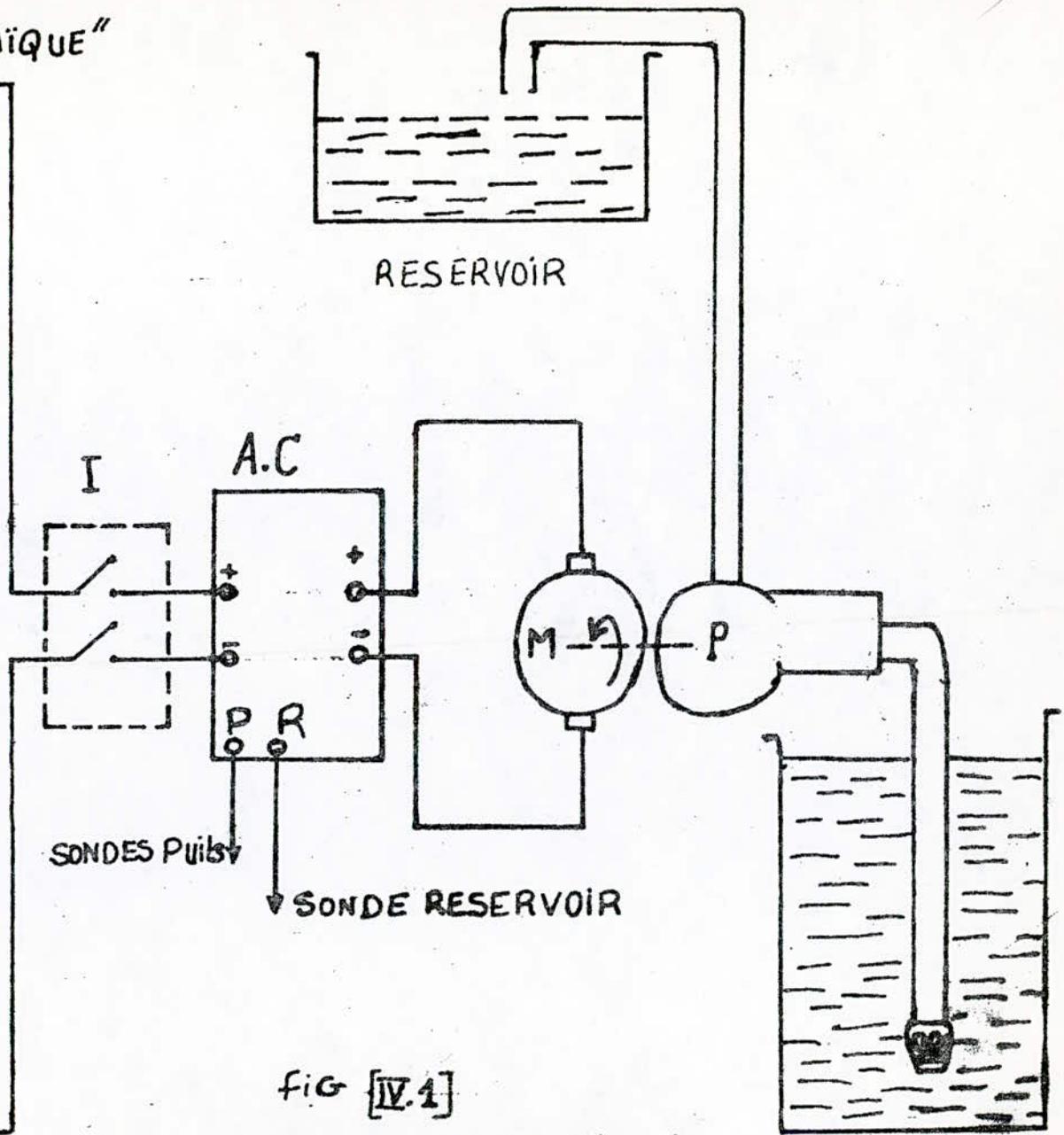
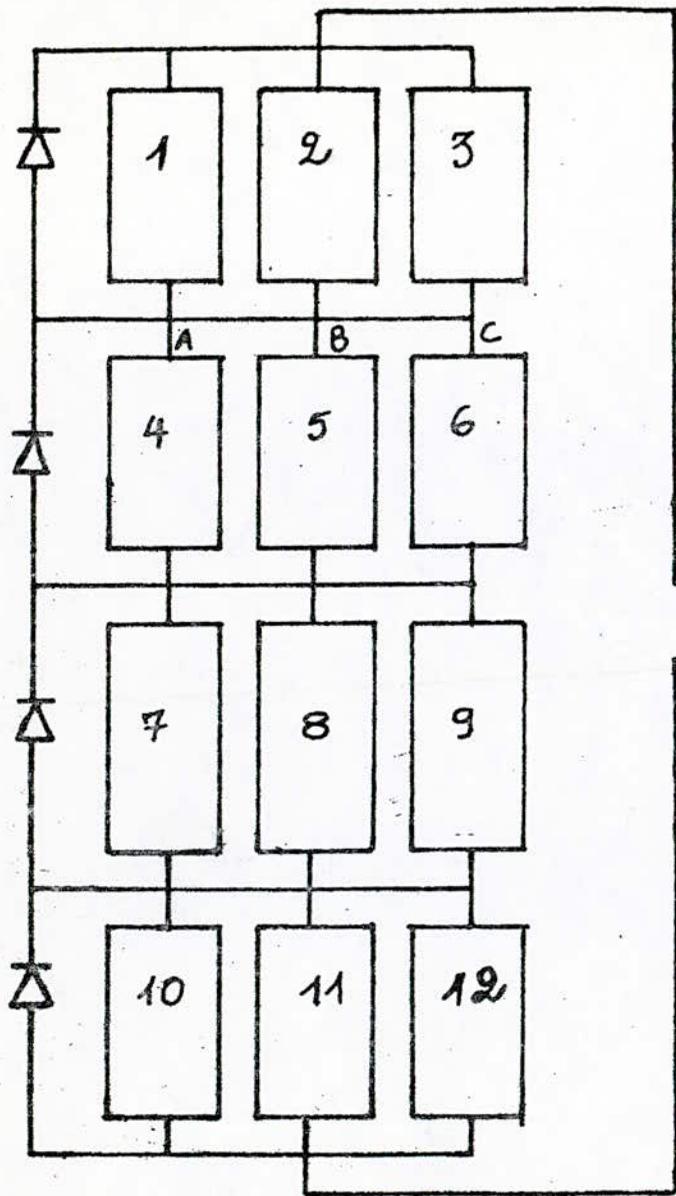


FIG [IV.1]

INSTALLATION DE POMPAGE.
"EN COUPLAGE DIRECT"

IV.1.c Protection des panneaux solaires.

En pratique les modules solaires ne sont pas rigoureusement identiques, des déséquilibres peuvent survenir. Il est alors conseillé d'envisager des lignes d'équilibrage correspondant à des courts-circuits des points A, B, C se trouvant au même potentiel (Fig. 1)

Ainsi que des protections par des diodes placées en parallèle avec chaque rangée sont nécessaires ; Ce qui permet le passage d'un important courant inverse sous une faible tension inverse pour éviter les problèmes de points chauds si l'un des modules est défectueux ou à l'obscurité

IV.1.d Installation des panneaux solaires sur le site.

Un certain nombre de précautions doivent être prises lors de l'installation du générateur [P.V.]

1/ Surlever les panneaux d'une hauteur supérieure à un mètre pour éviter les risques d'ombrage et l'albédo de la terre.

2/ Un espace d'air suffisant doit être prévu pour la ventilation naturelle entre les modules et le sol.

3/ L'angle d'inclinaison des panneaux est voisin de la latitude du lieu $\hat{\theta} = \hat{\lambda} = 37^\circ$ (Région d'ALGER)

4/ Pour faciliter l'autonettoyage un angle minimum de 10° doit être prévu.

IV.4.8 Relevé de la caractéristique du générateur [P.V]

La méthode utilisée pour tracer la caractéristique [I, V] de puissance consiste à balayer tous les points de fonctionnement à flux et température constants à l'aide d'une charge résistive variable connectée à ses bornes.

Dans la journée on relève plusieurs caractéristiques [I, V] pour différents flux et température. f [IV.]

IV.2 Méthode d'étude de la chaîne.

Du le coût actuel des panneaux solaires, nettement supérieur à celui des autres composants ; Nous avons dans tous les cas cherché à optimiser le rendement de la chaîne.

Pour faire cette étude, on peut utiliser trois méthodes: [7]

1. Méthode mathématique.
2. Méthode graphique.
3. Méthode expérimentale

1/ Méthode mathématique: elle consiste à modéliser tous les composants de la chaîne, et à étudier mathématiquement les points de fonctionnement en cherchant à optimiser le rendement.

2/ Méthode graphique: elle consiste à l'exploitation des abaques des caractéristiques des composants qui sont généralement connus. Dans notre cas c'est cette méthode qui a été adoptée.

3/ Méthode expérimentale: elle consiste à réaliser différents ensembles et à les comparer. Cette méthode est longue et onéreuse.

IV.2.1. Description de la méthode graphique d'analyse

- Nous cherchons pour la chaîne de pompage solaire de puissance crête installée $P_{crête} = 396 \text{ W}$ à trouver une relation entre le flux solaire $\Phi(t)$ et le débit de la pompe $D(t)$

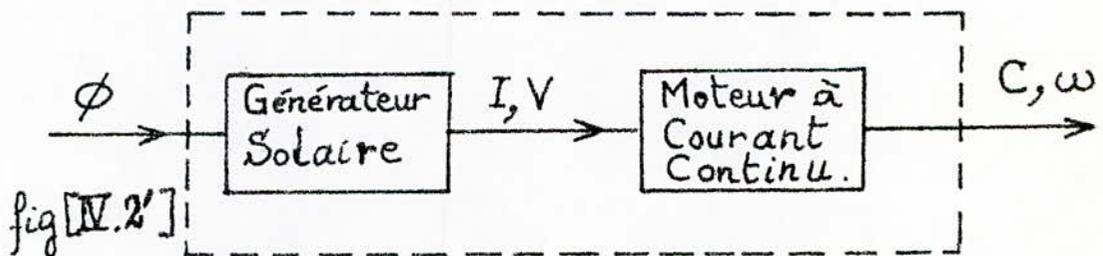
et par conséquent la quantité journalière d'eau pompée.

Pour étudier le fonctionnement d'un groupe motopompe; On cherche à déterminer le couple et la vitesse de rotation; Il suffit pour cela de chercher l'intersection des courbes donnant le couple en fonction de la vitesse pour le moteur et la pompe.

Cette méthode est applicable lorsque le moteur est alimenté par une source de tension constante. Lorsque la source est un générateur solaire, elle n'est pas directement utilisable, car ce dernier n'est pas une source de tension stable. Pour cela il faut introduire la notion du générateur mécanique équivalent.

IV.2.2. Notion du générateur mécanique équivalent [générateur - Moteur]

a) Schéma synoptique :



Cette notion consiste à déterminer le réseau des caractéristiques mécaniques $c = f(N)$ à flux solaire constant. Pour cela nous effectuons les étapes suivantes.

b) Détermination des caractéristiques mécaniques et électromécaniques du moteur.

1/ Mesure des pertes à vide et en charge.

Le moteur est découplé de la pompe, alimenté à tension réduite, on relève la tension, le courant et la vitesse à vide.

- A vide le moteur absorbe une puissance P_0 :

$$P_0 = P_m + P_f + P_j$$

où : $P_m = \beta N$ pertes mécaniques proportionnelles à la vitesse N

$P_f = \alpha U^2$ pertes fer proportionnelles au carré de la tension U

$P_j = R_a I_0^2$ pertes cuivre.

$R_a = 0,5 \Omega$ Résistance mesurée aux bornes d'induit du moteur

Tableau d'essai à vide

tension V_m (V)	10	20	30	40
courant I_m (A)	0,45	0,55	0,65	0,72
vitesse N [tr/min]	460	930	1400	1840
P_0 [W]	4,5	11	19,5	28,8

- A partir du tableau de l'essai à vide on relève le système d'équation suivant.

$$\begin{cases} P_{01} = R_a I_1^2 + \alpha U_1^2 + \beta N_1 & [1] \end{cases}$$

$$\begin{cases} P_{02} = R_a I_2^2 + \alpha U_2^2 + \beta N_2 & [2] \end{cases}$$

On calcule et on trouve les valeurs moyennes de α et β .

$$\alpha_{\text{moy}} = 9,2 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$$

$$B_{\text{moy}} = 7,7 \cdot 10^{-3} \text{ min/tr}$$

En charge, les pertes sont calculées par la formule suivante :

$$\Delta P = 0,5 I_m^2 + 9,2 \cdot 10^{-3} U_m^2 + 7,7 \cdot 10^{-3} N_m \quad [\text{IV.1}]$$

où ΔP : bilan des pertes de puissance en charge [Watt]

I_m : courant dans l'induit du moteur [A]

U_m : tension d'alimentation du moteur [V]

N_m : vitesse de rotation du moteur [tr.min⁻¹]

2°) Rendement du moteur η_m

$$\eta_m = 1 - \frac{\Delta P}{P_a} \quad [\text{IV.2}]$$

P_a : puissance absorbée par le moteur

ΔP : pertes en charge [IV.1]

3°) - Caractéristique mécanique et électromécanique du moteur.

Le moteur est alimenté à tension constante en faisant varier la charge. On note le courant et la vitesse.

Le couple utile est calculé par la formule suivante

$$C_u = \frac{\eta_m \cdot P_a}{\omega} \quad [\text{IV.3}]$$

ω : vitesse de rotation du moteur [rad/s]

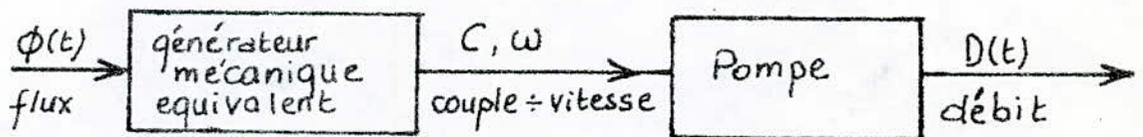
Les caractéristiques couple-vitesse à tensions constantes du moteur et la courbe couple-courant sont illustrées par la fig [IV.2].

- A l'aide du réseau couple-vitesse et de la droite couple-courant on en déduit dans le plan courant-tension les courbes reliant l'intensité à la tension du moteur à vitesses constantes fig [IV.2]

- Les points d'intersections de ces courbes avec celles du générateur tracés dans le même plan [I, V] fig [IV.3] permettent de déduire à flux solaire constant le couple en fonction de la vitesse fig [IV.4].

IV.2.3 - Couplage du générateur mécanique équivalent avec le récepteur [Pompe].

a) SCHÉMA SYNOPTIQUE.



b) Mesure de la caractéristique mécanique de la pompe.

Pour une hauteur [H.M.T = 5m], la caractéristique mécanique de la pompe s'obtient à l'équilibre entre le couple moteur et le couple résistant de la pompe aux points de fonctionnement du groupe, elle est donnée par la fig [IV.5]

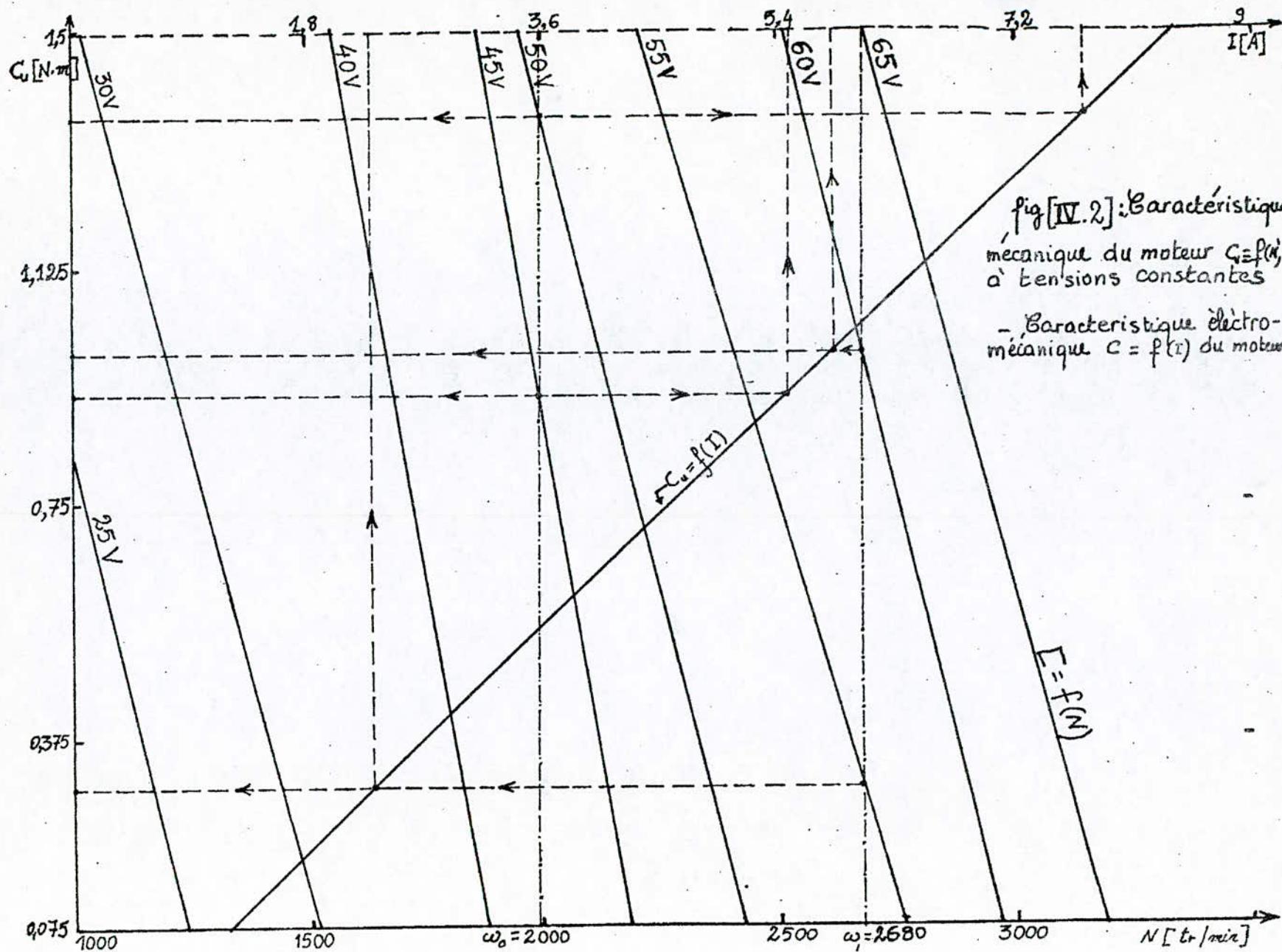
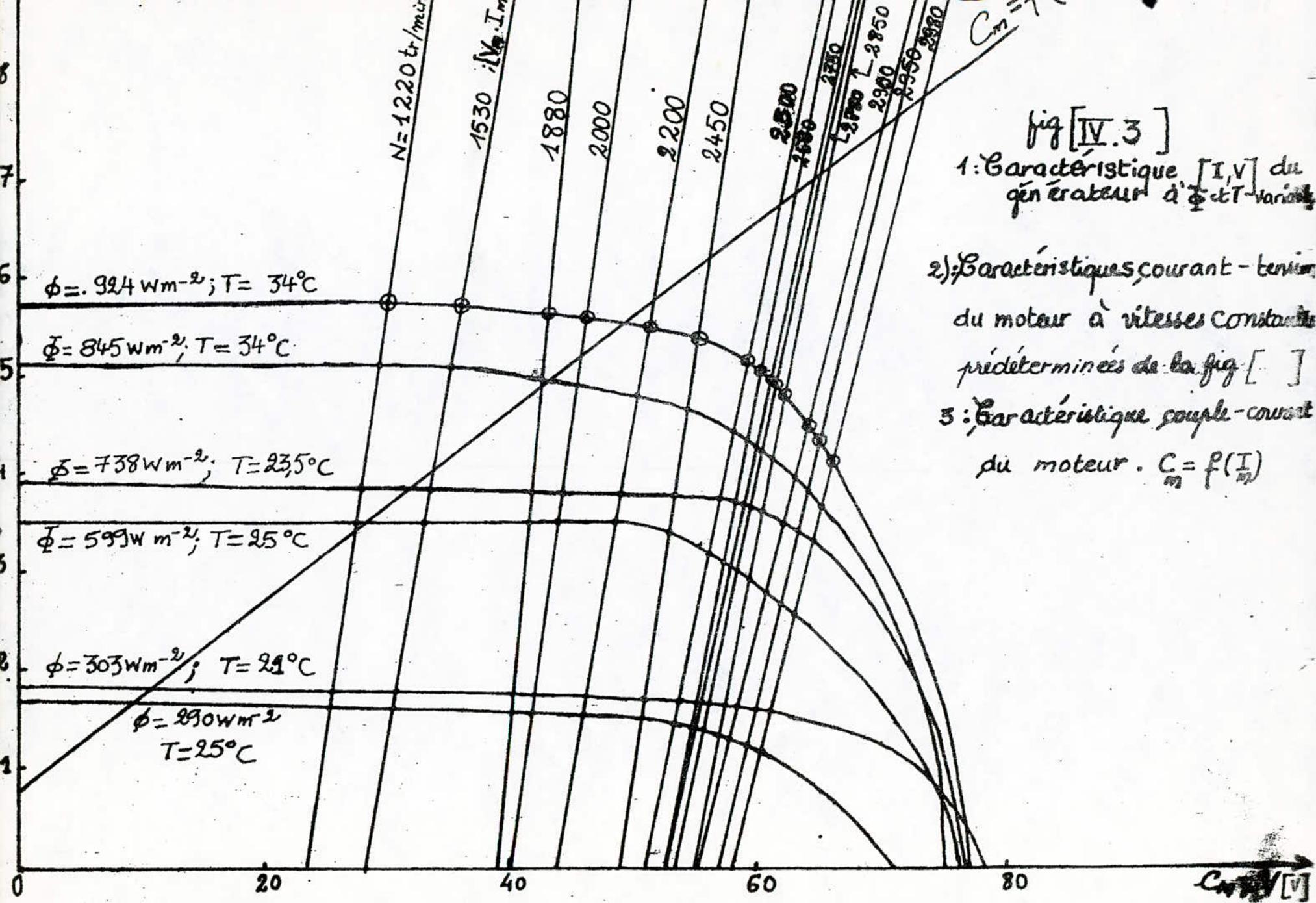


fig [IV.2]: Caractéristique
 mécanique du moteur $C = f(I)$,
 à tensions constantes
 - Caractéristique électro-
 mécanique $C = f(\omega)$ du moteur



C_u [N.m]

- Fig [IV.4] :
1. Caractéristiques mécaniques $C_g = f_1(N)$ du générateur mécanique, équivalent à flux solaire constant
 2. $C_r = f_2(N)$: caractéristique mécanique de la pompe
[H.M.T] = 5 mètres

1,125

$\Phi = 924 \text{ W m}^{-2}, T = 34^\circ\text{C}$

$\Phi = 845 \text{ W m}^{-2}, T = 34^\circ\text{C}$

$\Phi = 738 \text{ W m}^{-2}, T = 23,5^\circ\text{C}$

$\Phi = 599 \text{ W m}^{-2}, T = 25^\circ\text{C}$

$\Phi = 303 \text{ W m}^{-2}, T = 21^\circ\text{C}$

$\Phi = 290 \text{ W m}^{-2}, T = 25^\circ\text{C}$

0,75

0,375

0

1000

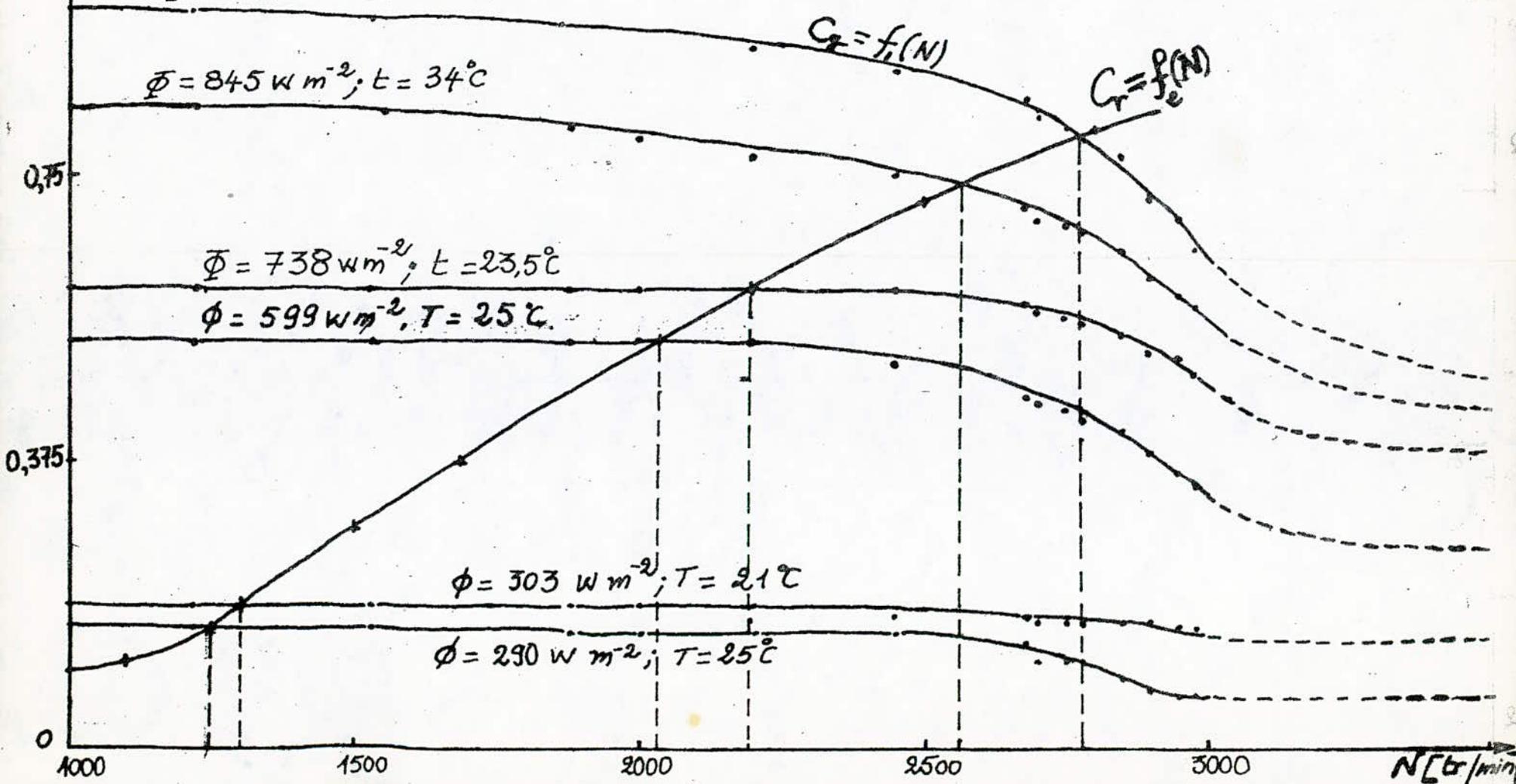
1500

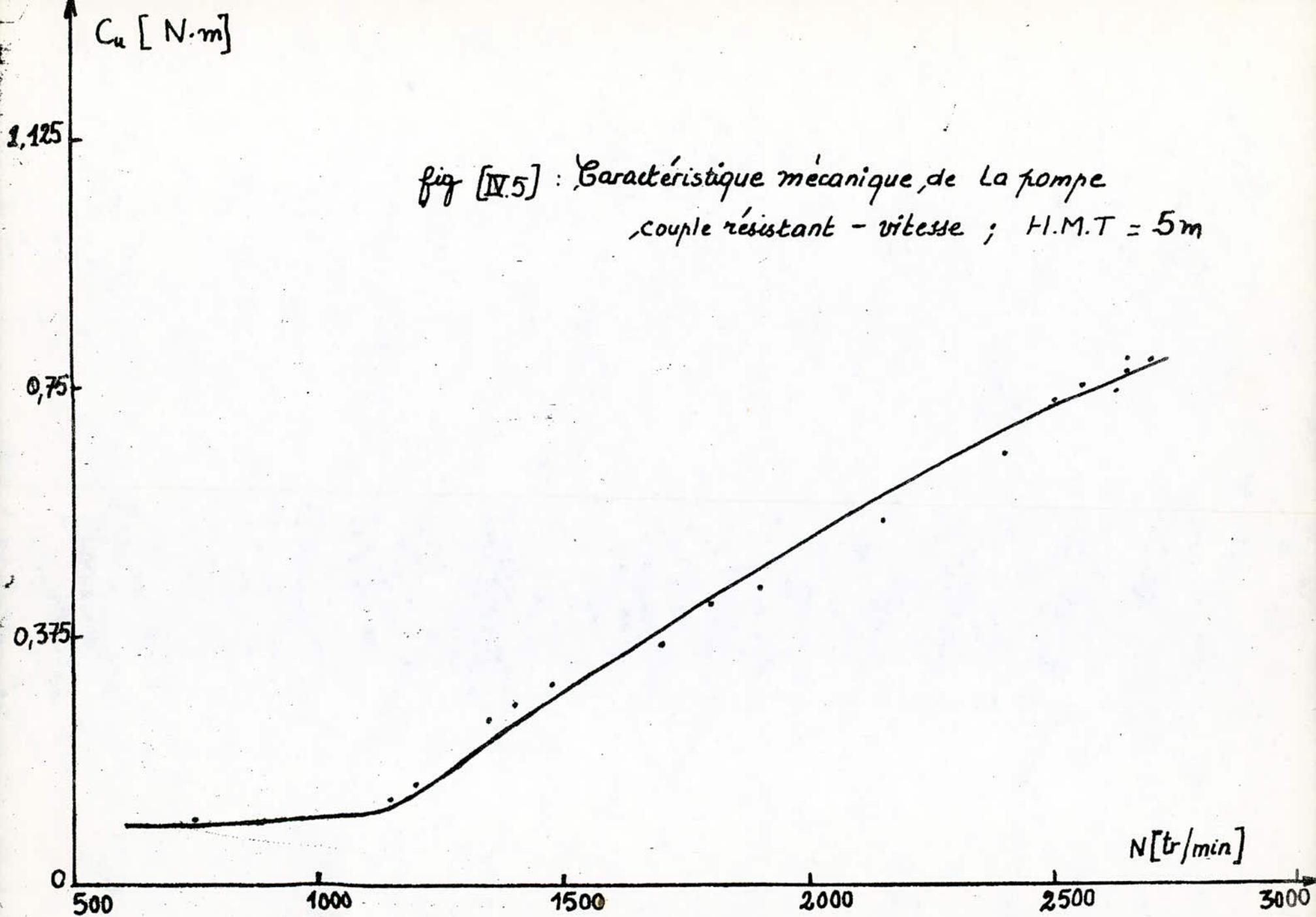
2000

2500

3000

N [tr/min]





c) Prédétermination de la courbe flux-vitesse du groupe

En cherchant l'intersection des caractéristiques mécaniques du générateur équivalent et de la pompe pour un flux solaire donné, on détermine le couple et la vitesse de l'ensemble une fois couple, fig [IV.4] et par conséquent la courbe prédéterminée flux lumineux-vitesse $\phi(N)$ fig [IV.6]

d) Caractéristique expérimentale débit-vitesse de la pompe
[H.M.T = 5m]

Pour une hauteur [H.M.T = 5m] On relève la variation du débit en fonction de la vitesse de la pompe qui est représentée par la fig [IV.7]

- À partir des courbes flux - vitesse fig [IV.6] et Débit - vitesse fig [IV.7] On déduit la courbe reliant le débit en fonction du flux solaire de la pompe pour [H.M.T = 5m] fig [IV.8]

Lorsqu'on connaît le flux journalier en fonction du temps $\phi(t)$, la caractéristique $D[\phi]$ nous permet de prédéterminer la courbe $D(t)$ fig [IV.9] et par conséquent le volume d'eau pompé quotidiennement.

$\phi [W/m^2]$

fig [IV.6] : caractéristique flux-vitesse $\Phi(N)$ prédéterminée du réseau C [N]
à $\phi = \text{const}$

998

500

210

0

500

1000

1200

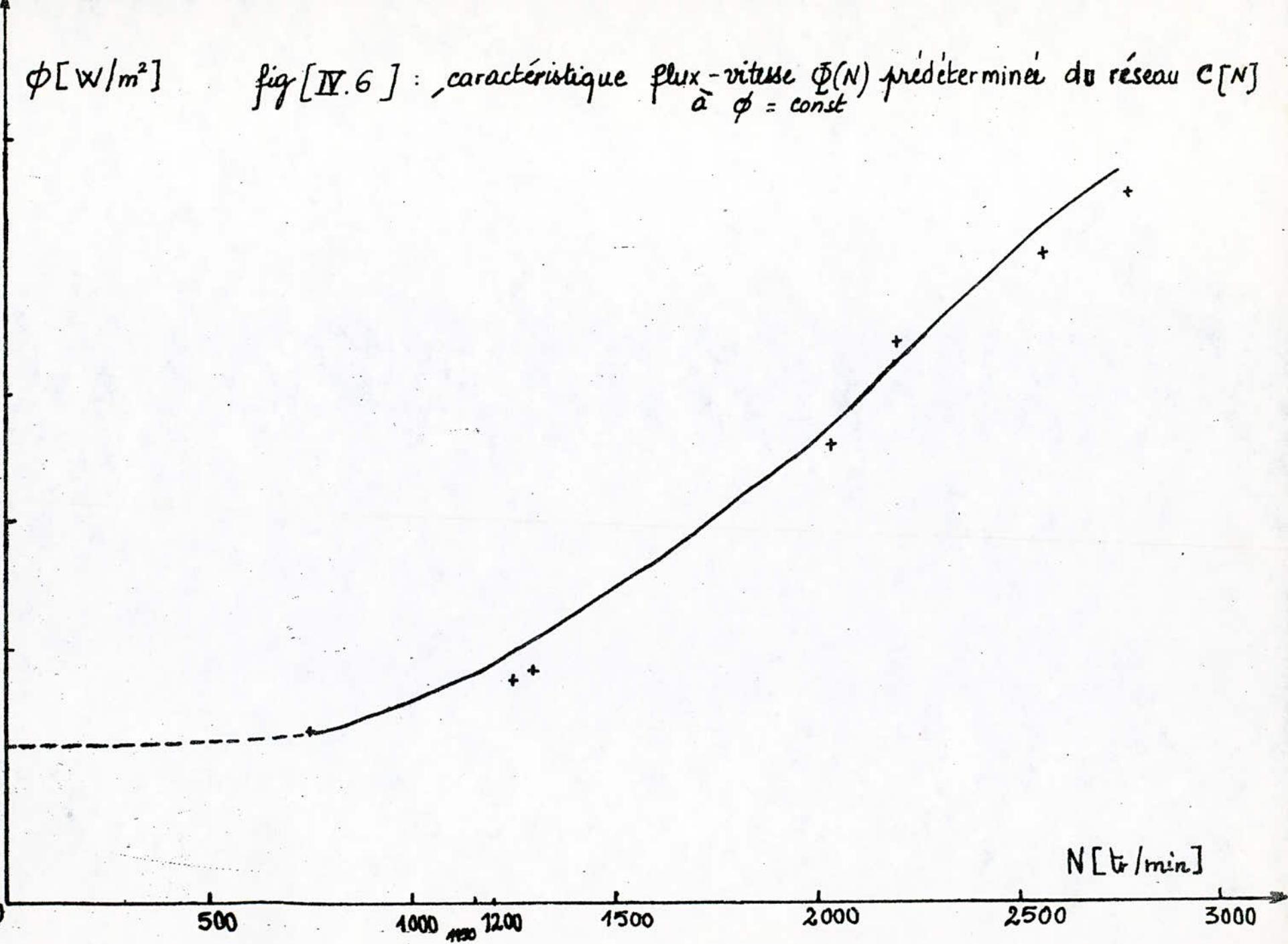
1500

2000

2500

3000

N [tr/min]



$D [m^3/R]$

fig [IV.7] - Caractéristique débit - vitesse
pour la pompe. HMT = 5 m.

5,4

3,6

1,8

0

500

1000

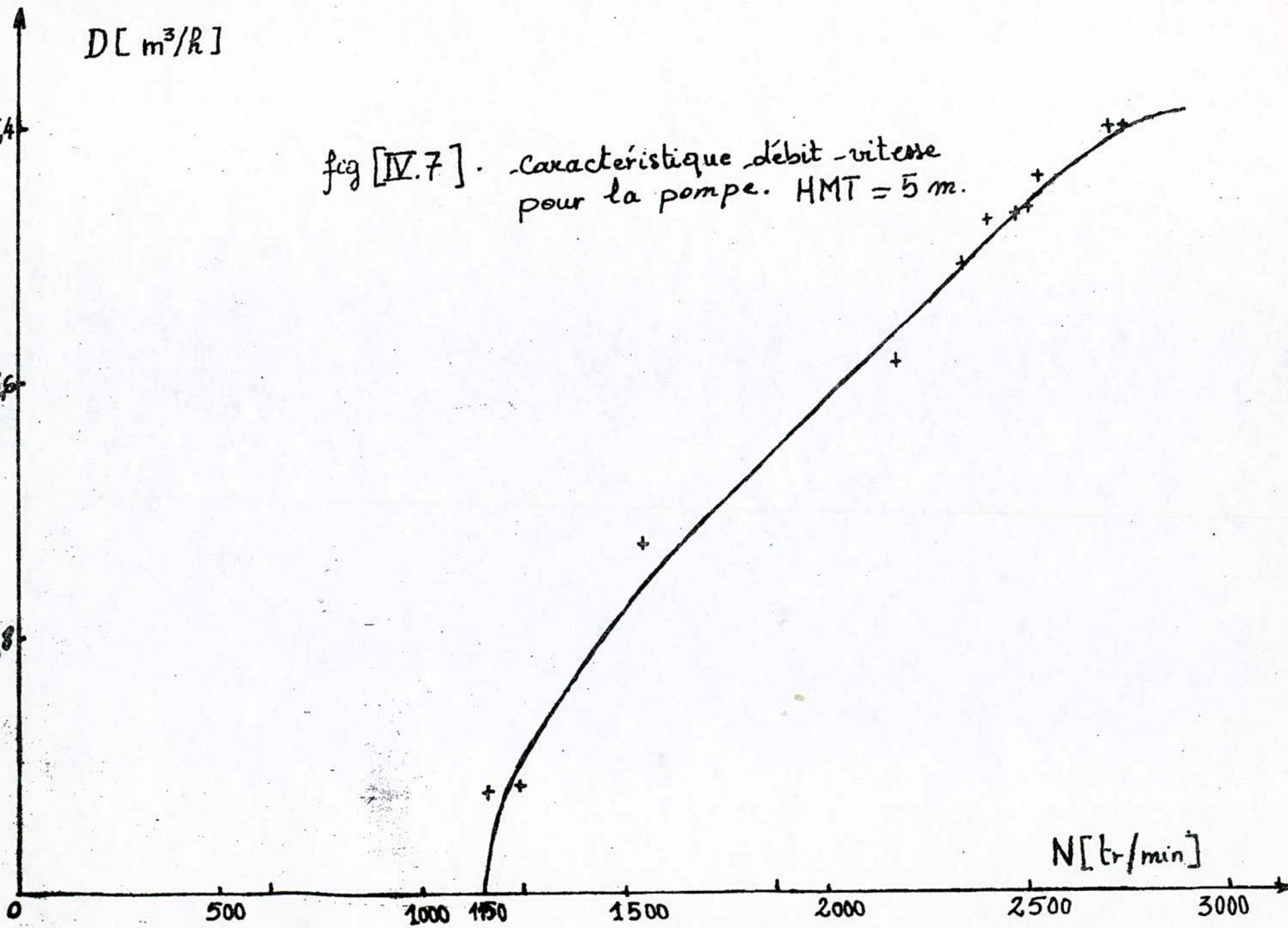
1500

2000

2500

3000

$N [tr/min]$



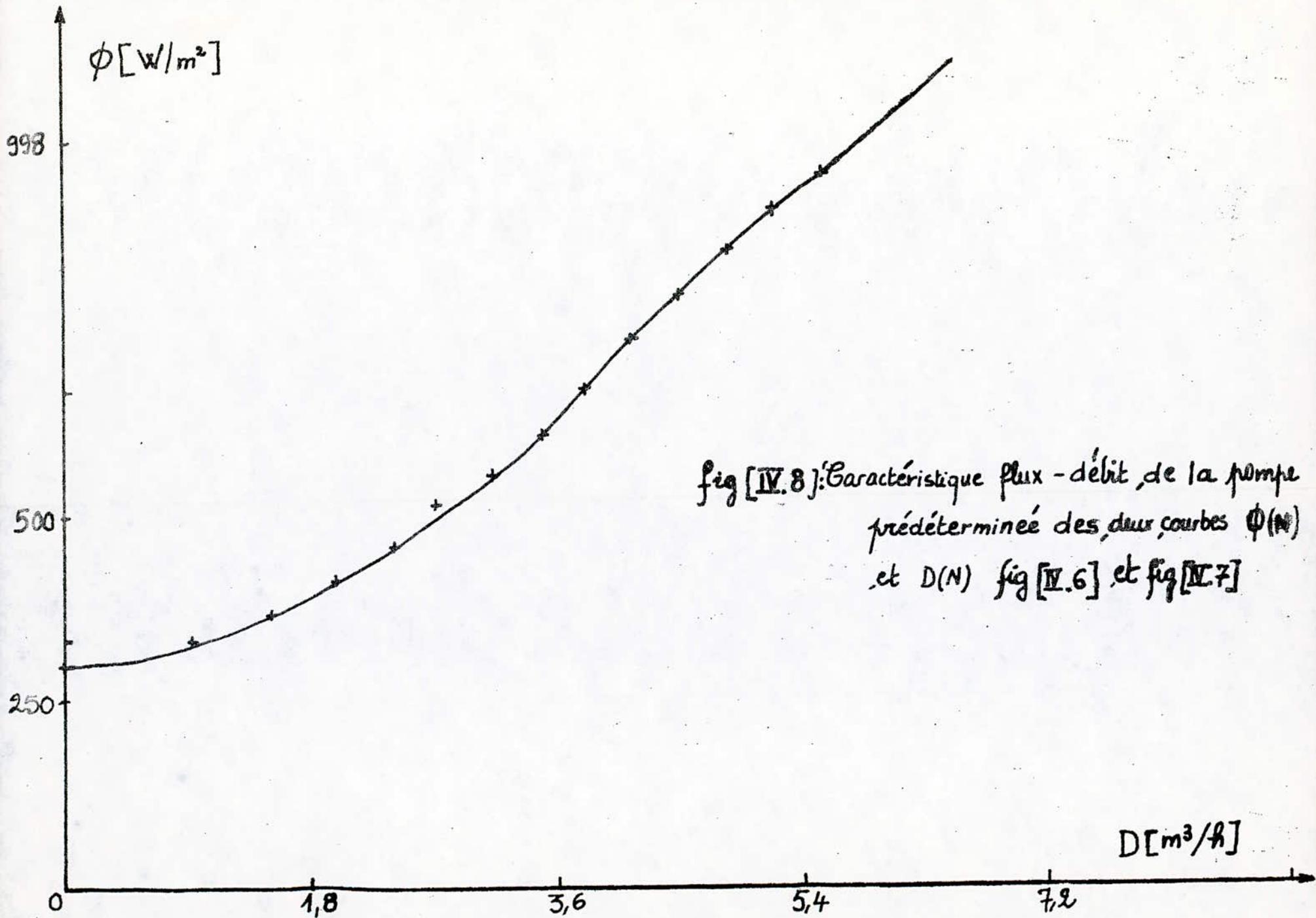


fig [IV.8]: Caractéristique flux - débit, de la pompe
prédéterminée des deux courbes $\phi(N)$
et $D(N)$ fig [IV.6] et fig [IV.7]

$\Phi_{\text{flux}} \phi(t)$

$D(t) [m^3/h]$

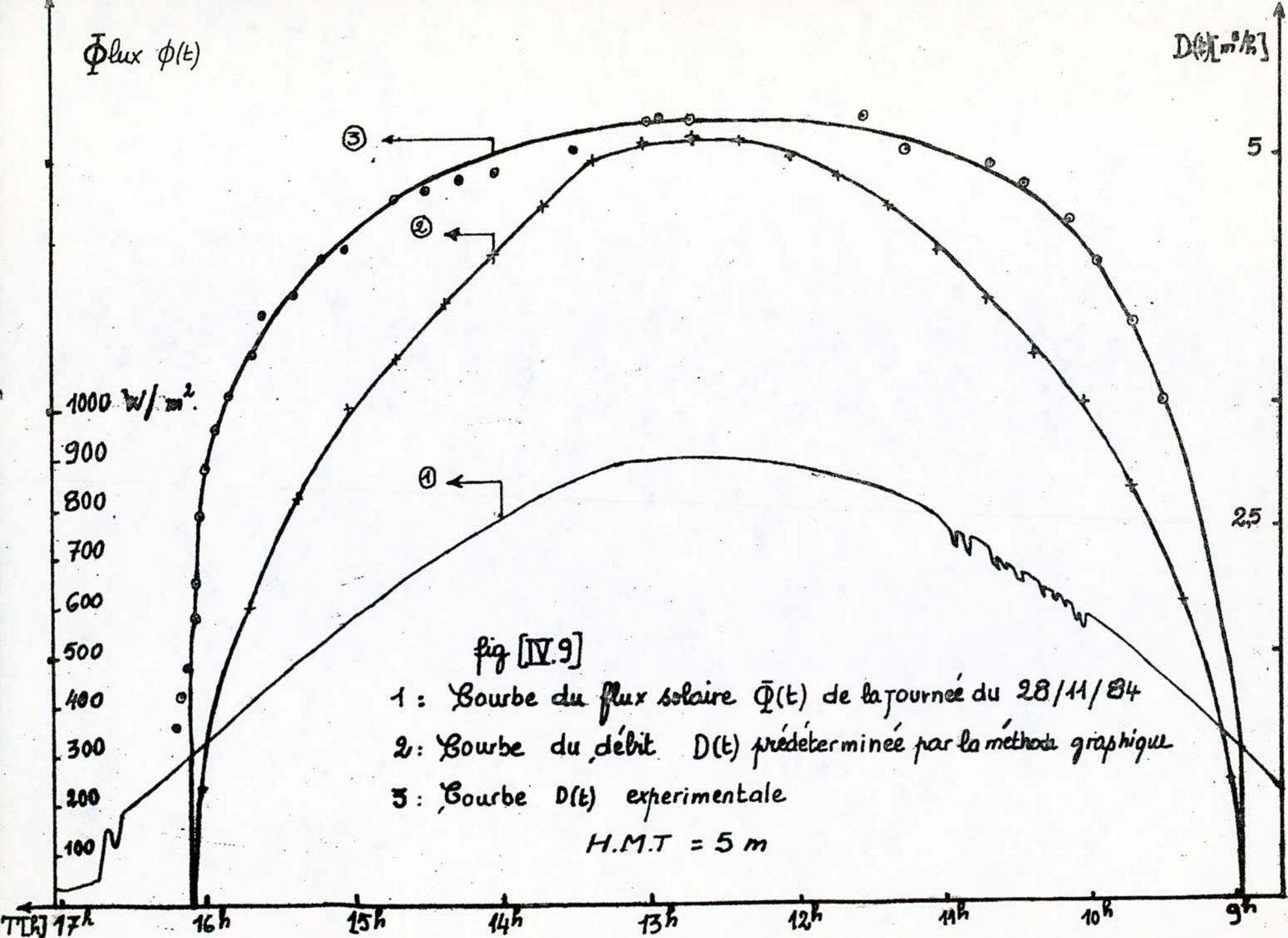


fig [IV.9]

- 1: Courbe du flux solaire $\bar{\Phi}(t)$ de la journée du 28/11/84
- 2: Courbe du débit $D(t)$ prédéterminée par la méthode graphique
- 3: Courbe $D(t)$ expérimentale

H.M.T = 5 m

IV.24 Calcul du rendement de la chaîne

Le rendement de la chaîne panneaux - moteur - pompe fait intervenir les variables suivantes.

1° Rendement des panneaux : C'est le rapport entre la puissance maximale et la puissance rayonnée pour un flux lumineux Φ et Température T connus.

$$\eta_p = \frac{P_{max}}{P_{ray}} = \frac{P_{max}}{\Phi \cdot S_T}$$

avec S_T : surface totale des panneaux :

P_{max} : Puissance maximale du générateur.

2° Rendement de l'adaptation : Il est défini par le rapport de la puissance extraite sur la puissance maximale disponible du générateur. $[\eta_a \leq 1]$

$$\eta_a = \frac{P_{ext}}{P_{max}}$$

3° Rendement du moteur défini par l'expression [IV.2]

$$\eta_m = 1 - \frac{\Delta P}{P_{ext}}$$

4° Rendement de la pompe Il est défini comme étant le rapport de l'énergie de la quantité d'eau pompée sur la puissance mécanique $[P_m]$ reçue sur l'arbre.

$$\eta_c = \frac{\rho \cdot Q \cdot H}{P_{ext} \eta_m}$$

$H = H.M.T$ Hauteur manométrique totale [5m]

Q : débit de la pompe en $[m^3/s]$

ρ : Poids spécifique de l'eau $[9,81 \cdot 10^3 \text{ kg}/m^3]$

Le rendement global de la chaîne est le produit des éléments intermédiaires.

$$\eta_g = \eta_p \cdot \eta_a \cdot \eta_m \cdot \eta_c = \frac{\rho Q H}{\Phi S_T}$$

Application numérique :

$$S_T = 5,25 \text{ m}^2 ; \quad \rho = 9,81 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{s} \quad \text{H.M.T} = 5 \text{ m}$$

d'où le rendement global :

$$\eta_g [\%] = 9343 \frac{Q}{\Phi} \times 100 \quad [\text{IV.}]$$

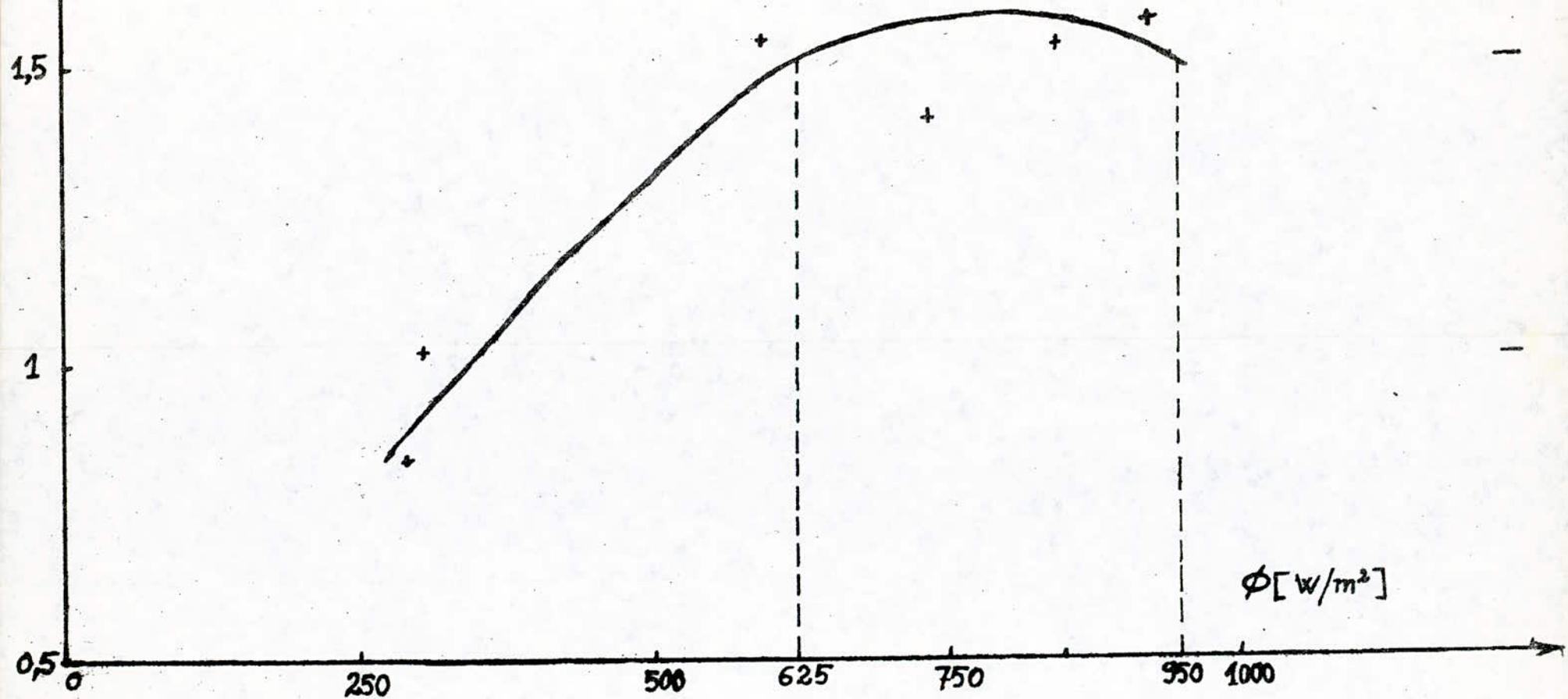
Les performances d'un système de pompage solaire en couplage direct placé sur le site se présentent en traçant la courbe du rendement global de la chaîne en fonction du flux rayonné.

La fig [IV. 10] présente la courbe du rendement global en fonction du flux solaire de notre système. On voit que le rendement maximal [au delà de 1,50%] occupe une large variation du flux lumineux [600 ÷ 950] Wm^{-2} durant la journée.

η_G [%]

fig [IV.10] : Rendement global en fonction du flux lumineux

$$\eta_G = f(\Phi)$$



IV.2.5 Comparaison des résultats expérimentaux avec les résultats de la méthode graphique

- Afin de vérifier expérimentalement les résultats obtenus par la méthode graphique, nous avons enregistré le flux solaire de la journée du 28-11-1984 à la station de Bouzareah, de même on a relevé le débit, la vitesse, la tension et le courant du moteur. Tab [IV.1]

Pour comparer ces deux résultats on a représenté les deux courbes du débit $Q_1(t)$ graphique et $Q_2(t)$ expérimentale dans le même graphe.

A première vue, on constate que la méthode graphique donne des résultats plus proche de l'expérimentale pour des valeurs élevées du flux solaire. Ceci s'explique par une bonne adaptation du générateur ou groupe pour de grandes valeurs du flux [$> 738 \text{ Wm}^{-2}$]

Par contre pour des faibles flux l'adaptation est moins bonne et les résultats de la méthode graphique s'écartent légèrement de ceux de l'expérimentale. fig [IV.11]

En conséquence nous avons mesuré l'aire des deux courbes [Débit-vitesse] graphique et expérimentale avec un planimètre. Celui-ci représente la quantité d'eau pompée journalière et on trouve respectivement $Q_1 = 29,059 \text{ m}^3$ et $Q_2 = 32,113 \text{ m}^3$ d'où l'écart relatif est de 9,5 %

Tab [IV.I] : Enregistrement des paramètres du groupe en couplage direct Pendant la journée du 28.11.84 (à BOUZARÉAH).

Heure Locale	9 ^h 42'	9 ^h 56'	10 ^h 09'	10 ^h 26'	10 ^h 40'	11 ^h 15'	11 ^h 32'	12 ^h 42'	12 ^h 51'	13 ^h 00'	13 ^h 30'	14 ^h 02'	14 ^h 17'	14 ^h 30'
tension V_m (V)	46	48	51	53	54	55	56	63	63	62,5	55,8	53,6	53	52
Courant I_m (A)	3,6	3,65	4,2	4,44	4,6	4,8	4,98	4,6	4,8	4,8	4,65	4,58	4,45	4,40
Vitesse de rotation (tr/min)	2150	2300	2400	2480	2530	2560	2650	2655	2655	2540	2560	2515	2500	2480
Débit de la pompe (m ³ /h)	3,90	4,28	4,57	4,79	4,93	5,04	5,26	5,26	5,26	5,22	5,04	4,90	4,86	4,79

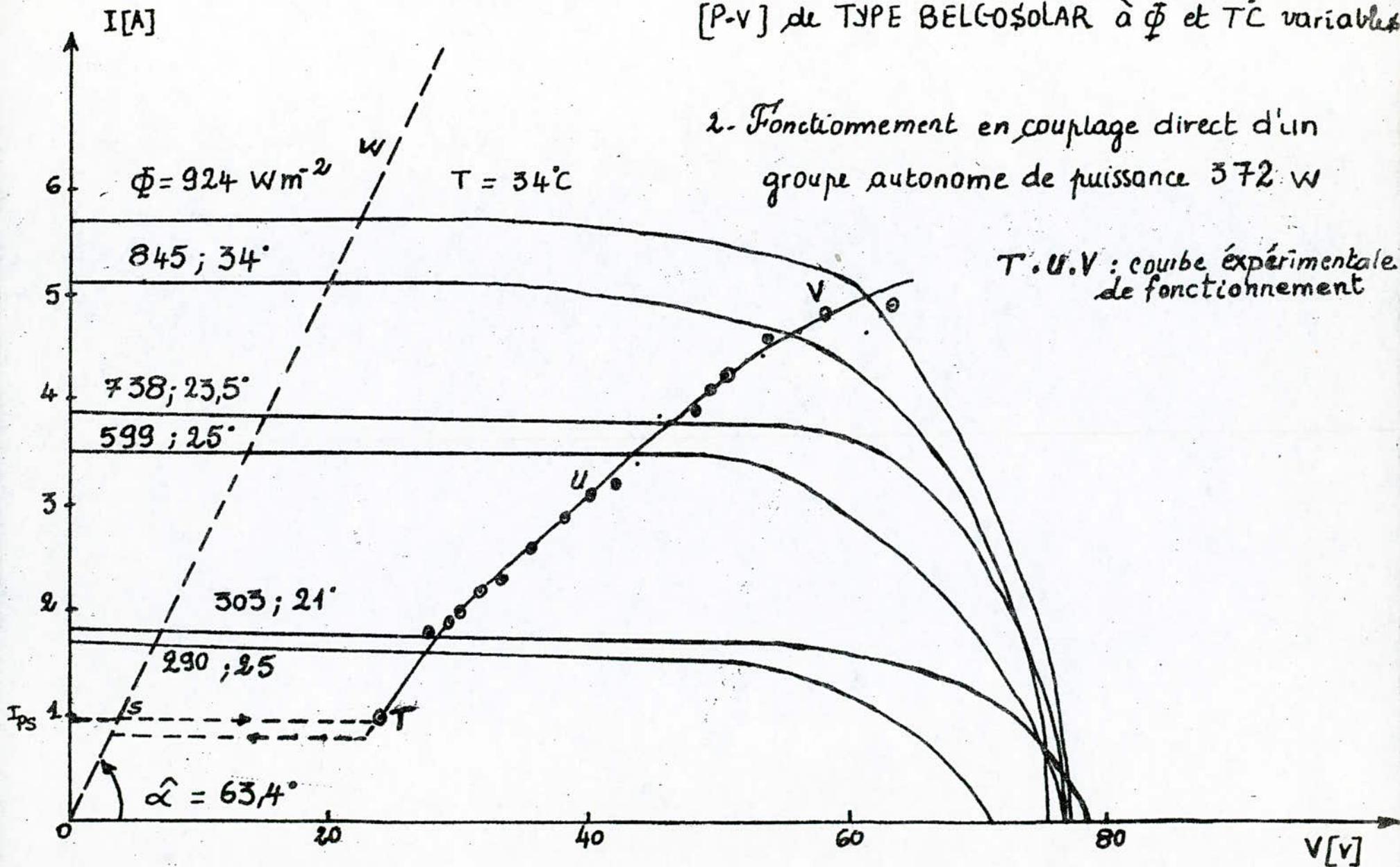
suite du tab [IV.I.]

14 ^h 41'	15 ^h 02'	15 ^h 22'	15 ^h 24'	15 ^h 33'	15 ^h 40'	15 ^h 50'	15 ^h 56'	16 ^h 00'	16 ^h 02'	16 ^h 04'	16 ^h 05'	16 ^h 07'	16 ^h 11'	16 ^h 22'	Heure
50,5	49	48	46	45	43,5	41	40	38	35,5	33	31,05	30	27,5	24	V_m (V)
4,22	4,10	3,90	3,80	3,60	3,42	3,20	3,05	2,90	2,60	2,30	2,20	2,00	1,80	1,00	I_m (A)
2450	2340	2310	2225	2175	2090	1970	1900	1800	1700	1550	1475	1400	1300	1000	N (tr/min)
4,72	4,39	4,32	4,10	3,96	3,79	3,42	3,20	2,92	2,63	2,16	1,91	1,58	1,8	0	D [m ³ /h]

fig [IV.11]

1. Caractéristique de puissance [I,V] du générateur [P-V] de TYPE BELCOSOLAR à Φ et T_c variables

2. Fonctionnement en couplage direct d'un groupe autonome de puissance 372 W



Conclusion :

Connaissant :

- Les caractéristiques réelles du fruit [H.M.T]
- Les données météorologiques du site
- Les caractéristiques du moteur et de la pompe
- Les caractéristiques de puissance (I, V) du générateur à flux variable

La méthode graphique nous permet :

1/ de déduire graphiquement la courbe journalière du débit $D(t)$ à partir du flux lumineux $\phi(t)$ pour un groupe fonctionnant en couplage direct et par conséquent d'estimer la quantité d'eau journalière pompée.

2/ d'optimiser le rendement global de la chaîne en cherchant pour chaque composant (générateur - moteur, pompe) à placer les points de fonctionnement au voisinage du rendement maximum.

3/ de déterminer les variations du rendement global durant la journée.

4/ d'avoir de bons résultats car l'erreur relative ne dépasse pas 10% dans notre cas.

III : RÉALISATION D'UN RÉGULATEUR ÉLECTRONIQUE DE CHARGE ET DÉCHARGE DE BATTERIE

La plupart des applications des générateurs photovoltaïques de faible puissance [téléphone, lampadaire, radio, ... etc] nécessitent des moyens de stockage.

D'une manière générale, il est fait appel à des batteries d'accumulateurs dont le bon fonctionnement et la tenue des performances dans le temps résultent directement des conditions d'utilisations.

- Afin de réaliser un contrôle précis de ces conditions de charge et décharge; il est nécessaire d'intercaler entre les modules solaires et la batterie un dispositif de régulation électronique calibré au mieux des besoins. Pour cela nous avons réalisé un régulateur qui possède les caractéristiques suivantes.

Caractéristiques du régulateur

1. Il convient toujours de protéger les batteries contre les décharges profondes.

2. Protection de la batterie contre les surcharges.

3. Protection des panneaux solaires contre le retour de l'énergie lorsque sa tension est inférieure à celle de la batterie.

- 4) Visualisation de l'état de charge de la batterie par les LED
5. Protection de la batterie contre les courts-circuit à l'aide d'un fusible.

Principe de fonctionnement :

Le fonctionnement est basé sur le principe de régulation par coupure électromécanique, la référence étant constituée par la tension de la batterie représentative de son état de charge.

Le schéma électrique de notre dispositif Fig [IV.12] est représenté en fonctionnement normal (ni surcharge, ni décharge sont atteintes).

La liaison panneaux-batterie est connectée; Les panneaux débitent dans la charge et la batterie pour la charger pendant les heures ensoleillées de la journée.

Le circuit des LED vertes est fermé afin de visualiser cet état.

RÉGULATION

La régulation se fait en deux phases.

A)- Lors de la décharge des batteries.

La nuit ou par période de mauvais temps, les accumulateurs alimentent la charge. Au fur et à mesure que la tension de la batterie diminue; le courant s'affaiblit dans la résistance [R₇] et entraîne une diminution de la chute de tension à l'entrée du comparateur IC₂. Celui-ci compare cette tension

de mesure V_m et celle de la tension de référence V_c stabilisée par la diode Zener DZ . Lorsque la tension de la batterie atteint un seuil minimum pré-régulé de $V_{min} = 11,4 V$ par le potentiomètre P_2

la tension de sortie du comparateur IC_2 ($V_{S_2} = A(V_c - V_m)$) devient négative et par conséquent entraîne la saturation du transistor T_2 qui excite le relais RL_2 actionnant les contacts suivants.

- ouverture du circuit de visualisation par les LED vertes
 - Fermeture du circuit de la L.E.D rouge qui permet de visualiser cet état de décharge profonde.
 - Fermeture du circuit d'alarme.
 - Coupure de l'alimentation de la charge.
- en ce moment le transistor T_4 est bloqué.

B/. Lors de la charge des batteries.

A flux solaire élevé le courant fourni par les panneaux augmente, la tension de la batterie croît, quand elle atteint un seuil maximal pré-régulé par P_1 ($V_{max} = 14,4 V$) la tension d'entrée de IC_1 est négative, de même la tension de sortie sera également négative $V_s = A \cdot (V_c - V^+)$, donc la base du transistor T_1 reçoit une tension négative ce qui le mettra en état saturé et excite le relais RL_1 qui pilote la commande des contacts suivants :

- Ouverture du circuit de visualisation par les L.E.D vertes
- Fermeture du circuit de la L.E.D jaune qui affichera cet état de surcharge.
- Déconnexion des panneaux solaires.

en ce moment la tension de sortie du comparateur IC_2 est positive le transistor T_2 est bloqué et empêche la commande du relais correspondant.

Nomenclature :

Transistors $T_1, T_2 = 2N 2905$

Diodes : $D_1, D_2, D_3, D_4 : 1N 4001$

$D_5, D_6, D_7 : MR 500$

Diodes Zener $D_{Z1}, D_{Z2} :$

Circuits intégrés $IC_1, IC_2 : \mu A 741$

Resistances : $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = 1,2 K\Omega$

$R_6 = R_7 = R_8 = 10 K\Omega$

$R_9 = 47 K\Omega ; R_{10} = 2,2 K\Omega ; R_{11} = 120 \Omega$

$R_{12} = 4,7 K\Omega ; R_{13} = 160 K\Omega ; R_{14} = 68 K\Omega$

Potentiomètres : $R_{P1} = R_{P2} = 50 K\Omega$

Relais $RL_1, RL_2 : \text{relais } 12V ; 160 \Omega$

Accessoires $BP : \text{Bouton poussoir}$

$I : \text{interrupteur}$

$F : \text{Fusible}$

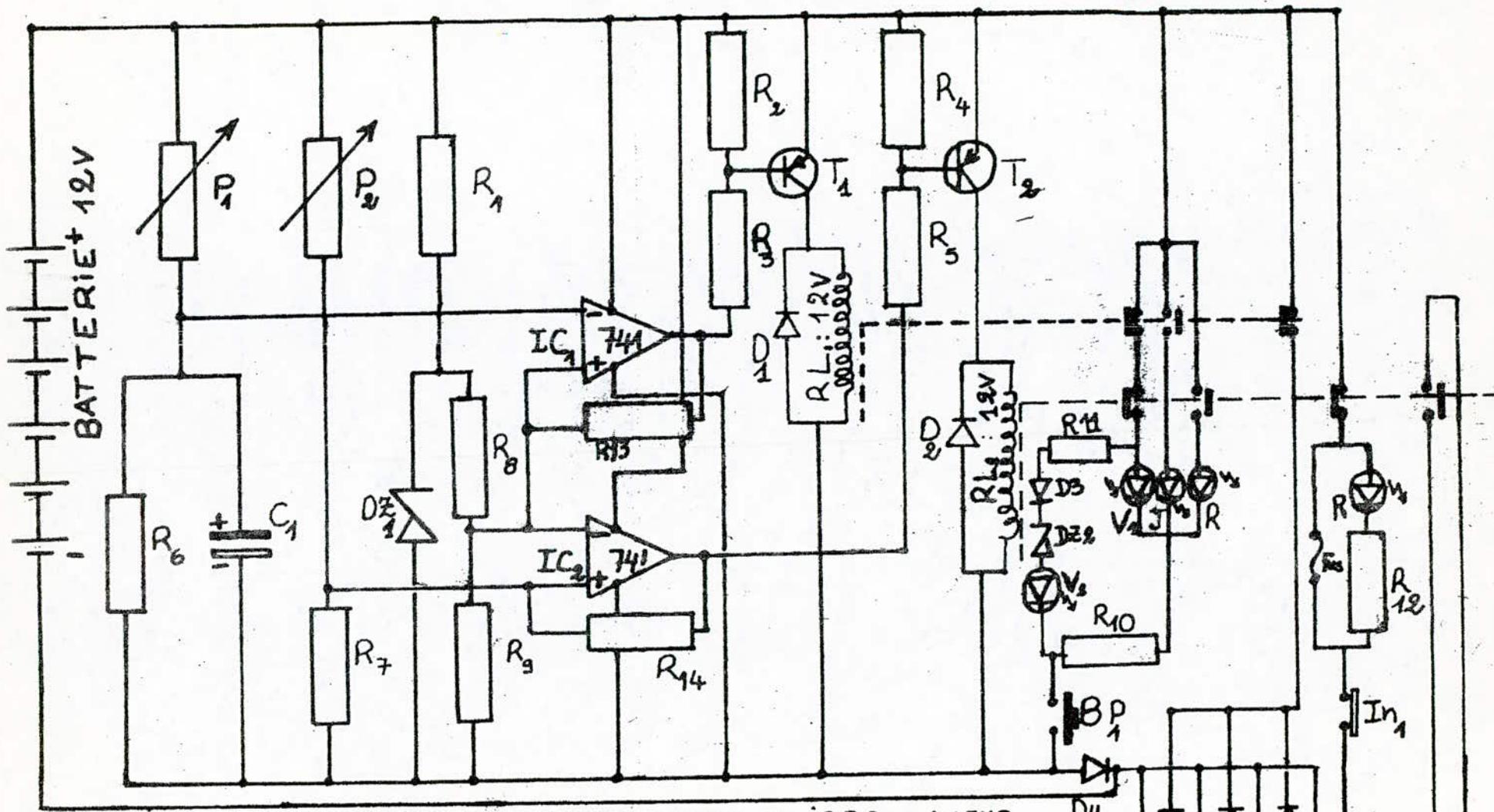
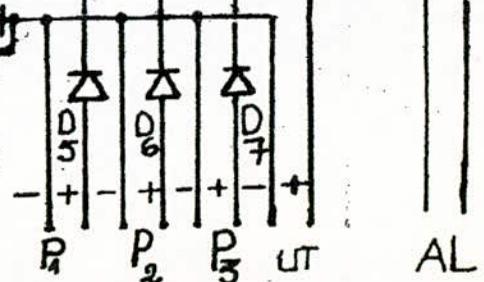


fig: [IV.12] SCHEMA ELECTRIQUE DU REGULATEUR
DE PROTECTION ET DISTRIBUTION D'ENERGIE



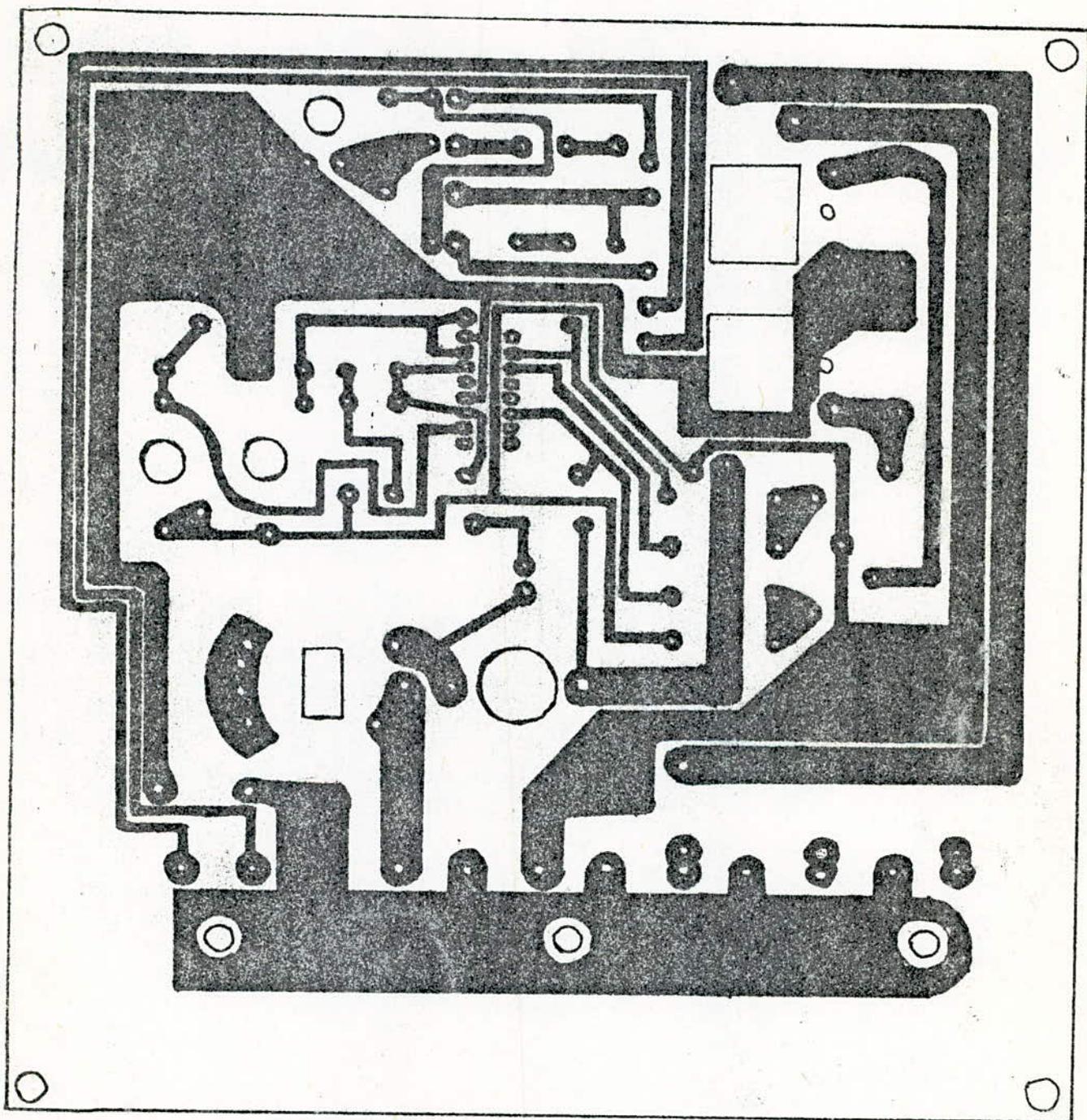


fig []: SCHEMA DU CIRCUIT IMPRIMÉ

Echelle : 01

CONCLUSION

Cette étude nous a permis de :

1/ définir le dimensionnement d'une installation de pompage photovoltaïque de faible puissance avec stockage électrique

2/ d'optimiser la chaîne de pompage solaire en couplage direct à l'aide d'une méthode graphique afin de choisir l'équipement le mieux adapté au système étudié utilisant les pompes centrifuges

3/ de généraliser cette méthode pour l'optimisation et le dimensionnement de n'importe quelle station de pompage en couplage direct en fonction des données spécifiques suivantes

- données météorologiques du lieu d'implantation .
- besoins en eau pour un site donné .
- caractéristique réelle du puits [hauteur H.M.T, taux de recouvrement]
- choix du type de moteur .
- choix du générateur .
 - rendement des panneaux
 - choix du groupement des modules
 - orientation optimale des modules

Après avoir optimiser le rendement des éléments de la chaîne cette méthode nous permet d'avoir une relation directe entre le flux solaire $\phi(t)$ et le débit de la pompe $D(t)$.

Cette étude qui se veut universelle, a pour but la maîtrise de pompage solaire photovoltaïque et son application la plus large dans notre pays .

- ANNEXE -

A-1 Calcul de la durée d'ensoleillement d'un jour

DE la fig [A.1.b] on en déduit que : $R' = R_T \cos \hat{L}$
 où R_T : rayon de la terre
 \hat{L} : Latitude du lieu.

La partie du cercle éclairé de la j^{ème} journée de l'année définie par la déclinaison δ_j de la terre est un arc de longueur

$$P = \widehat{AD} - \widehat{AB} = \widehat{AD} - 2\widehat{CD} = \pi R_T \cos \hat{L} - 2 R_T \delta_j \quad [A.1]$$

Soit ω la vitesse angulaire de la terre, la durée d'un jour est:

$$\tau_j = \frac{\pi R_T \cos \hat{L} - 2 R_T \delta_j}{\omega R_T} = \frac{\pi \cos \hat{L} - 2 \delta_j}{\omega} \quad [A.2]$$

Sachant que la terre fait un tour complet en 24h
 d'où $\omega = \frac{2\pi}{24} \text{ [rad/h]}$

$$\Rightarrow \tau_j = 12 \cos \hat{L} - \frac{24}{\pi} \delta_j \text{ [heure]} \quad [A.3]$$

En valeur angulaire ça nous donne

$$\Delta H_j = \omega \tau_j = \pi \cos \hat{L} - 2 \delta_j \text{ [rad]} \quad [A.4]$$

A2: Variation de la déclinaison δ_j

- On sait que le maximum de la déclinaison terrestre $\delta_j(t)$

à lieu en été et égale environ 24° ; En hiver est minimale vaut environ -24° .

La variation peut être approximée par une fonction linéaire ou plus exactement par une sinusoïde fig [A. 2] de la forme

$$\delta_j(t) = -\delta_m \cdot \cos \frac{2\pi n_j}{T} \quad [\text{en degré}] \quad [A.5]$$

où : $\delta_m = 24^\circ$ déclinaison maximale.

$T = 365$ Jours période de basculement de la terre.

n_j nombre de jours comptés à partir du début d'hiver.

Remarque : La variation de la déclinaison $\delta_j(t)$ est négligeable pour une journée. car : $\frac{\Delta \delta_m}{\Delta t} = \frac{2 \times 24}{6 \times 30} = 0,267^\circ/\text{Jour}$

A.3 Energie captée en une journée

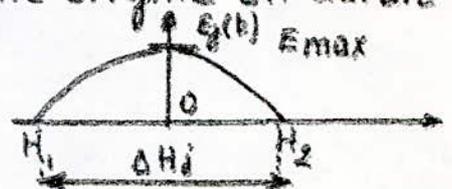
$$E_j = \int_{H_1}^{H_2} E(t) \cdot dt = \int_{H_1}^{H_2} E_0 [\cos(L-\theta) \cos \delta + \sin(L-\theta) \sin \delta] dH$$

où : H_1, H_2 sont respectivement le lever et le coucher du soleil

$$E_j = E_0 [\cos(L-\theta) \cos \delta (\sin H_2 - \sin H_1) + \sin(L-\theta) \sin \delta (H_2 - H_1)] \quad [A.6]$$

Si le midi solaire a été pris comme origine on aurait

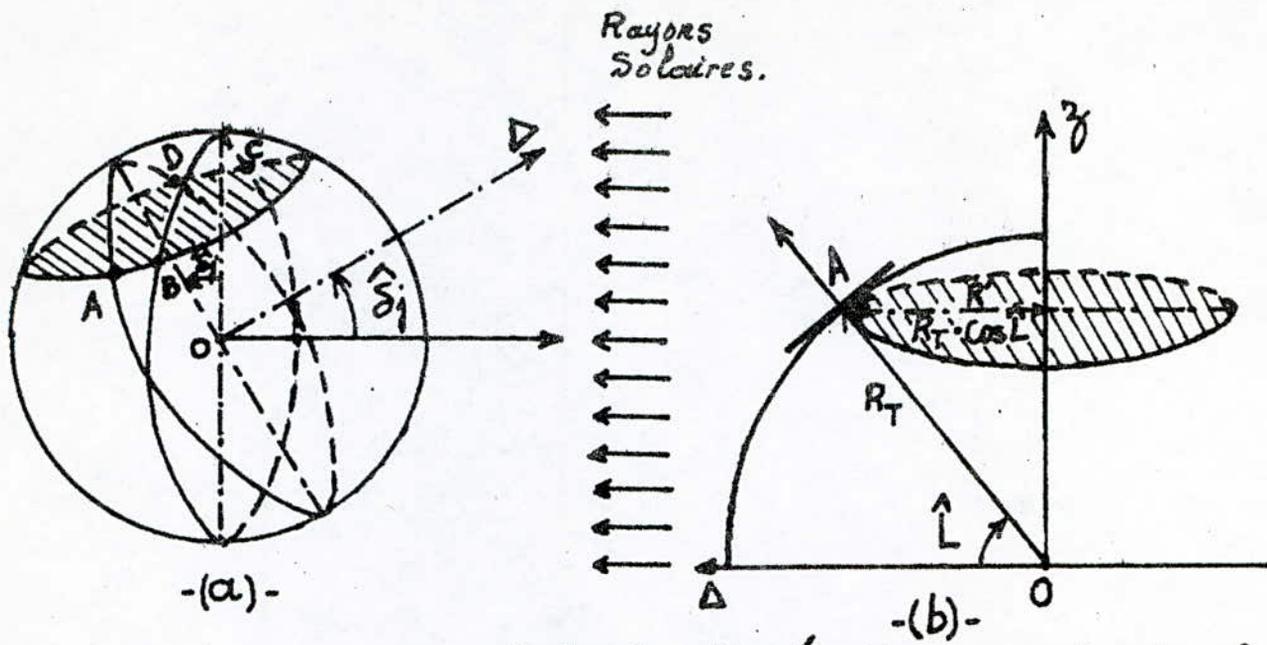
$$-H_1 = +H_2 = \frac{\Delta H_j}{2}$$



d'où l'expression

$$E_j = 2 E_0 [\cos(L-\theta) \cos \delta_j \sin H_2 + \sin(L-\theta) \cdot \sin \delta_j \cdot H_2] \quad [A.7]$$

Avec $H_2 = \frac{\pi}{2} \cos(L) - \delta_j$; $\delta_j = -24 \cdot \cos \frac{2\pi}{T} n_j$



fig[A.1] : Durée d'éclairément d'une journée

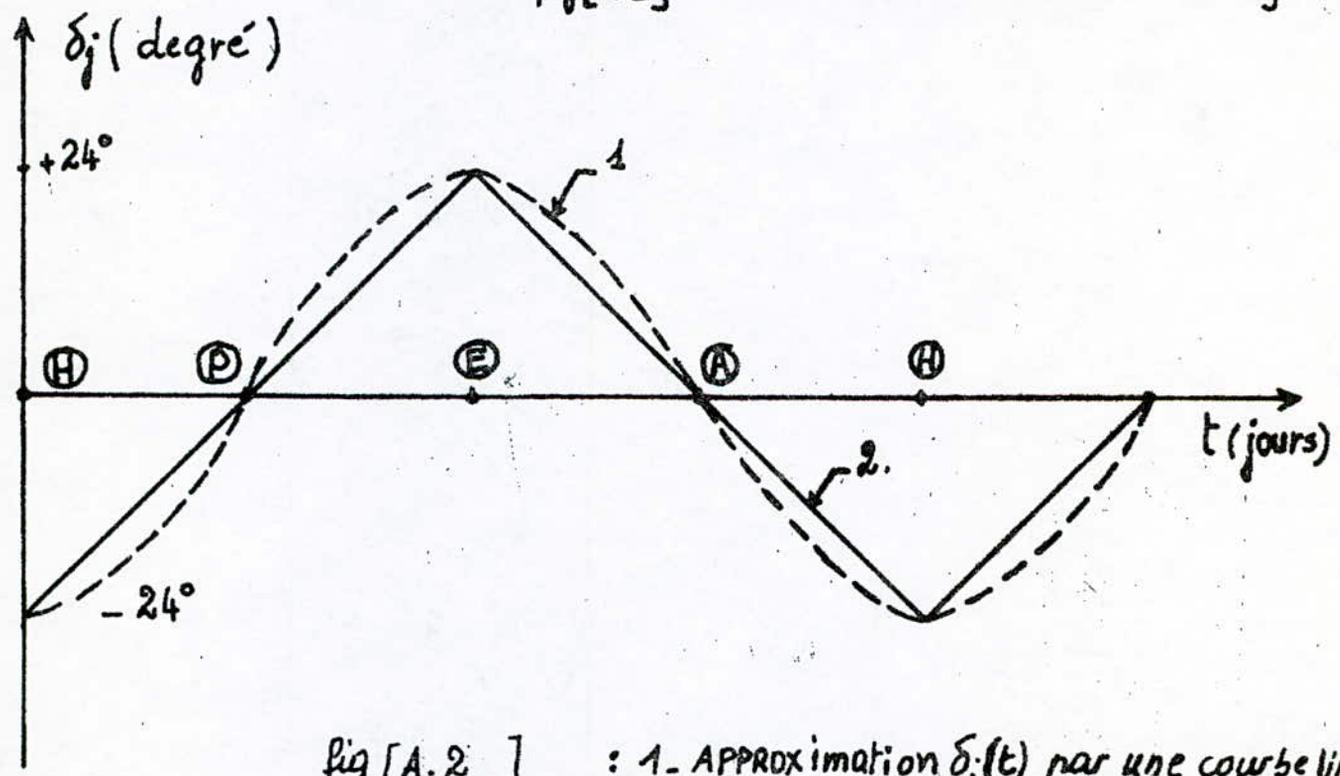


fig [A.2] : 1- APPROXIMATION $\delta_j(t)$ par une courbe linéaire
 2- " " " " " " " " sinusoi-
 -dale

INSTALLATIONS DE STRUCTURES DE POMPAGES FAMILIAL SUR SITE
[EN ALGÉRIE]

WILAYAS	LOCALITÉ	DEBIT	HATEUR d'EXHAUPE	Puissance crête du générateur	CAPACITÉ DE STOCKAGE	PRESTATION DE SERVICE VISÉE.
ADRAR	Mellouka	200 l/min max	7 m	0,20 KW [BELGO-SOLAR]	environ 30 m ³	Apport d'eau pour travaux de la centrale électro-solaire
DJELFA	ZAOUIA-ABOU-LAHDE	300 l/min max	7 m	0,60 KW SHARP	-	Alimentation en eau potable de quelques familles
BATNA	Ain-YAGOUT	25 m ³ /j	40 m	1,4 KW ARCO-SOLAR	18 m ³	A.E.P de 15 familles + cheptel + suivi expérimental
	Domaine BEN BOULAF	200 l/min max	6 m	0,24 KW SHARP	7 m ³	Test d'irrigation sur parcelle agricoles
	Tifelfel	200 l/min max	7 m	0,60 KW SHARP	9 m ³	A.E.P DE 15 Familles
M'sila	ERiyACHA	45 m ³ /j	22 m	1,4 KW ARCO-SOLAR	30 m ³	A.E.P de familles avec cheptel individuel
TAMENRASSET	TAHIFET	65 m ³ /j	15 m	1,4 KW ARCO-SOLAR	-	A.E.P. DE 15 Familles

LÉGENDE DES ABREVIATIONS

ABRÉVIATION	Désignation
λ	longueur d'onde.
$E_{Dir} = E_1$	Rayonnement direct
$E_{dif} = E_2$	Rayonnement diffus
$\hat{\theta}$ [degré]	angle entre la normale du capteur et la verticale
$\hat{\delta}$ [degré]	déclinaison de la terre.
\hat{L}	Latitude du lieu.
P.V	Photovoltaïque
Φ [Wm^{-2}]	flux lumineux
H.M.T [m]	hauteur manométrique totale
D [m^3/s]	débit de la pompe
C_r [m.n]	couple résistant de la pompe
I_m, V_m	courant et tension du moteur.
I_p, V_p	courant et tension du panneau
Φ_m	flux magnétique du moteur.
CD [N.m]	couple de démarrage du moteur
N [$tr\ min^{-1}$]	vitesse de rotation du moteur
η_m	rendement du moteur
R_f, I_f	résistance et courant d'inducteur
R_a, I_a	resistance et courant d'induit
I_{p2} (A)	courant de démarrage du moteur
R_T	Rayon de la terre.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] A. LALIGIER et J.A. ROGER
Les photopiles solaires : Du MATERIAUX AU DISPOSITIF
DU DISPOSITIF AUX APPLICATIONS [Tech et Doc 1981].
- [2] REVUE PHOTOWATT S.A.
- [3] W. PALZ
L'électricité solaire.
- [4] : S.A DARRADJI : Téléviseur alimenté par énergie solaire
- [5] : ROGER J.A. : Theory of the direct coupling between
dc Motors and PV solar .
- [6] A. ADANE : Etude de la faisabilité d'une balise
radioélectrique à l'aéroport de HASSI - Messaoud par
conversion photovoltaïque
- [7] : ROBERT PRIDO : Centre spatial de Toulouse
Système de pompage d'eau par conversion photovoltaïque
- [8] : Revue EL HINDIS N° 7/8 Annexe 1981
- [9] : A. Fouillé T3 Machines à courant continu
- [10] J. Niard ; R MERAT ; Y RENOUX : Electronique
[Cours d'électricité]