

T H E S E

présentée à

L ' U N I V E R S I T E D E P A R I S V I I

par

Monsieur DJIBRINE Albert

pour obtenir le titre de

DOCTEUR DE TROISIEME CYCLE

SPECIALITE : PHYSIQUE DE L'ENERGIE

OPTION : ENERGIE SOLAIRE

SUJET DE LA THESE : " Détermination et optimisation
d'un système de conversion d'énergies photovoltaïque
et éolienne utilisant un volant d'inertie comme
organe de stockage " .

Soutenue le : 29 JUIN 1981

devant la Commission d'Examen composée de :

Messieurs :	P.BARUCH	Président
	J.BAIXERAS	} Examineurs
	J.P.CHABRERIE	
	C.JACQUES	
	D.MADET	

T H E S E

présentée à

L ' U N I V E R S I T E D E P A R I S V I I

par

Monsieur DJIBRINE Albert

pour obtenir le titre de

DOCTEUR DE TROISIEME CYCLE

SPECIALITE : PHYSIQUE DE L'ENERGIE

OPTION : ENERGIE SOLAIRE

CS 436

SUJET DE LA THESE : " Détermination et optimisation
d'un système de conversion d'énergies photovoltaïque
et éolienne utilisant un volant d'inertie comme
organe de stockage " .

Soutenue le : 29 JUIN 1981

devant la Commission d'Examen composée de :

Messieurs :	P. BARUCH	Président
	J. BAIXERAS	} Examineurs
	J.P. CHABRERIE	
	C. JACQUES	
	D. MADET	

R E M E R C I E M E N T S

Je tiens à témoigner ma gratitude à Messieurs les Professeurs BONNEFILLE et FOURNET qui m'ont accueilli au Laboratoire de Génie Electrique des Universités de Paris VI et XI (L.G.E.P.) pour réaliser ces travaux dans les meilleures conditions.

Je remercie plus particulièrement Monsieur BAIKERAS d'avoir donné une suite favorable et spontanée à mon désir d'effectuer ce stage au L.G.E.P. et de m'avoir accepté dans son équipe pour y diriger mes travaux.

Je suis très reconnaissant à Monsieur PECH pour les conseils et l'aide constante qu'il m'a apportés pendant la plus grande partie de mon stage.

Messieurs CHABRERIE et SAINT-MICHEL m'ont été également d'une aide précieuse. Qu'ils trouvent ici, toute l'expression de ma gratitude.

Mes remerciements vont aussi à Messieurs POUBEAU de la SNIAS et NOEL de l'AEROWATT pour leurs communications utiles à la présente étude.

Je remercie tout le personnel technique et administratif du L.G.E.P. ainsi que les collègues pour l'aide qu'ils m'ont donnée à un moment ou à un autre, et surtout pour l'ambiance sympathique qu'ils ont su entretenir au Laboratoire.

A la mémoire de ma mère .

TABLE DES MATIERES

	page
I - GENERALITES	1
II - ETUDE DU SITE	3
II.1. Choix du site	3
II.2. Données d'ensoleillement	4
II.3. Données de vitesse de vent	7
2.3.1. Vitesse moyenne $\langle V \rangle$ du vent	8
2.3.2. Vitesse du vent et sa fréquence	8
2.3.3. Fréquence cumulée du vent en fonction de la vitesse	8
2.3.4. Répartition moyenne journalière des vitesses du vent ...	10
III - EVALUATION DES BESOINS EN ENERGIE DE L'INSTALLATION	11
IV - PUISSANCE DES DEUX SOURCES pv ET EDLIENNE	14
IV.1. Quelques considérations économiques	14
IV.2. Source photovoltaïque	15
4.2.1. Couplage série-parallèle des modules pv	17
4.2.2. Protection du générateur pv	19
4.2.3. Caractéristiques courant-tension I-U de G_{pv}	22
IV.3. Source éolienne	22
4.3.1. Choix de l'éolienne	23
4.3.2. Dimensions de l'éolienne	25
4.3.3. Caractéristiques de l'éolienne	27
V - AUTRES ELEMENTS DU SYSTEME DE CONVERSION D'ENERGIE	30
V.I. Le moteur M	30
5.1.1. Tension d'alimentation de M et couple moteur fourni par M	30
V.2. L'alternateur M_5	33
V.3. Les variateurs électromagnétiques de vitesse (M_1M_2) et (M_3M_4)..	34
5.3.1. Description générale	34
5.3.2. Principe de fonctionnement du variateur	39
5.3.3. Dimensionnement des variateurs	41
5.3.3.1. Forces agissant sur la veine de contact glissant	42
5.3.3.2. Pertes par contact	49
5.3.3.3. Dimensions des variateurs	54
5.3.3.4. Pertes dans les parties en cuivre de M_1 et M_2 .	59
5.3.3.5. Pertes excitations dans M_1 et M_2	61

5.3.3.6. Pertes aux paliers p_{pal}	63
5.3.4. Rendement du variateur $M_1 M_2$	64
V.4. La roue cinétique d'inertie R_I	65
5.4.1. Généralités sur les roues d'inertie	65
5.4.2. Description des parties principales de R_I	68
5.4.3. Moment d'inertie de R_I	72
5.4.4. Encombrement de R_I	74
5.4.5. Pertes à vide de l'énergie stockée par R_I	76
V.5. Le multiplicateur de vitesse M_m	78
VI - FONCTIONNEMENT DE L'ENSEMBLE DU SYSTEME DE CONVERSION D'ENERGIE	80
VI.1. Sous-système S_I	80
6.1.1. Couplage série-parallèle des modules pv et couplage G_{pv}/M	80
6.1.2. Caractéristiques à vide et en charge	82
6.1.2.1. Caractéristique à vide	82
6.1.2.2. Caractéristique en charge	82
6.1.3. Régulation du sous-système S_I	85
6.1.3.1. Fonctionnement sans régulation de S_I	85
6.1.3.2. Fonctionnement de S_I avec régulation	88
6.1.3.3. Description du dispositif de régulation de S_I	91
6.1.4. Mouvement de R_I sous l'effet de la puissance P_{pv} four- nie par G_{pv}	93
VI.2. Sous-système S_{II}	94
6.2.1. Conditions d'utilisation de S_{II}	94
6.2.2. Grandeurs caractéristiques de S_{II}	94
6.2.3. Régulation de la puissance P_{Ge} et de la vitesse N_{Ge} de l'éolienne G_e	96
6.2.3.1. Régulation à C_p maximal ($V \leq V_n$)	97
6.2.3.2. Limitation par la régulation de P_{Ge} ($V > V_n$) ..	97
6.2.3.3. Description du système de régulation de S_{II} ..	101
6.2.4. Mouvement de R_I sous l'effet de la puissance P_{Ge} four- nie par G_e	101
VII - BILAN DES ENERGIES PRODUITES ET CONSOMMEES DE L'INSTALLATION	103
VII.1. Evaluation de l'énergie pv	103
VII.2. Evaluation de l'énergie éolienne	104
VII.3. Répartition, au cours du temps, de la puissance consommée ...	104
VII.4. Variation de la vitesse de R_I au cours du temps	111
VIII - CONCLUSION	116
BIBLIOGRAPHIE	118
ANNEXES	AI et II

I - GENERALITES

Cette étude est une contribution au dimensionnement d'unités de production de l'énergie électrique de faible puissance obtenue à partir des énergies dites nouvelles : l'énergie solaire, par la conversion photovoltaïque (pv) et l'énergie cinétique du vent par un aérogénérateur appelé également éolienne.

De telles unités, par leur taille et par leur facilité d'implantation répondent bien à certains besoins spécifiques à caractère décentralisé comme le développement de certaines régions arides et déshéritées du globe.

L'emploi dans le cadre de cette étude, de la roue (ou volant) d'inertie comme organe de stockage d'énergie nous conduit à adopter des machines tournantes comme moyens de conversion en électricité des deux formes primaires d'énergie.

Le rendement de ces machines est en général bon. Par conséquent leur association avec une roue d'inertie de très bon rendement permet de réduire les pertes lors du stockage ou de la restitution d'énergie.

Après avoir essayé différentes configurations, la disposition schématique de la chaîne de conversion d'énergie que nous avons adoptée se présente sous la forme de la figure I.1.

Un moteur M à courant continu alimenté par un générateur pv G_{pv} fournit une puissance mécanique à l'arbre de M_5 et à la roue d'inertie R_I par l'intermédiaire d'un groupe Ward-Léonard comprenant deux machines homopolaires M_1 et M_2 . L'ensemble (M_1, M_2) constitue un variateur électromagnétique de vitesse qui permet soit d'augmenter la vitesse de R_I en stockant ainsi de l'énergie sous forme cinétique, soit de la diminuer en restituant de l'énergie stockée.

La vitesse du moteur M doit être constante et égale à la vitesse de synchronisme de l'alternateur M_5 qu'il entraîne. M_5 fournit à l'ensemble des récepteurs électriques (R) une tension alternative de 220/380 volts à la fréquence industrielle de 50 ± 3 Hz.

Une régulation de puissance mécanique sur l'arbre moteur M permet de maintenir la vitesse de l'alternateur à une valeur approximativement constante.

A l'autre bout de l'arbre de la roue R_I , est monté un second variateur de vitesse $(M_3 - M_4)$ destiné à transmettre l'énergie fournie par l'éolienne G_e

à la roue R_I grâce à une régulation appropriée de la fem E_4 obtenue par l'intermédiaire du flux d'induction magnétique Φ_4 de M_4 .

Un multiplicateur mécanique de vitesse M_m permet d'augmenter la force électromotrice fournie par M_3 en augmentant la vitesse de rotation de M_3 : une fem E_3 élevée est nécessaire afin de réduire les pertes Joule dans $(M_3 - M_4)$.

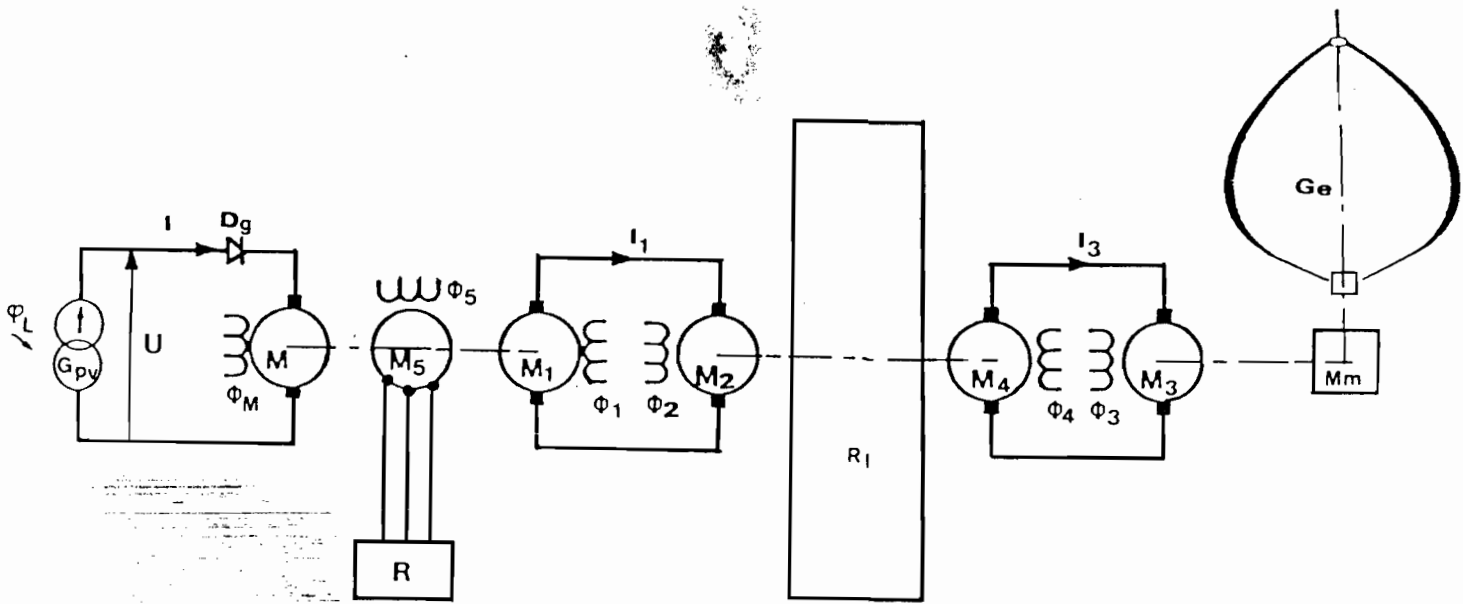


Fig.I.1.: Chaîne de conversion d'énergie solaire (photovoltaïque et éolienne) avec son système de stockage R_I

II. ETUDE DU SITE

Toute installation de système de conversion d'énergies dites nouvelles (éolienne, solaire, géothermique etc...) doit nécessairement être précédée de l'étude des données de vent, d'ensoleillement... relatives au site d'implantation du système. Ces données peuvent présenter des caractéristiques qui ne sont pas forcément les mêmes d'un site à un autre.

Le dimensionnement d'un système de conversion d'énergie solaire doit par conséquent s'appuyer sur ces données obtenues à partir de longues années d'observations météorologiques du site.

IL1. Choix du site

Nous nous placerons dans **une** région où la production de l'énergie électrique par des unités de faible puissance s'impose pour diverses raisons : économiques, sanitaires..., mais qu'il est difficile d'approvisionner en électricité issue du réseau de distribution classique à cause des distances trop grandes et des moyens financiers importants à mettre en oeuvre.

Pour des raisons de commodité, nous choisirons NDJAMENA (TCHAD) comme site de notre étude. Ce choix n'est pas tout à fait fortuit, non pas parce ~~que~~ cette ville soit dépourvue de réseau de distribution électrique normal, mais ~~parce~~ que des données de rayonnement solaire et de vitesse de vent relatives à ce site existent. Par suite cette étude peut être étendue à toutes régions de climat comparable ou non, après aménagements particuliers nécessaires.

Géographiquement NDJAMENA est situé à 295 mètres d'altitude, à 12°07' latitude Nord et 15°02' longitude Est, donc à l'intérieur du continent africain. Son climat est du type sahélien comprenant deux saisons bien tranchées : une saison sèche allant de la mi-Octobre à la fin du mois d'Avril et une saison des pluies qui s'étend du mois de Mai à la première quinzaine d'Octobre.

Autres phénomènes particuliers observés dans toute la région d'Afrique immédiatement située au sud du Sahara (et englobant le site choisi) sont que périodiquement il se produit :

- des vents de sable qui apparaissent de manière épisodique au cours de l'année
- des "brumes sèches", sorte de brouillard de poussière, qui apparaissent régulièrement pendant une partie de l'hiver boréal : de Novembre à Février et affaiblissent le niveau de rayonnement solaire qui parvient au sol.

II.2. Données d'ensoleillement

Les données d'ensoleillement enregistrées sur plusieurs années par l'Office de la Recherche Scientifique des Territoires d'Outre-Mer (ORSTOM), nous ont permis d'établir une moyenne journalière de l'énergie solaire globale G qui parvient au niveau du sol. La figure II.1. donne l'énergie G , calculée par intervalle mensuel pour toute l'année (moyennes effectuées à l'aide des données portant sur sept ans, de 1967 à 1973 inclus).

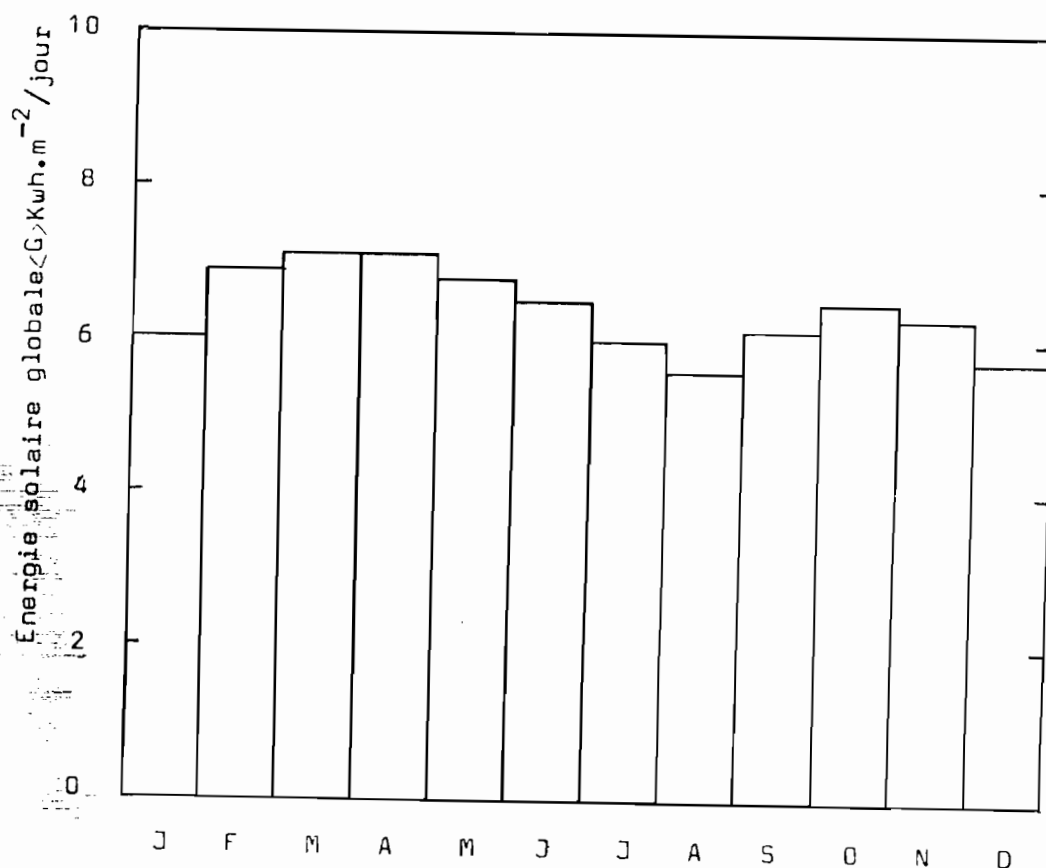


Fig.II.1.: Moyenne mensuelle de l'énergie solaire globale à N'DJAMENA (Tchad). Durée des mesures : de 1967 à 1973 inclus.

Nous noterons que le mois d'Août est le moins ensoleillé de l'année ($\approx 5,5 \text{ kWh/m}^2/\text{jour}$) tandis que les mois de Mars et Avril présentent un ensoleillement maximal avec environ $7 \text{ kWh/m}^2/\text{jour}$.

La connaissance simultanée des énergies solaires globales G et des durées d'insolation directe H correspondantes permet d'évaluer les constantes caractéristiques du site, pour une période quelconque de l'année, à l'aide de la formule de type d'Angström [1]

$$\frac{G}{G_0} = a + b \frac{H}{H_0} \quad (2.1.)$$

où pour la période considérée :

- . G est le flux d'énergie solaire globale capté au sol par un plan horizontal (Kwh.m^{-2}). Il est mesuré à l'aide d'un pyranomètre.
- . G_0 est le flux d'énergie globale (en Kwh.m^{-2}) rayonné par le soleil sur un plan horizontal situé aux mêmes coordonnées géographiques que le plan précédent, mais à la limite de l'atmosphère terrestre.
- . a et b sont les constantes caractéristiques du site que l'on cherche à évaluer.
- . H est la durée d'insolation directe effective au sol (en heures), mesurée avec l'appareil de Campbell-Stockes associé à une lentille sphérique (celui-ci focalise les rayons solaires directs qui brunissent un papier thermo-sensible convenablement disposé par rapport à la lentille).
- . H_0 est la durée des journées correspondant à la période considérée.

La courbe $\frac{G}{G_0} = f\left(\frac{H}{H_0}\right)$ donnée par la figure II.2. permet d'évaluer les constantes a et b qui sont pour l'année de :

$$a = 0,33$$

$$b = 0,42$$

Ces résultats sont établis avec les mêmes données portant sur sept ans (Fig.II.1.)

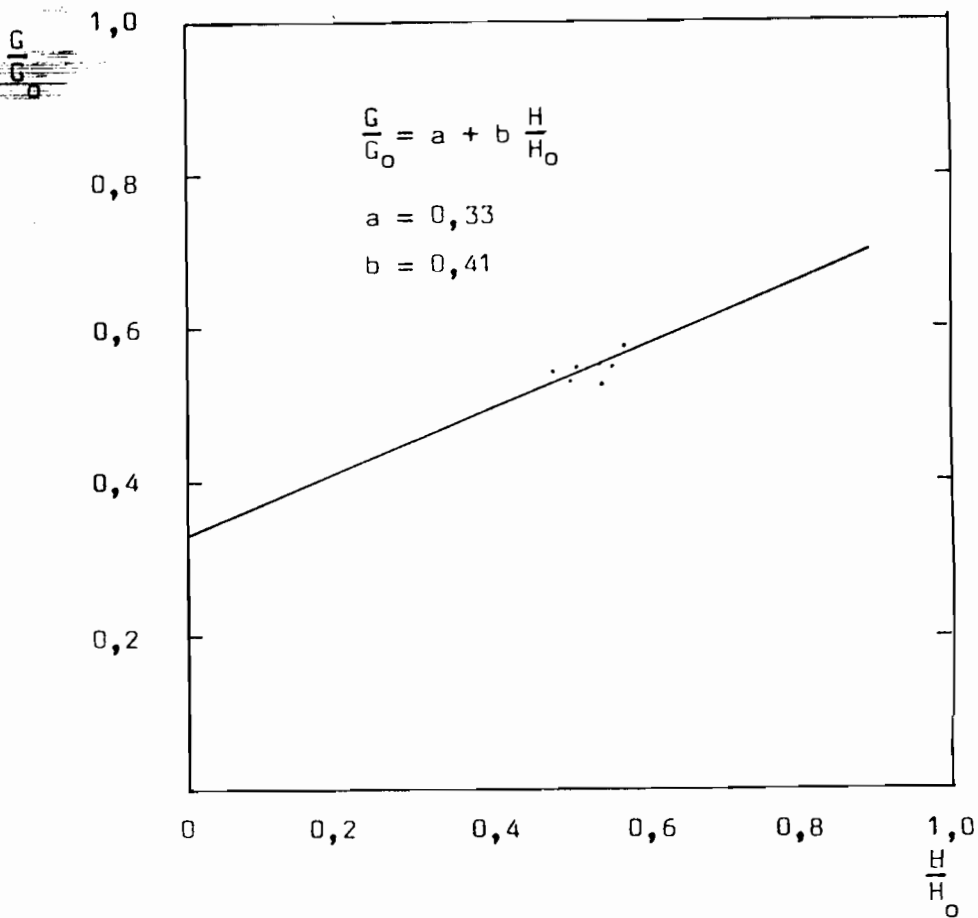


Fig.II.2.: Relation entre l'énergie globale G en fonction de la durée effective H d'insolation.

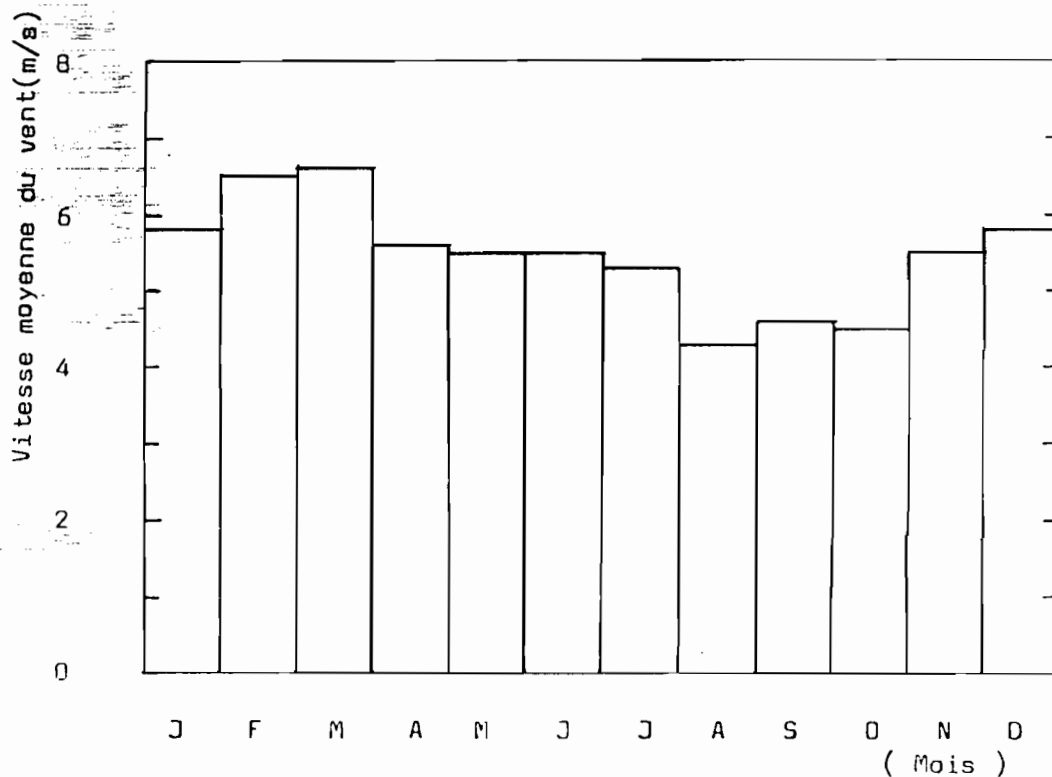


Fig. II.3.: Moyennes mensuelles de la vitesse du vent pour le site de N'DJAMENA (Valeurs relatives à la période de 1969 à 1970 inclus)

Les valeurs de a et b peuvent être comparées à celles qui ont été publiées [2] pour les sites de latitudes voisines de NDJAMENA :

Site	Latitude	a	b
MALAKAL (soudan)	9,55°	0,33	0,40
MADRAS (Inde)	13,1 °	0,31	0,43
NDJAMENA (Tchad)	12,12°	0,33	0,42

L'intérêt que présente la relation (2.1.) est que la mesure de la durée H au cours d'une période quelconque permet de calculer l'énergie globale G rayonnée sur un plan horizontal au sol. G_0 et H_0 sont calculables à partir des coordonnées géographiques du site (Annexe I).

La précision de calcul dans le cas de notre site est de l'ordre de $\pm 3 \%$ ce qui est plus que suffisant pour un calcul de projet comme cette étude.

II.3. Données de vitesse de vent

L'enregistrement de ces données a été effectué pendant de nombreuses décennies, dans la plus grande partie du continent africain, par la Météorologie Nationale, puis par L'ASECNA (ou Agence pour la Sécurité de la Navigation Aérienne en Afrique créée en 1959).

Les relevés disponibles relatifs à notre site sont trihoraires c'est-à-dire effectués à intervalles réguliers de 3 heures à une hauteur de 11 mètres par rapport au sol. Leur traitement approprié permet de connaître les caractéristiques du vent pour ce site. Ainsi on peut connaître la vitesse moyenne du vent, sa fréquence, la direction privilégiée du vent etc... Mais nous nous limiterons, quant à nous, à des traitements spécifiques de ces données qui auront pour but le calcul d'une éolienne capable de satisfaire en énergie les besoins d'une installation bien déterminée, compte tenu des données de vitesse de vent qui règne sur le site.

Les lois de répartition des vitesses du vent, en fonction du temps, caractéristiques du site sont :

2.3.1. Vitesse moyenne $\langle V \rangle$ du vent

La moyenne journalière de la vitesse du vent calculée par intervalle mensuel sur deux ans (1969-1970) montre que le site est bien venté aux mois de Février et Mars tandis que les mois d'Août, Septembre et Octobre sont les moins ventés (fig. II.3.) : il se produit donc la même évolution de $\langle V \rangle$ que l'énergie solaire globale G .

Signalons que - ce qui n'apparaît pas sur le graphique (Fig. II.3.) - les pointes de vitesse du vent se situent précisément pendant cette seconde période allant d'Août à Octobre.

2.3.2. Vitesse du vent et sa fréquence

Ordonnons une suite de vitesses V_i de vent et leurs fréquences f_i : nous obtenons une fonction $f_i(V_i)$ représentée par la figure II.4. On fera trois remarques à partir de cette figure :

- le maximum de fréquence, ou si l'on préfère, la durée maximale est obtenue pour un vent compris entre 4 et 5 m/s.

- la fréquence de vent nul est plus importante en Août que pour l'ensemble de l'année.

- les plus grandes vitesses du vent sont plus fréquentes au mois d'Août que pendant l'ensemble de l'année.

2.3.3. Fréquence cumulée du vent en fonction de la vitesse

Cette grandeur est la plus répandue dans la littérature sur les éoliennes. Elle se présente comme une fonction $V(f)$ où par définition, la fréquence cumulée f de la vitesse V est la somme des fréquences f_i de toutes les vitesses V_i , telles que $V_i \leq V$.

Les courbes en escalier de la figure II.5. représentent les répartitions des vitesses moyennes suivant des relevés correspondant à des valeurs de vitesses discrètes. Elles permettent d'estimer les courbes continues pour un nombre très élevé de relevés.

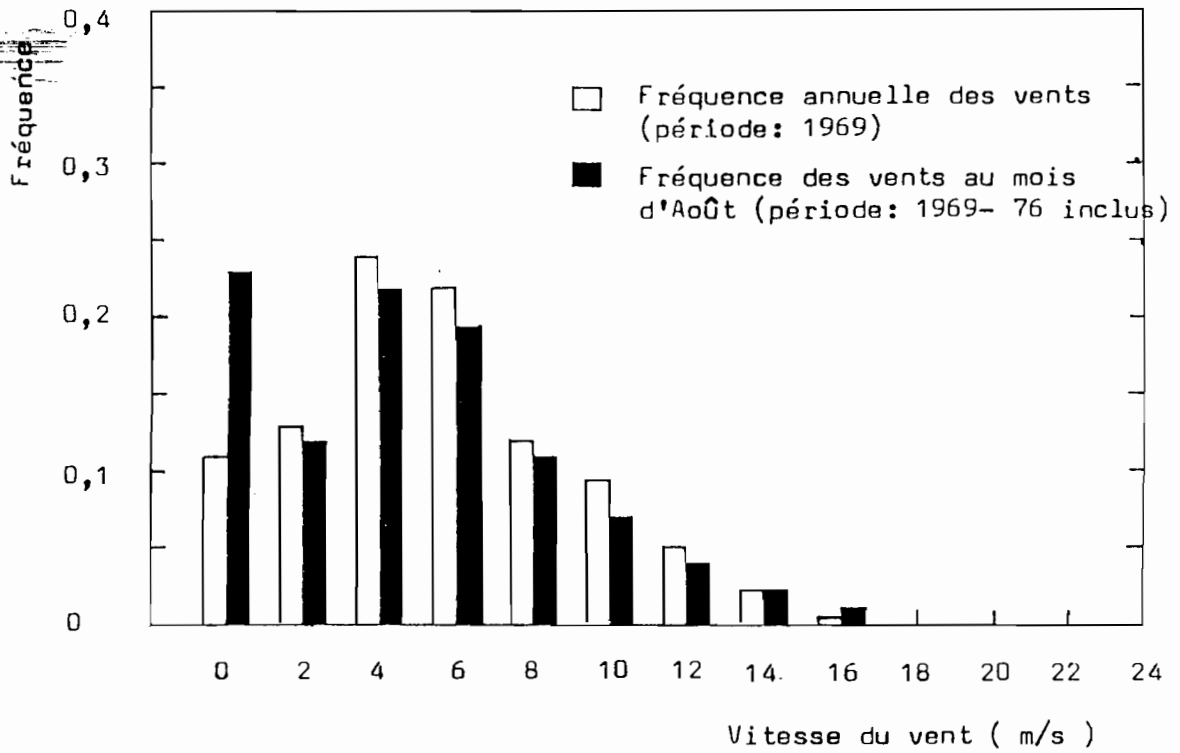


Fig. II.4.:Fréquence des vitesses du vent pour le site de N'DJAMENA (Tchad).

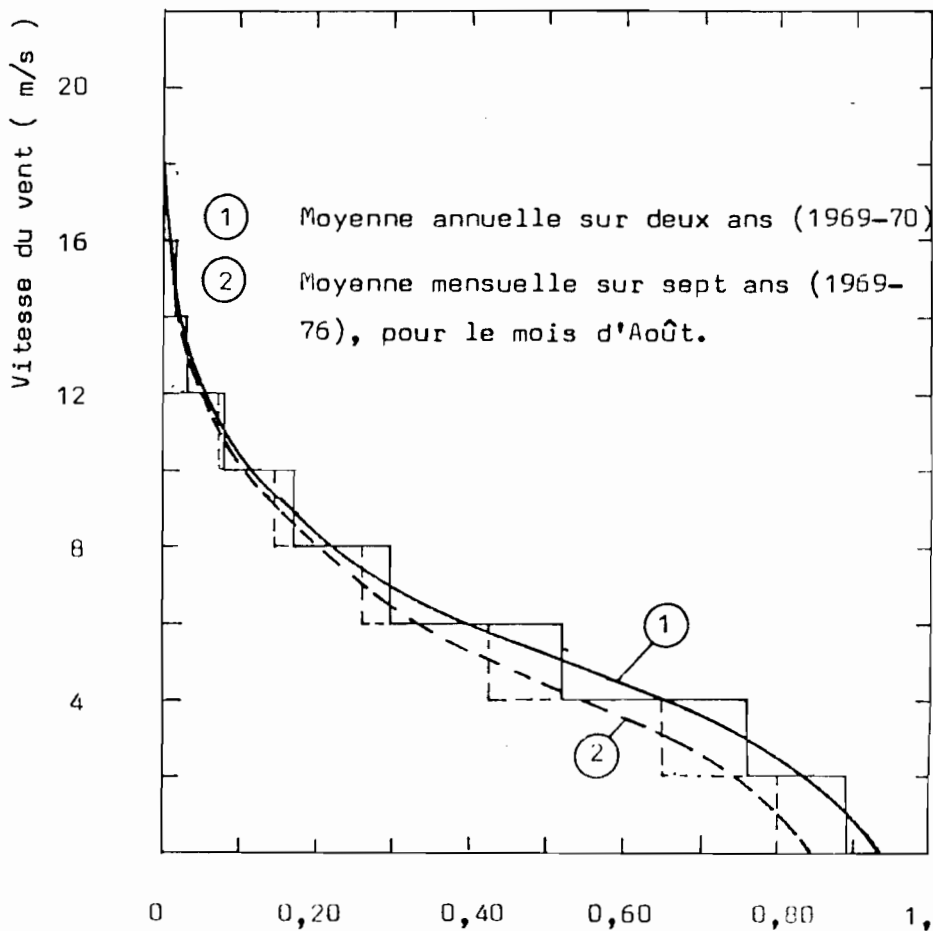


Fig.II.5.: Diagramme des vitesses du site étudié en fonction de leurs fréquences cumulées.

2.3.4. Répartition moyenne journalière des vitesses du vent

La répartition des vitesses du vent sur un cycle de 24 heures, pour le mois d'Août, est assimilable à une variation sinusoïdale (fig. II.6.). Les vitesses maximales étant situées vers 10 heures et les vitesses minimales vers 22 heures.

La moyenne arithmétique des vitesses, autrement dit la vitesse moyenne $\langle V \rangle$ du vent pour le mois d'Août est d'environ 4,75 mètres par seconde. Cette valeur montre que l'implantation d'une éolienne sur le site étudié peut être rentable.

En effet, une étude [3] publiée en 1973 a établi que le coût de l'énergie produite par une éolienne (à axe vertical sur laquelle l'étude était portée) est comparable à celui de l'énergie produite par les sources classiques d'énergie dès que la vitesse moyenne annuelle est égale ou supérieure à 4,5 mètres par seconde.

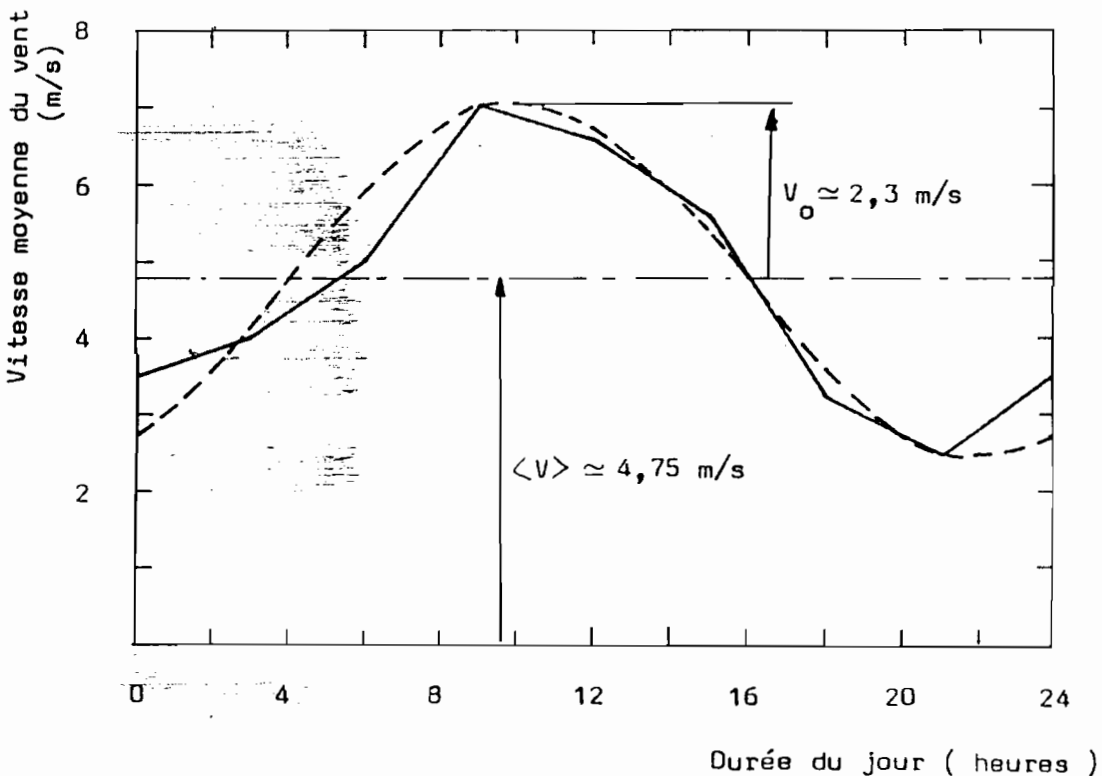


Fig.II.6.: Variation de la vitesse moyenne du vent sur une durée de 24 heures (Août)

III - EVALUATION DES BESOINS EN ENERGIE DE L'INSTALLATION

Le dimensionnement des deux sources de production d'énergie électrique, le générateur pv et l'éolienne fournissant parallèlement de l'énergie, dépend de la consommation de l'ensemble des récepteurs que l'on se propose d'alimenter. Ces récepteurs ne sont pas forcément en marche continue 24 heures sur 24 ; c'est pourquoi nous nous imposons un scénario plausible de consommation d'énergie électrique et qui s'énonce de la manière suivante :

A l'aide d'une unité autonome de production d'électricité comprenant un générateur pv et une éolienne, on se propose d'alimenter en eau un village de 1000 habitants, situé dans une région rurale d'accès difficile. On veut en outre satisfaire les besoins en électricité du dispensaire cantonal situé dans le même village.

On suppose que le village bénéficie des mêmes conditions climatiques que le site étudié dans les paragraphes précédents.

Les récepteurs électriques, alimentés en courant alternatif sous 220 ou 380 volts, comprennent :

a) Un groupe moto-pompe de 850 watts environ remontant de l'eau d'un puits pour être stockée dans un réservoir situé à une hauteur manométrique de 25 mètres (20 m de profondeur de puits). La consommation nette journalière du groupe moto-pompe est de 6,8 kwh pour un fonctionnement ininterrompu de 8 heures par jour, de 8 à 16 heures. Le choix de ce fonctionnement particulier dans le temps (bien que justifié par le fait que l'énergie pv et l'énergie éolienne culminent toutes les deux vers le milieu de la journée (cf. fig. II.6), n'est que provisoire. Une autre répartition de la puissance des récepteurs dans le temps sera envisagée au chapitre VID. La pompe produit ainsi 100 litres d'eau par habitant et par jour (y compris la consommation du bétail).

b) Un système d'éclairage du dispensaire dont les lampes en tubes fluorescents sont supposées toutes fonctionner 4 heures par jour, de 18 à 22 heures. La répartition des lampes se fait suivant le tableau III.1.

c) Un réfrigérateur-congélateur à deux groupes (2 moto-compresseurs) de 190/110 litres (compartiment frais et compartiment basse température respectivement) d'environ 250 watts et consommant 3 kwh environ par jour à la température ambiante de 32°C.

On admet en outre que les divers dispositifs de commande auxiliaires consomment environ 1 kwh par jour.

Récepteur	Puissance (KW)	Durée journalière de fonctionnement (h)	Consommation journalière (Kwh)
Groupe moto-pompe	0,850	8	6,8
Eclairage 10 chambres : 10 x 40 W 1 bureau : 1 x 40W 1 couloir: 3 x 60W 1 salle d'attente: 2 x 60 W 1 salle de soins : 2 x 60 W 1 cour extérieure: 4 x 40 W	1	4	4
Réfrigérateur : congélateur	0,250	12	3
Dispositifs auxiliaires de commande			1

TABLEAU III.1. : Répartition des récepteurs et leurs caractéristiques

La consommation journalière de l'énergie électrique s'élève à 15 kwh environ, et sa répartition en fonction du temps est représentée sous forme de diagramme de la figure III.1. Il est à remarquer que les hypothèses faites pour évaluer la consommation de l'énergie ne sont, de toute évidence, qu'indicatives :

- l'ensemble du système d'éclairage ne fonctionne pas forcément à sa puissance maximale pendant 4 heures par jour.

- et la consommation du réfrigérateur-congélateur dépend des facteurs comme le renouvellement des produits frais ou congelés, le rythme d'ouverture et de fermeture des portes, la température ambiante, etc...

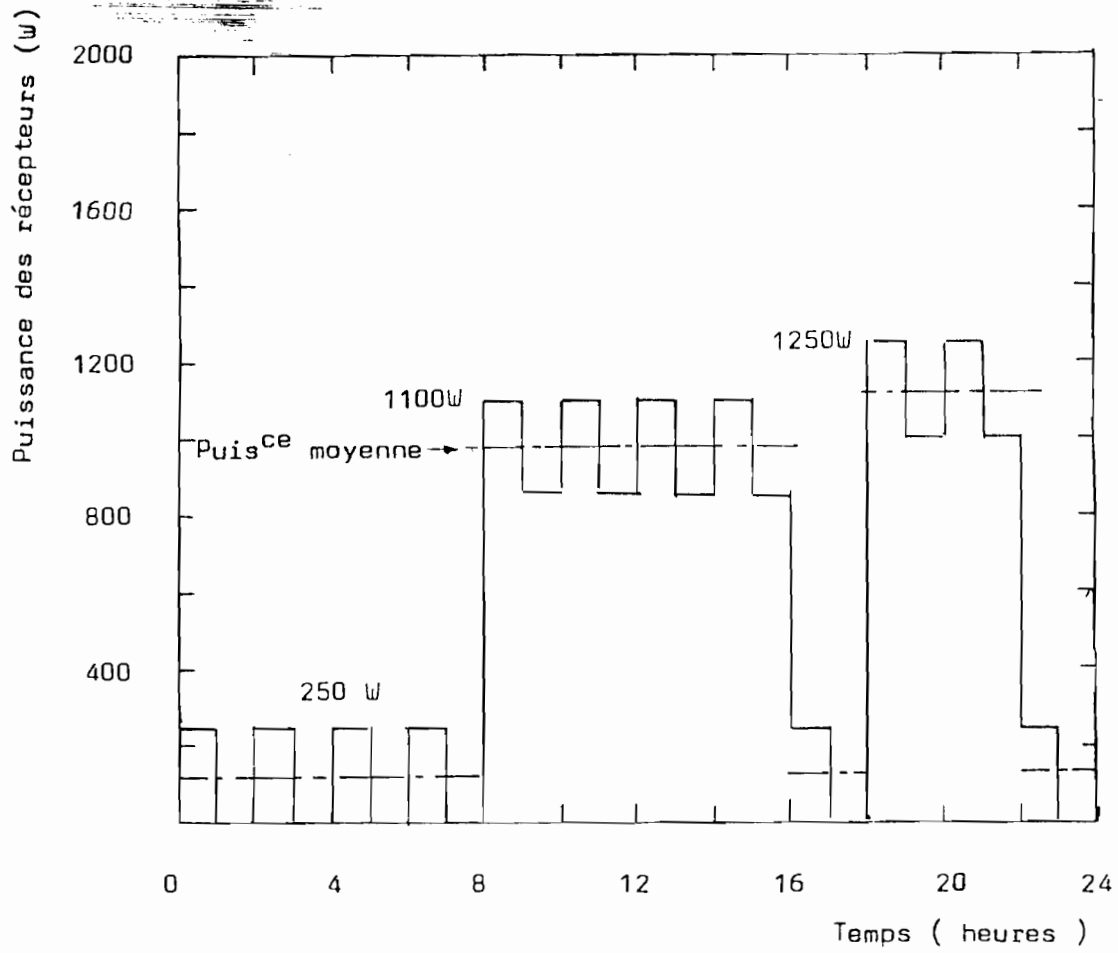


Fig.III.1.: Diagramme des puissances cumulées des récepteurs (R) sur 24 heures.

IV - PUISSANCE DES DEUX SOURCES : pv ET EOLIENNE

IV.1. Quelques considérations économiques

Le coût actuel des cellules pv et des éoliennes nous commande d'abord de situer le problème de l'approvisionnement énergétique de l'installation, sous l'angle de la rentabilité de l'opération.

Selon l'étude déjà citée [3], les éoliennes à axe vertical, autrement dit les éoliennes DARRIEUS*, peuvent être produites à des coûts de fabrication relativement faibles, 22 à 32 dollars par mètre carré de surface balayée.

Pour fixer les idées, supposons que l'on se propose d'installer une éolienne "DARRIEUS" de 4m de diamètre produisant l'énergie électrique de 8,5 kwh par jour du mois d'Août sur le site précédemment étudié.

Pour produire cette énergie, il faudrait un générateur photovoltaïque d'environ 1,5 kw crête pour les conditions d'ensoleillement relatives au même site et à la même période. Or, le watt-crête pv vaut actuellement 10 dollars environ et pour produire la même quantité d'énergie par voie pv il faudrait investir pour 40 à 60 fois le prix de l'éolienne DARRIEUS.

Ces chiffres montrent à l'évidence que dans l'état actuel des prix de l'énergie pv, il serait irréaliste d'envisager l'installation d'une source pv d'une certaine importance comme ce sera le cas dans notre étude. Cette éventualité devient souhaitable et même nécessaire lorsque le prix des puissances installées des deux sources (pv et éolienne) devient comparable. En effet, un tel système garantit doublement l'approvisionnement en énergie de l'installation :

- en réduisant considérablement le risque de manque d'énergie par l'absence totale ou partielle de vent ou d'ensoleillement.
- en diminuant de moitié le risque d'incident pouvant arrêter complètement l'approvisionnement en énergie de notre installation.

* Eolienne DARRIEUS, du nom de son inventeur Français qui l'a mise au point dans les années 1920.

On comparera également le prix de l'éolienne DARRIEUS (22 à 32 \$/m²) à celui de l'éolienne classique à axe horizontal qui selon la même source [3] est d'environ 150 dollars le mètre carré balayé, soit 5 à 6 fois plus cher.

Par rapport à l'éolienne à axe horizontal, le photovoltaïque coûte encore 8 à 10 fois plus cher.

En tout état de cause l'investissement qui viserait à installer deux sources pv et éolienne énergétiquement équivalentes n'est concevable que lorsque le rapport de prix existant actuellement entre ces deux sources tendra vers l'unité.

Selon certaines prévisions [5] et grâce aux progrès technologiques dans les méthodes de fabrication des cellules pv, le prix de 0,5 dollar le watt crête est envisageable d'ici à 1986. Dans cette hypothèse l'installation des deux sources pv et éolienne produisant, en qualités équivalentes de l'énergie électrique, serait possible. L'énergie pv serait alors 2 à 3 fois supérieure à l'énergie éolienne "DARRIEUS" dont le niveau actuel de prix du Kwh est comparable à celui produit par une centrale thermique.

Nous situerons notre étude dans cette perspective et chercherons donc à déterminer la taille des deux sources, dans les conditions mensuelles de plus faible ensoleillement moyen et de plus faible vitesse moyenne de vent : ceci afin d'être certains de satisfaire pendant toute l'année les besoins en énergie de l'installation définie au chapitre III.

Aussi, prendrons-nous tout naturellement les conditions d'ensoleillement et de vitesse de vent régnant au mois d'Août (Fig. II.1. et Fig. II.3.) pour dimensionner le générateur pv G_{pv} et l'éolienne G_e .

IV.2. Source photovoltaïque

On se propose d'alimenter l'installation définie au chapitre III en lui fournissant par la voie pv la moitié de sa demande en énergie E_{pv} , soit 7,5 Kwh environ.

Cette demande est assurée dans les conditions moyennes d'insolation correspondant au mois d'Août, soit une durée moyenne d'insolation directe d'environ 6,4 heures.

A l'aide de l'équation (2.1.) permettant d'évaluer l'énergie globale moyenne journalière $\langle G \rangle$ qui est d'environ $5,64 \text{ Kwh/m}^2$ pour le mois d'Août, nous pouvons évaluer la surface totale A_{pv} du générateur pv, connaissant le rendement moyen de la chaîne de conversion de l'énergie pv η_{pv} et l'énergie E_{pv} livrée au point de consommation :

$$\langle E_{pv} \rangle = \eta_{pv} \cdot A_{pv} \cdot \langle G \rangle \quad (4.1.)$$

où

$$\eta_{pv} = \eta_c \eta_{ds} \eta_M \eta_S \quad (4.2.)$$

η_c : est le rendement de conversion pv de la lumière par les cellules solaires. Il est d'environ 0,1 pour les cellules RTC qui servent de soutien à notre étude (voir annexe II). Ce rendement ne varie pratiquement pas en fonction du flux de lumière ϕ_L incident et varie très faiblement en fonction de la température (l'écart de rendement est de + 3 % lorsque la température de la jonction (T_j) passe de 0 à 60°C).

η_{ds} : rendement dû aux pertes par chute de tension occasionnée principalement par l'insertion des dispositifs de protection des cellules comme les diodes que nous verrons au paragraphe 4.2.2. L'ensemble du rendement η_{ds} est évalué à 0,98 en négligeant les pertes par effet Joule des connexions d'assemblage des modules pv.

η_M : rendement moyen du moteur M, (à aimant permanent) $\approx 0,80$

η_S : rendement moyen de l'alternateur M_S , égal à 0,90 environ.

Pour les conditions moyennes d'insolation du mois d'Août ($\approx 6,4$ h par jour), la surface utile des modules pv utilisés (voir annexe II) d'après l'équation (4.1.) doit être de :

$$A_{pv} = \frac{7,5 \text{ Kwh}}{0,1 \times 0,98 \times 0,80 \times 0,90 \times 5,64} = 19,95 \text{ m}^2$$

Ces modules pv se présentent sous forme de 20 cellules solaires de 100 mm de diamètre montées en série et noyées dans une résine transparente. Puis l'ensemble est compris entre deux plaques de verre de protection.

D'après ces caractéristiques dimensionnelles, il faut environ 120 de ces modules pour satisfaire la part pv des besoins en énergie de l'installation. La puissance optimale de G_{pv} sera de 1,86 kw crête environ pour un éclairement φ_L de 1 kw/m^2 à la température T_j de la jonction de 60°C (données du constructeur des cellules).

4.2.1. Couplage série-parallèle des modules pv

Le générateur pv présente des particularités qui ne sont pas identiques à celles des autres sources d'énergie électrique et notamment le réseau classique de distribution électrique :

- . le courant et la tension fournis par un générateur pv ne sont pas constants. Ils varient dans le temps avec l'intensité lumineuse que reçoit le générateur. Cette intensité lumineuse dépend des facteurs atmosphériques.
- . la puissance d'un générateur pv est généralement très limitée, contrairement à celle du réseau électrique qui est très grande par rapport aux récepteurs électriques.
- . le fonctionnement correct d'un générateur pv exige que la puissance absorbée par le (ou les récepteurs) corresponde exactement à la puissance optimale fournie par le générateur pour chaque niveau d'éclairement donné.

La caractéristique courant-tension du générateur pv dépend du couplage série-parallèle des modules. Ce couplage se fait en accord avec les caractéristiques électriques du récepteur, en l'occurrence le moteur M.

Si s et p sont les nombres de modules montés en série et en parallèle, la tension U et le courant I fournis par le générateur pv s'écrivent :

$$U = sv$$

$$I = pi$$

où v et i sont la tension et le courant fournis par chaque module.

L'équation donnant la caractéristique U-I du générateur pv s'écrit par analogie avec celle de la cellule élémentaire [6] :

$$U = \frac{20 \cdot s}{\beta} \ln \left(\frac{I_{ph} - I}{I_s} + 1 \right) - R_s \cdot I \quad (4.3.)$$

où

- 20 : nombre des cellules élémentaires que comprend chaque module

$$\beta = \frac{q}{A \cdot k_B \cdot T}$$

avec q : la charge élémentaire de l'électron ($= 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$)

A : le facteur d'idéalité de la diode. Sa valeur est comprise entre 1 et 2. Pour les cellules pv, ce facteur est généralement pris égal à l'unité.

k_B : la constante de Boltzmann ($= 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$)

T : la température en K. C'est aussi la température de la jonction T_j (égale à 333 K pour les calculs qui vont suivre).

- I_{ph} : le photocourant fourni par le générateur (en ampère). Il est égal à $p i_{ph}$ et il est très peu différent du courant de court-circuit I_{cc} .
- I_s : le courant inverse de saturation du générateur (en A)
- R_s : la résistance équivalente en série du générateur (en Ω). Elle est égale au produit de la résistance r_s du module par le rapport s/p :

$$R_s = \frac{s \cdot r_s}{p} \quad (4.5.)$$

Pour être plus exact, il conviendrait de tenir compte de la résistance des connexions. Mais on peut légitimement les négliger parce qu'elles sont très faibles.

4.2.2. Protection du générateur pv

Le couplage série-parallèle des cellules solaires a pour but de procurer une source suffisante de tension et de courant. Cette opération introduit certains risques qu'il faut impérativement prévenir. Il s'agit en particulier d'éviter que la tension inverse de claquage de la cellule et le courant direct maximum n'aient lieu.

Plus la taille $s \times p$ du générateur est importante, plus grande est la probabilité que de tels accidents se produisent. Cette probabilité est encore accentuée par des éclaircissements non-homogènes des cellules qui ne manqueraient pas de se produire : cellule occultée par une feuille par exemple... Il est donc nécessaire de protéger le générateur pv contre ces risques. A cet effet les moyens classiques de protection tels que les fusibles ne suffisent plus. Il faut des dispositifs beaucoup plus élaborés tels que les diodes [7]. L'adjonction judicieuse de celles-ci sur les sous-matrices ($s' \times p'$) de dimensions plus petites que la matrice principale ($s \times p$) constitue la meilleure protection du générateur contre tout risque d'accidents graves.

Pour limiter les tensions inverses accidentelles, une diode de valeur appropriée D_p est placée en parallèle avec chaque sous-matrice ($s' \times p'$) (Fig. IV.1.).

Quant aux courants directs accidentels, ils sont limités par une diode D_s montée en série avec les sous-matrices ($s' \times p'$).

Les diodes D_p ne diminuent en rien la puissance du générateur G_{pv} . En conséquence si quelque doute subsiste sur la valeur maximale de la tension inverse tolérée par la cellule, on a intérêt à multiplier les points de protection de G_{pv} par ces diodes.

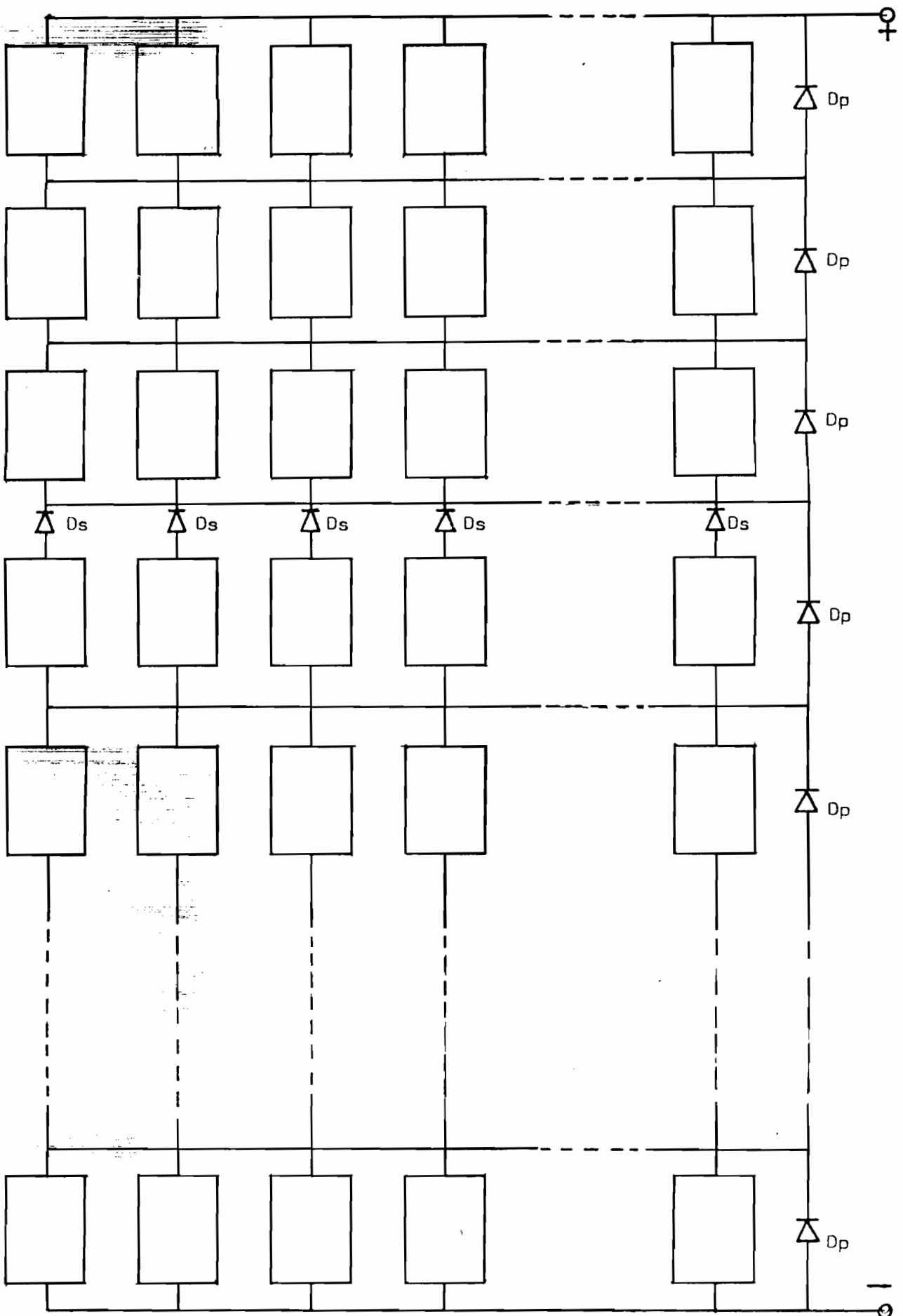


Fig.IV.1.: Protection du générateur pv par un système de diodes D_s en série et D_p en parallèle réparties sur la matrice $s \times p$ des modules pv.

Les diodes série D_S , par contre, dissipent de l'énergie par les chutes de tension essentiellement résistives. Si r_{ds} est la résistance élémentaire de n_{ds} diodes D_S nécessaires pour protéger s modules pv en série, la résistance équivalente R_{ds} de l'ensemble des diodes D_S protégeant un générateur pv de p branches en parallèle sera :

$$R_{ds} = \frac{n_{ds}}{p} \cdot r_{ds} \quad (4.6.)$$

L'emploi des diodes Schottky (ou redresseur au Si à barrière métallique) comme diodes série D_S minimise la chute de tension qu'elles provoquent : 0,4 volt au maximum pour une tension limite de 40 à 50 volts.

Dans la sous-matrice ($s' \times p'$), il peut y avoir défaillance d'une ou plusieurs cellules : cellule mal éclairée par exemple. Cette cellule se comporte alors comme une résistance pure sur laquelle débitent les autres cellules. L'importance de la puissance dissipée par cette cellule atteint rapidement des valeurs pouvant entraîner sa destruction.

Une autre possibilité qui limite les risques de destruction des cellules, par la défaillance de celles-ci, consiste à pratiquer des liaisons électriques entre les points qui sont normalement au même potentiel sur la sous-matrice ($s' \times p'$) : on limite ainsi la valeur du courant qui traverse la cellule défaillante en lui offrant la possibilité de circuler dans les branches voisines. Ce moyen permet de réduire le nombre des diodes D_S à une valeur aussi faible que possible.

Il est important que le moteur M ne débite pas sur le générateur pv par brusque affaiblissement de la luminosité. Il faut par conséquent placer sur le circuit principal, en série avec le moteur et le générateur pv, une diode D_g pour la protection générale de ce dernier.

4.2.3. Caractéristique courant-tension I-U de G_{pv}

La répartition série-parallèle des modules fixe l'échelle du courant I et de la tension U de G_{pv} . L'allure générale de la caractéristique I-U de G_{pv} est la même que celle du module ou de la cellule élémentaire (voir Annexe II).

Le critère de répartition dépend du courant et de la tension nominaux du récepteur que l'on veut alimenter.

Pour tenir compte de la résistance des diodes D_s introduites, l'équation caractéristique (4.3) s'écrit :

$$U = \frac{20 \cdot s}{\beta} \ln \left(\frac{I_{ph} - I}{I_s} + 1 \right) - R_G \cdot I \quad (4.7)$$

où la résistance R_G du générateur pv est égale à :

$$R_G = \frac{1}{p} (s \cdot r_s + n_{ds} \cdot r_{ds}) \quad (4.8)$$

IV.3. Source éolienne

L'éolienne qui constitue le second dispositif d'approvisionnement en énergie de notre installation est d'un usage relativement ancien : le moulin à vent était déjà connu en Chine et en Perse deux mille ans avant notre ère [8]. En Europe, il fut introduit beaucoup plus tard au 13ème siècle par les Croisés ; les moulins hollandais de technique plus améliorée (hélices orientables) datent du 14ème siècle.

Le principe de fonctionnement d'une éolienne et les équations dynamiques décrivant son mouvement sont résumés par les considérations suivantes:

a) La puissance utile fournie par l'arbre éolien n'est qu'une fraction C_p de la puissance cinétique du vent. C_p appelé coefficient de puissance est donc le rendement de l'éolienne. Il se présente en général comme une fonction d'un paramètre λ . La limite ultime de C_p , appelée rendement de BETZ (du nom du savant Allemand qui fut le premier à le calculer), est égale à $16/27 \simeq 0,59$. Les machines actuelles ont un coefficient de puissance de loin inférieur à cette valeur théorique (Fig. IV.2.)

b) Le paramètre de fonctionnement λ d'une éolienne G_e : c'est le rapport de la vitesse périphérique de l'éolienne par la vitesse du vent :

$$\lambda = \frac{\Omega_{Ge} \cdot d}{2 V} \quad (4.9.)$$

Remarque : Théoriquement le coefficient de puissance $C_p(\lambda)$ est grand pour un paramètre λ grand. Mais pratiquement la vitesse de rotation de l'éolienne est limitée pour des raisons de contrainte mécanique sur la machine : en général λ est inférieur à 10.

4.3.1. Choix de l'éolienne

Pour éviter des pertes inutiles de l'énergie mécanique fournie par l'éolienne, il conviendrait de l'utiliser immédiatement. Mais comme nous ne pouvons accoupler directement l'éolienne à l'alternateur M_5 , nous nous proposons de n'utiliser cette énergie qu'après stockage sous forme cinétique à l'aide de la roue R_I .

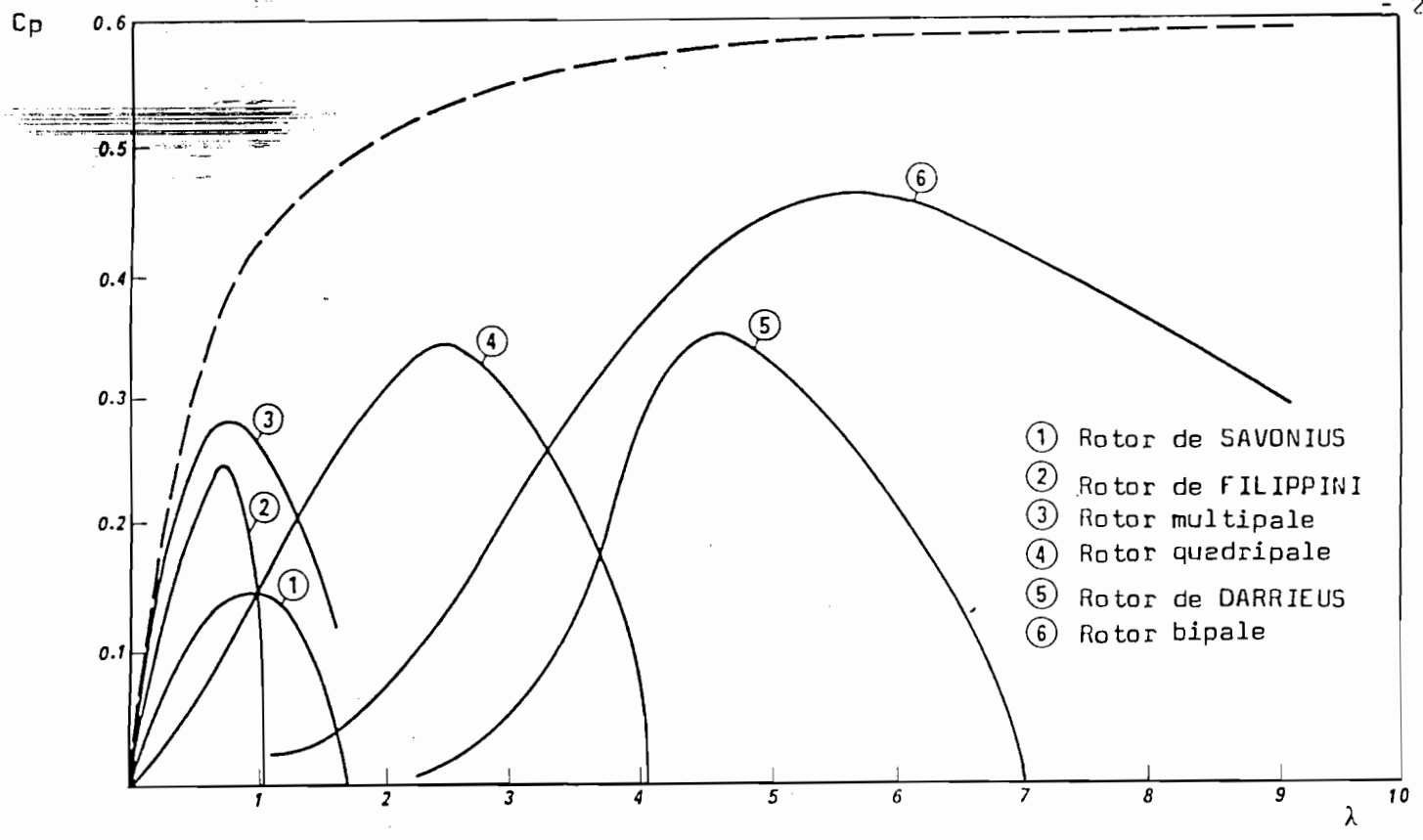


Fig.IV.2.: Le coefficient de puissance C_p en fonction du paramètre de fonctionnement λ , pour différentes machines éoliennes (réf. [9]).

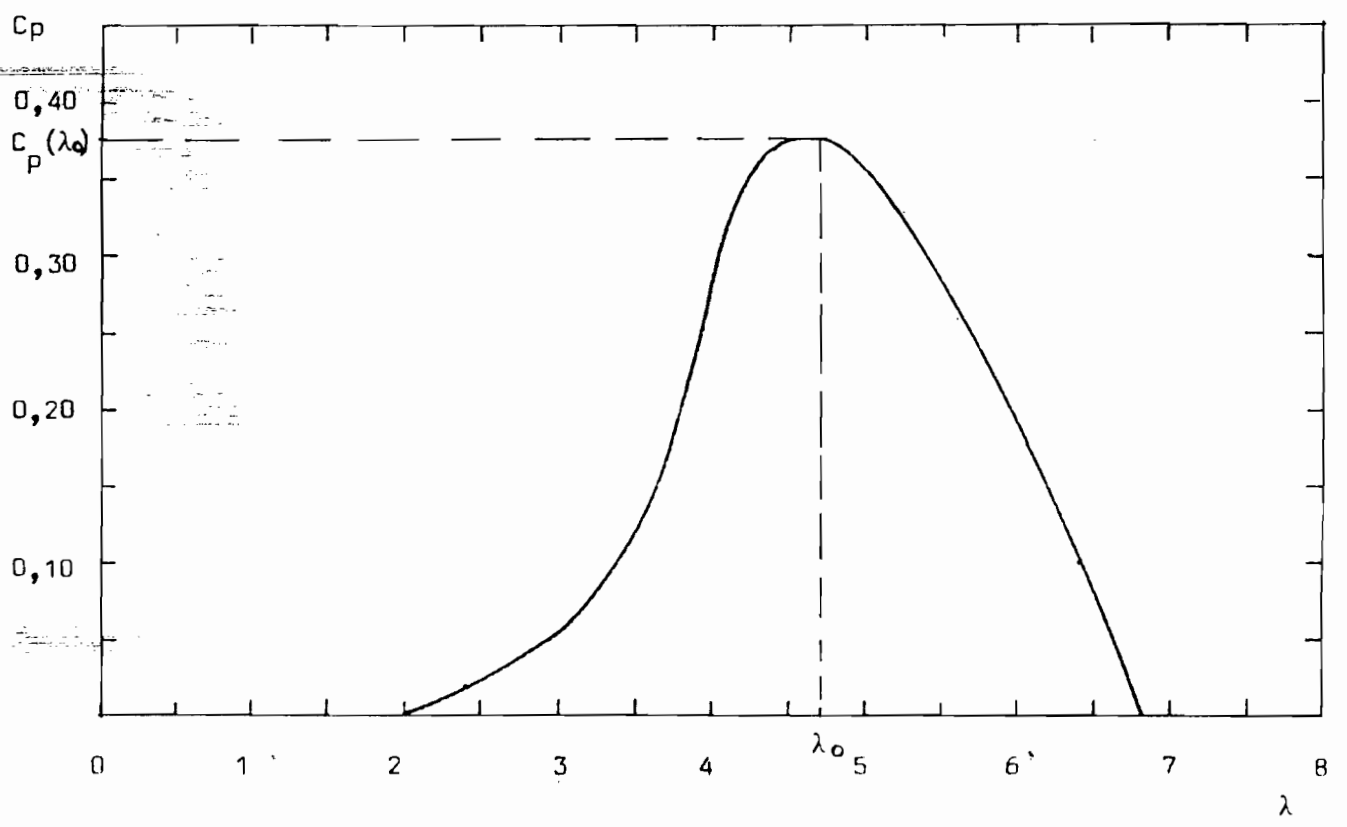


Fig.IV.3.: Le coefficient de puissance C_p de l'éolienne "Darrieus" (réf. [4]) en fonction de λ .

L'éolienne qui se prête le mieux à la récupération de l'énergie mécanique de l'éolienne en bas du pylône doit être à axe vertical pour éviter de recourir à un système de renvoi d'angle nécessaire dans le cas de l'éolienne à axe horizontal.

La plus indiquée dans cette catégorie est l'éolienne "DARRIEUS". En effet d'après des études effectuées à ce sujet [10], c'est la machine qui convient le mieux à la production de l'énergie électrique de faible puissance.

Les raisons économiques (cf. 4.1.) penchent également en sa faveur. Son coefficient de puissance $C_p(\lambda)$ est donné par la figure IV.3..

4.3.2. Dimensions de l'éolienne

La taille d'une éolienne est en rapport direct avec l'énergie que l'on désire en tirer compte tenu de la vitesse moyenne du vent qui caractérise le site où on veut l'implanter.

Ayant situé notre étude dans la perspective où le coût de l'énergie fournie par G_e est équivalent à celui de l'énergie fournie par G_{pv} , nous allons déterminer le diamètre de l'éolienne pour satisfaire la moitié de la consommation journalière avec les données de vitesse moyenne du vent au mois d'août (comme pour G_{pv}).

Si A_{Ge} est la surface balayée par l'éolienne capable de nous fournir une énergie moyenne $\langle E_{Ge} \rangle$ pendant une période donnée, on écrit [11] :

$$\langle E_{Ge} \rangle = (k_e \cdot A_{Ge} \cdot \langle V \rangle^3) \cdot T \cdot k_s \quad (4.10)$$

où

$$k_e = \langle \eta_m \eta_{34} \eta_{12} \eta_5 \rangle \left(\langle C_p \rangle \frac{1}{2} \rho_{air} \right)$$

η_m : rendement du multiplicateur mécanique de vitesse. Ce rendement est généralement excellent même lorsque le rapport des vitesses est grand. Nous retiendrons un rendement de 0,92 ce qui correspond à un multiplicateur de qualité très moyenne

$\eta_{12,34}$: rendements des variateurs électromagnétiques de vitesse (qui seront étudiés plus en détail au paragraphe V.3.). seront par anticipation supposés égaux à 0,80 en moyenne.

η_5 : rendement de l'alternateur est généralement très bon. Selon les constructeurs, il est d'environ 0,92 à la puissance nominale pour les machines d'environ 2 kVA qui conviennent à cette étude. Nous prendrons pour nos calculs un rendement moyen de 0,90.

C_p : coefficient de puissance de l'éolienne. Nous adopterons une valeur moyenne de C_p égale à 0,30 pour l'évaluation du diamètre de l'éolienne.

ρ_{air} : masse spécifique de l'air. Dans les conditions d'altitude et de température moyenne du site choisi, on l'estime à environ $1,14 \text{ kg/m}^3$.

A_{Ge} : surface balayée par l'éolienne. Pour une éolienne "DARRIEUS" de hauteur égale au diamètre d , elle est donnée par la relation (3.4.) :

$$A_{Ge} = \frac{2}{3} \cdot d^2 \quad (4.11)$$

$\langle V \rangle$: vitesse moyenne du vent relative au site d'implantation ($\approx 4,75 \text{ m/s}$ pour la période d'Août).

T : durée à laquelle se rapporte l'évaluation de $\langle E_{Ge} \rangle$. Dans le cas présent $T = 24$ heures.

K_s : coefficient d'irrégularité de la vitesse du vent. C'est une constante semi-empirique qui provient de la nature statistique du vent. Elle est définie par le rapport :

$$k_s = \frac{\int_0^T [V(t)]^3 dt}{\int_0^T \langle V \rangle^3 dt} \quad (4.12)$$

La valeur de k_s suggérée par JULLIEN [10] en 1956 était de 1,20. Par suite des analyses faites récemment (1975), PONTIN évalue k_s à 2,06.

Dans le cas de notre site, la répartition des vitesses de vent (au mois d'Août) est quasi-sinusoidale :

$$V(t) = \langle V \rangle + V_0 \sin \frac{\pi}{12} t$$

On trouve $k_s = 1,31$.

Il convient de remarquer néanmoins que les relevés trihoraires des vitesses V qui sont à la base de l'établissement de la Fig. II.6. ne tiennent pas compte des fréquentes augmentations de V de courte durée, observables sur notre site au mois d'Août. Par conséquent, il nous semble plus réaliste de prendre en considération pour les calculs qui suivent, une valeur K_s plus élevée, égale à 2,3. La relation (4.10) conduit alors à un diamètre d'éolienne égal à environ 4,6 mètres.

4.3.3. Caractéristiques de l'éolienne

Les grandeurs généralement définies pour caractériser une éolienne sont :

a) La vitesse nominale V_n du vent

C'est la vitesse pour laquelle l'éolienne fournit une puissance nominale (couple et vitesse nominaux). Elle est supérieure à la vitesse moyenne $\langle V \rangle$ et généralement comprise entre deux valeurs [8] :

$$1,5 \langle V \rangle \leq V_n \leq 1,9 \langle V \rangle$$

On prendra :

$$V_n = 1,7 \langle V \rangle \quad (\approx 8 \text{ m/s})$$

On définit également V_n par rapport à la vitesse de démarrage V_0 à partir de laquelle l'éolienne fournit une puissance utile [11] :

$$\frac{V_n}{V_0} = 2 \text{ à } 3$$

Pour la présente étude, V_0 sera la vitesse à partir de laquelle une puissance utile sera fournie à la roue R_I .

b) La puissance P_{Ge} de l'éolienne

La puissance développée sur l'arbre de l'éolienne à la vitesse V du vent s'écrit :

$$P_{Ge} = C_p \frac{1}{2} \rho_{air} A_{Ge} V^3 \quad (4.13)$$

L'éolienne "DARRIEUS" de diamètre défini précédemment pourra développer à la vitesse nominale de 8 m/s une puissance nominale de 1,5 kW avec le C_p maximal égal à 0,37.

c) Les autres caractéristiques spécifiques de l'éolienne

En dehors de la différence morphologique de la machine de DARRIEUS par rapport aux autres éoliennes : axe vertical, absence de gouvernail..., il existe d'autres spécificités fondamentales :

- l'auto-démarrage de l'éolienne "DARRIEUS" est impossible quelle que soit la vitesse du vent. Il faut donc lancer l'éolienne lorsque la vitesse du vent atteint une valeur V_0 par exemple.
- Lorsque la vitesse de rotation de l'éolienne est maintenue à une valeur constante, il y a auto-régulation de sa puissance c'est-à-dire que celle-ci croît, puis décroît pour tendre vers zéro.

V - AUTRES ELEMENTS DU SYSTEME DE CONVERSION D'ENERGIE

Parmi les autres éléments de la chaîne de conversion de l'énergie pv et de l'énergie éolienne, nous allons distinguer deux groupes :

- un premier groupe d'éléments qu'on peut acquérir directement sur le marché et dont nous nous servons, s'il y a lieu, des caractéristiques communiquées par leur constructeur. Ces éléments dans l'ordre de leur étude seront le moteur M, l'alternateur M_5 et le multiplicateur mécanique de vitesse M_m .
- un second groupe d'éléments étudiés par nous-mêmes au Laboratoire de Génie Electrique des Universités Paris VI et Paris XI est limité aux deux variateurs électromagnétiques de vitesse ($M_1 M_2$) et ($M_3 M_4$).

L'étude de la roue d'inertie sera dissociée de ces deux groupes. Son dimensionnement sera comparé à celui de 1 Kwh/3Kw mis au point par la SNIAS.

V.1. Le moteur M

Ce moteur à courant continu (c.c.), doit présenter trois caractéristiques principales :

- . être apte à fonctionner, en régime continu, sous une tension et un courant de charge qui peuvent varier. D'ordinaire, les machines sont conçues pour fonctionner sous une tension constante. Seul le courant est variable.
- . avoir un couple de démarrage élevé afin de pouvoir fournir une puissance utile aux faibles éclairagements.
- . avoir si possible un rendement élevé.

5.1.1. Tension d'alimentation de M et couple moteur fourni par M

La tension U fournie par G_{pv} est de par sa nature variable. Elle dépend en effet de l'éclairement incident φ_L du générateur pv. Comme la vitesse d'un moteur à courant continu (c.c.) est proportionnelle à sa tension d'alimentation, tous les paramètres étant constants par ailleurs, la vitesse N_M de M variera avec l'éclairement.

Pour maintenir N_M dans des limites bien précises il est possible d'agir sur le couple C_1 de M_1 compte tenu des valeurs relatives des couples C_M de M et C_5 de M_5 .

Dans le type de couplage G_{pv}/M envisagé, il s'agit de fournir autant que possible, une énergie mécanique avec de faibles illuminations : le couple de démarrage C_d de M doit par conséquent être important.

Une étude [12] a montré que les moteurs à excitations série et indépendante conviennent le mieux à un tel couplage G_{pv}/M . En effet :

- le couple d'un moteur à excitation série est proportionnel au carré du courant d'induit. Mais aux faibles éclairagements, le courant d'induit est également faible et par suite le couple de démarrage d'un moteur série reste faible.
- par contre celui d'un moteur à excitation indépendante est plus important même avec de faibles éclairagements. L'utilisation d'une excitation par aimant permanent comme source indépendante d'excitation permet non seulement de bénéficier de ce couple C_d élevé (avantage déterminant), mais également de supprimer l'emploi d'une source indépendante d'excitation (batteries auxiliaires) et les pertes Joule dissipées dans les enroulements d'excitation.

Les moteurs shunt sont à déconseiller car leur couple de démarrage est très faible et ce n'est qu'à de fortes illuminations que ces moteurs commencent à fournir une puissance mécanique.

De ces caractéristiques générales qui viennent d'être énumérées, notre choix de M se portera naturellement sur un moteur à excitation à aimant permanent.

Nous prendrons, en particulier, un moteur cc à aimant permanent, conçu spécialement par la Société Leroy-Somer pour être couplé aux générateurs pv.

La courbe de rendement η_M de ce moteur en fonction de la puissance P_M fournie est donnée par la figure V.1.

Sa puissance nominale est de 1,3 kw. Mais il peut comme en témoigne la courbe $\eta_M(P_M)$ développer une puissance de 2 Kw, ce qui correspond à la puissance crête de G_{pv} (≈ 2 Kw) à 60 C et sous un flux lumineux ϕ_L de 1 Kw/m^2 .

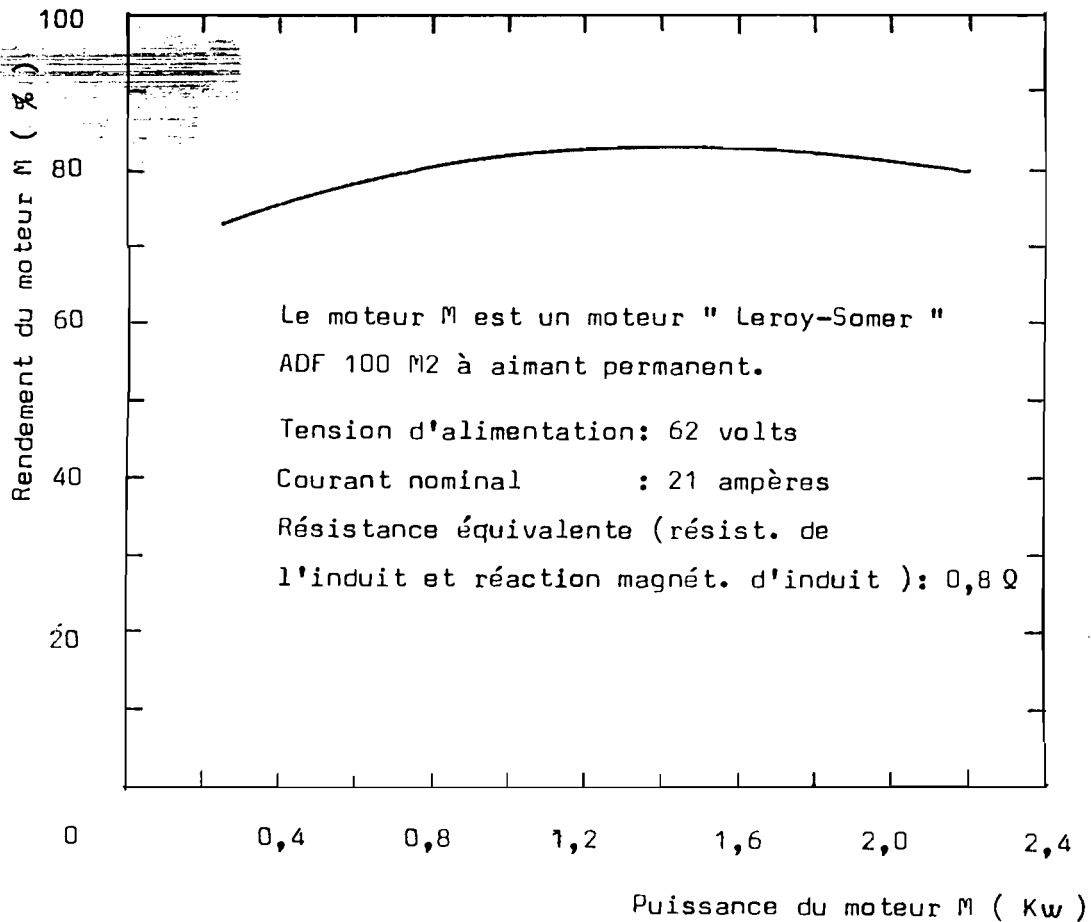


Fig.V.1.:Rendement du moteur M en fonction de la puissance électrique reçue.

La caractéristique vitesse-courant du moteur M que nous a communiquée le constructeur est une droite. Il en résulte que l'équation de la chute de tension due à la fois à la résistance ohmique R'_M de l'induit et à la réaction magnétique $h_M(I)$ d'induit :

$$\Delta U_M = R'_M I + h_M(I)$$

peut s'écrire :

$$\Delta U_M = R_M I \quad (5.1.)$$

où : $R_M = R'_M + \frac{h_M(I)}{I}$: résistance équivalente de l'induit et de la réaction magnétique d'induit. Elle est égale à environ 0,8 Ω.

La variation suivant une droite de $\Delta U_M(I)$ provient du fait qu'en aucun moment le circuit magnétique de M n'est saturé par le courant d'induit qui va jusqu'à 36 A lors des essais.

REMARQUE

Le moteur M est appelé à ne fournir qu'une dizaine d'heures par jour de travail utile. Il est donc inutile de le faire travailler 24 heures sur 24, ce qui aurait entraîné la consommation, durant la nuit, d'une partie de l'énergie stockée par R_I en pures pertes (pertes à vide dans M).

En ne faisant fonctionner M que pendant la journée, on allonge d'autant sa durée de vie. Il faut en conséquence prévoir un dispositif d'accouplement des deux demi-arbres qui relie M et M_5 .

Aux faibles éclairagements :

- l'enclenchement de ce mécanisme se fera lorsque la vitesse à vide $N_M(I_0)$ de M atteindra celle de l'alternateur.
- alors que le déclenchement aura lieu lorsque la puissance utile de M sera nulle.

V.2. L'alternateur M_5

Nous nous bornerons dans ce paragraphe à ne rappeler que ce qui est essentiel pour notre présente étude, à savoir que l'alternateur M_5 entraîné à sa vitesse de synchronisme, doit fournir une tension constante de 220/380 volts (respectivement tensions simple et composée).

Il doit en outre avoir un bon rendement.

a) Tension fournie par M_5

Les récepteurs électriques couramment utilisés sont alimentés sous une tension garantie à $\pm 10\%$ près, par le réseau de distribution (E.D.F.).

Il existe dans le commerce des alternateurs à excitation par aimant permanent, munis éventuellement d'un dispositif de régulation de tension lorsque les récepteurs doivent être alimentés dans des limites étroites de tension.

Comme les récepteurs (R) envisagés dans notre étude peuvent tolérer une fluctuation de tension de $\pm 10\%$ puisqu'ils sont issus de fabrication courante, l'alternateur M_5 peut fournir une tension à vide, supérieure de 10 %, et une tension en pleine charge, inférieure de 10 % par rapport à la tension nominale (220/380 volts).

b) Choix de l'alternateur M_5

Sans nous fournir des documents exploitables et notamment une courbe de rendement d'alternateur de puissance située dans la gamme que nous recherchons (1 à 5 KVA), les constructeurs que nous avons consultés, (notamment AUXILEC, LEROY-SOMER et CEM) ont admis un rendement de l'ordre de 0,92 pour un fonctionnement nominal de ces machines synchrones.

Nous choisirons un alternateur de 3 KVA dont le rendement moyen sera supposé égal à 0,90 pour l'ensemble de nos calculs.

V.3. Les variateurs électromagnétiques de vitesse (M_1M_2) et (M_3M_4)

5.3.1. Description générale

Le variateur de vitesse (M_1M_2) représenté par la Figure V.2., symétrique de (M_3M_4) par rapport à la roue R_1 , est constitué de deux machines homopolaires couplées en groupe Ward-Léonard d'axe vertical.

Chacune de ces machines se compose :

- d'un rotor dont le noyau cylindrique en acier doux est monté (montage forcé) dans une chemise en cuivre d'épaisseur ϵ . Le noyau doit être de bonne perméabilité magnétique et de bonne résistance mécanique (acier à 3,5 % Ni-Cr-Mo-V par exemple). Il doit être isolé électriquement de la chemise en Cu par un isolant de faible épaisseur de 0,1 à 0,2 mm. La chemise du rotor se termine par des extrémités non isolées (ou électrodes ou lèvres).
- d'un stator en acier de mêmes qualités magnétique et mécanique que celui du rotor. Comme ce dernier, le stator est garni intérieurement d'une chemise en Cu d'épaisseur ϵ et isolée électriquement de la masse en acier. La chemise stator qui est également

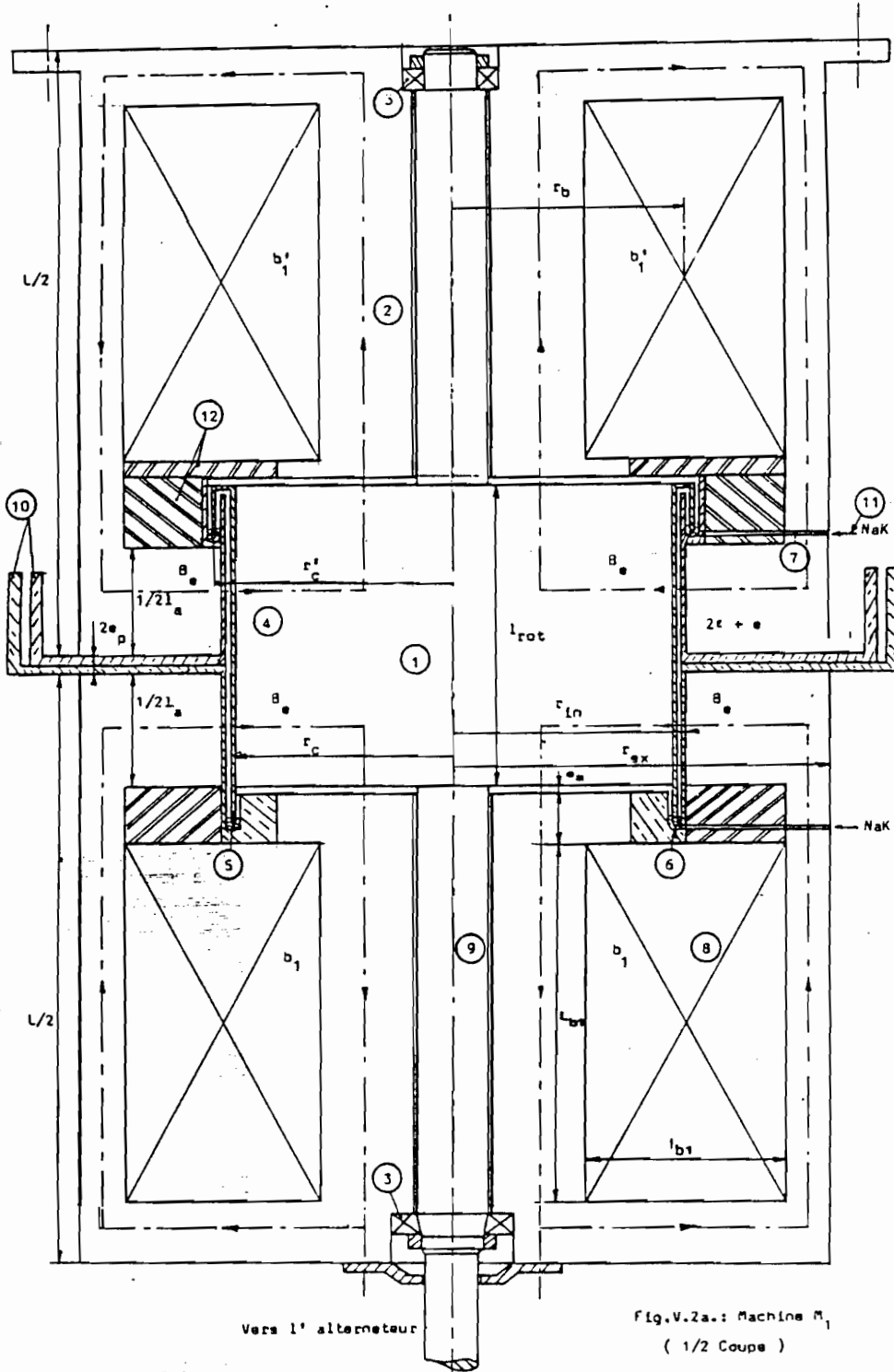


Fig.V.2a.: Machine M_1
(1/2 Coupe)

Echelle $\approx \frac{2}{3}$

Vers la roue d'inertie R_I

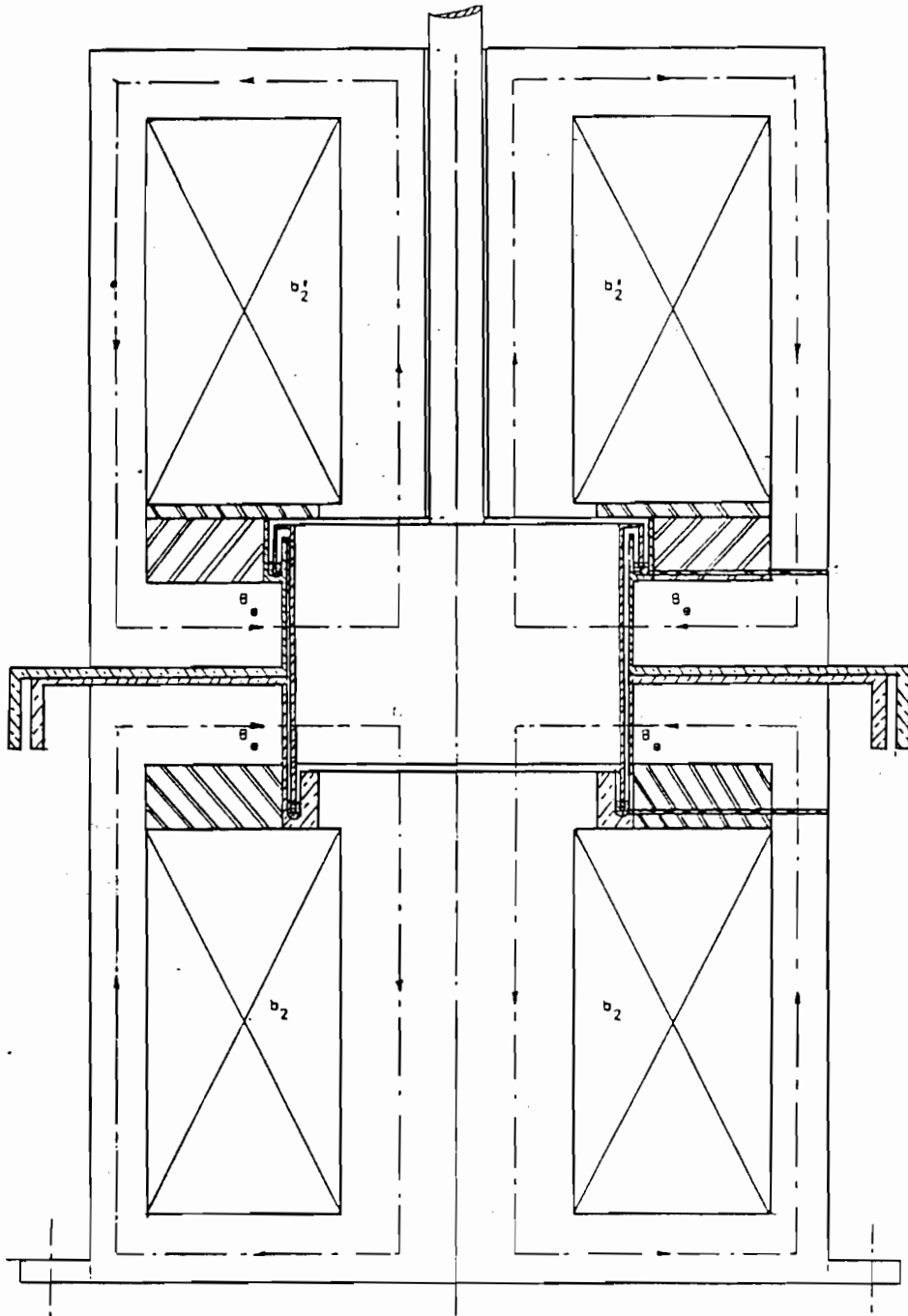


Fig.V.2 b.: Machine M_2 (1/2 Coupe)

Echelle $\approx \frac{2}{3}$

NOMENCLATURE DES PRINCIPALES PIECES

DU VARIATEUR

<u>DESIGNATION</u>	<u>MATERIAU</u>
1. Noyau du rotor	fer doux
2. Carcasse du stator	fer doux
3. Roulements à billes	
4. Chemises rotorique et statorique (isolées du noyau et de la carcasse)	cuivre
5. Electrode (ou lèvre) annulaire	cuivre
6. Gorge annulaire	cuivre
7. Canal d'amenée de NaK	
8. Bobine d'excitation	fil de cuivre
9. Axe de M_1	acier
10. Liaisons électriques entre M_1 et M_2	cuivre
11. Arrivée du NaK	
12. Matériau non magnétique	

montée de manière forcée dans le stator, se termine par des gorges annulaires dont le fond n'est pas isolé.

Un alliage métallique liquide de sodium et de potassium* est disposé dans les gorges annulaires du stator. Les extrémités solidaires du rotor viennent s'y plonger, assurant ainsi un contact électrique glissant entre le rotor et le stator,

Comme les chemises en cuivre sont isolées électriquement des masses en acier, le courant d'induit ne circule uniquement que dans ces parties en Cu et dans la veine en NaK (Fig.V.3.).

La disposition verticale des axes des machines est due essentiellement à deux raisons :

- la roue d'inertie R_I (ou accumulateur cinétique d'énergie) à suspension magnétique inspirée de la roue " SNIAS " à laquelle ces machines seront accouplées, est à axe vertical. Toute autre disposition de ces machines aurait nécessité l'emploi d'un organe de renvoi d'angle supplémentaire.
- les pertes magnéto-hydrodynamiques provoquées par les frottements visqueux des pièces en mouvement l'une par rapport à l'autre sont minimisées par la minimisation des surfaces du rotor et du stator en contact avec le fluide conducteur. Ces surfaces sont localisées aux seules extrémités en Cu du rotor et aux gorges annulaires du stator.

L'emploi des conducteurs liquides comme contacts électriques permet, par leur qualité de mouillabilité avec les électrodes solides, d'admettre une densité de courant élevée ($\approx 10 \text{ A.mm}^{-2}$) contrairement aux valeurs admises pour

* Il s'agit d'un alliage eutectique de Na (22,7 %) et K (77,3 %) dont les principales caractéristiques sont : température de fusion = $-12,5^\circ\text{C}$; chute de tension à l'interface Cu/NaK = $5,10^{-9} \text{ V/A/m}^2$; résistivité à 20°C = $4,35.10^{-7} \Omega\text{m}$; densité = 870Kg.m^{-3} .

les contacts solides.

La machine homopolaire appelée aussi unipolaire dont le premier prototype a été mis au point par POIRSON en 1931 [13] se caractérise par une puissance massique et un courant d'induit élevés obtenus sous une faible fem.

La fem E fournie par une génératrice homopolaire s'écrit ;

$$E = N \Phi \quad (5.3.)$$

où N est la vitesse de rotation du rotor (en t/s)

$\Phi = BS$: est le flux inducteur produit par l'induction magnétique B embrassant la surface S du rotor (en Wb),

5.3.2. Principe de fonctionnement du variateur

Prenons le groupe Ward-Léonard constitué de deux machines homopolaire M_1 et M_2 (Fig.I.1.).

Entraînons M_1 à une vitesse N_1 et excitons-le avec un flux inducteur Φ_1 . Il fournit une fem E_1 à M_2 (moteur) . Si ce dernier est excité à son tour avec un flux Φ_2 , il se mettra à tourner avec la vitesse N_2 telle que :

$$N_2 = \frac{E_1 - R_{12} I_1 - h_{12} (I_1)}{\Phi_2} \quad (5.4.)$$

où R_{12} est la résistance globale du circuit parcouru par le courant I_1 circulant dans le variateur,

$h_{12} (I_1)$ est la somme des réactions magnétiques d'induit de M_1 et M_2 .

Celles-ci dépendent uniquement du courant I_1 et s'annulent avec lui.

On voit dans l'équation (5.4.) que pour I_1 donné, on peut faire

varier la vitesse N_2 de deux manières :

- . $E_1 = \text{cte}$ et on fait varier Φ_2
- . $\Phi_2 = \text{cte}$ et on fait varier E_1

Lorsque l'ensemble du système de la Figure I.1. fonctionne, les vitesses de N_1 de M_1 , N_M de M , ainsi que N_5 de l'alternateur M_5 sont égales.

Comme N_1 est sensiblement constant et égal à la vitesse de synchronisme de M_5 , nous choisissons de maintenir Φ_1 à une valeur constante ($E_1 = \text{cte}$) et ferons varier la vitesse N_2 de M_2 (i.e. la vitesse de la roue R_I) à l'aide du flux inducteur Φ_2 , en diminuant celui-ci pour stocker de l'énergie (N_2 croît) et en l'augmentant pour restituer de l'énergie (N_2 décroît).

Nous adopterons la vitesse N_1 assez élevée (3000 t/mn) pour obtenir une fem suffisante et limiter ainsi le courant, donc les pertes Joule dans l'induit.

La vitesse N_2 dépend des facteurs suivants :

- la valeur limite des contraintes à la traction exercée sur la roue d'inertie.
- les pertes magnéto-hydrodynamiques qui deviennent très importantes aux grandes vitesses,

Les deux valeurs limites que nous adopterons sont :

- . $N_2 \text{ max} = 12000 \text{ t/mn}$ et $N_2 \text{ min} = 5000 \text{ t/mn}$.

La valeur $N_2 \text{ max}$ nous est imposée par la capacité maximale de stockage énergétique (pour $N_2 \text{ max}$) de la roue. En dessous de $N_2 \text{ min}$, les circuits de commande et d'asservissement du système doivent nécessairement continuer à être alimentés, alors que les autres récepteurs ne le seront pas.

Le dimensionnement de (M_1-M_2) prendra en compte ces données de vitesses limites.

5.3.3. Dimensionnement des variateurs

Le premier facteur que nous prenons en compte pour calculer les dimensions du variateur est la puissance que celui-ci peut transmettre : sa valeur maximale aussi bien du côté pv qu'éolienne est d'environ 2 KW. Ceci nous a conduit à adopter les mêmes dimensions pour M_1 et M_2 d'une part, et pour M_2 et M_4 d'autre part.

Les autres critères de dimensionnement des variateurs sont leurs pertes. Celles-ci doivent être minimisées.

Nous distinguerons :

- les pertes aux contacts qui sont réparties en :
 - . pertes Joule dans le fluide de contact (NaK).
 - . pertes Joule aux interfaces NaK/Cu.
 - . pertes magnétohydrodynamiques (MHD) résultant du frottement visqueux du fluide conducteur avec les parois des électrodes
- les pertes Joule dans les chemises en Cu du rotor et du stator.
- les pertes Joule dans les enroulements inducteurs.
- les pertes par frottement mécanique aux paliers.

Les autres pertes, notamment électromagnétiques telles que les pertes hystérésis et courants de Foucault, dépendantes des variations du flux, sont nulles pour M_1 (pas de variation du flux Φ_1 et absence d'asymétrie du rotor par rapport à son axe de révolution) et négligeables pour M_2 (la variation $\frac{d\Phi_2}{dt}$ est très faible).

Parmi les diverses pertes énumérées précédemment, les pertes MHD dans la machine M_2 sont prépondérantes par rapport aux pertes MHD relatives à M_1 qui tourne moins vite.

Le dimensionnement de nos variateurs sera donc basé sur la considération des pertes aux contacts (p_c) des deux machines : M_2 puis M_1 .

Nous vérifierons par la suite le bien fondé de ce choix en comparant p_c aux autres pertes et notamment aux pertes dans les inducteurs de (M_1, M_2).

Mais avant de procéder à l'évaluation des différentes pertes dans les variateurs, il nous faut d'abord analyser les forces qui s'exercent sur la veine de contact glissant lorsque par exemple M_1 et M_2 fonctionnent.

Prenons le cas du contact supérieur représenté par la Figure V.3a.

Trois forces agissent simultanément sur la veine :

$$\begin{aligned}
 - \text{ la force de Laplace} & \quad \vec{F} = \int_{V_c} \vec{j} \wedge \vec{B}_c \, dv \\
 - \text{ la force de gravitation} & \quad \vec{F}_g = \int_{V_c} (dm) \vec{g} \\
 - \text{ la force centrifuge} & \quad \vec{F}_r = \int_{V_c} (dm) \Omega^2 r_c \vec{u}
 \end{aligned}$$

où :

- \vec{j} est la densité du courant dans la veine de contact
- \vec{B}_c est l'induction moyenne qui règne dans la veine de contact
- dv est l'élément de volume de la veine occupant le volume V_c
- $dm = \Lambda \, dv$ est la masse de l'élément de volume dv de la veine
- Λ est la densité de l'alliage constituant la veine (NaK)
- $g = 9,81 \, \text{m/s}^2$ est l'accélération de la pesanteur
- $\Omega = 2 \pi N$ est la vitesse de rotation du rotor
- r_c est le rayon moyen de contact (Fig.V.3a.)
- \vec{u} est le vecteur unitaire de direction radiale par rapport au rotor.

5.3.3.1. Forces agissant sur la veine de contact glissant

a) Force de Laplace

L'induction B_c est la somme géométrique de l'induction B_i créée

par le courant d'induit I_1 (la densité de ce courant est j dans la veine) et de l'induction de fuite B_f pouvant se produire au niveau de contact (B_f est une fraction de l'induction créée par les inducteurs).

1) Force de Laplace due à B_i

Deux cas à considérer :

1er cas

B_i est créé par le courant I_1 parcourant la veine.

Pour fixer les idées, prenons trois densités de courant de même module évidemment, mais de trois sens différents (régions 1, 2 et 3 de la Figure V.3a.). Rapportons l'ensemble du système ainsi défini aux coordonnées cylindriques (r, θ, z) (Fig.V.3a.) La densité volumique de force f_i due à l'interaction de la densité de courant j_i sur sa propre induction $B_{\theta i}$, pour les trois cas est :

$$\vec{f}_1 = (0, 0, \pm j_1 B_{\theta 1})$$

$$\vec{f}_2 = (\pm j_2 B_{\theta 2}, 0, 0)$$

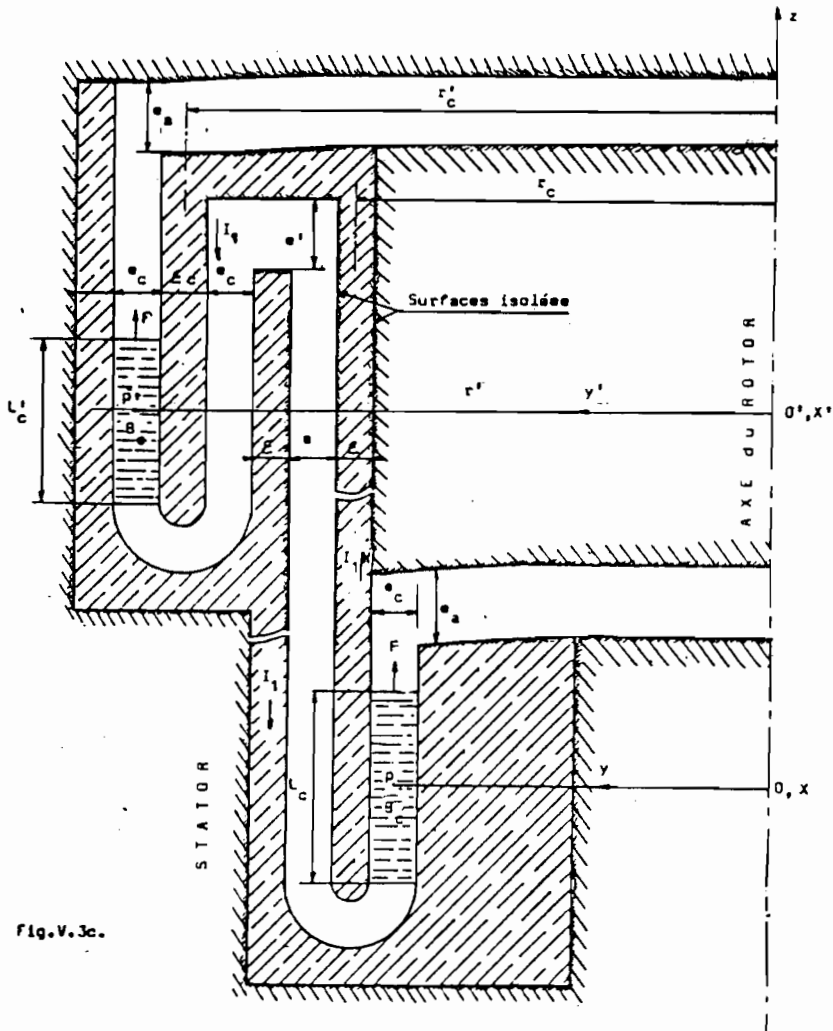
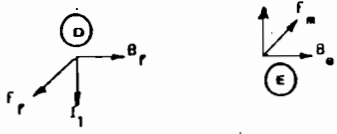
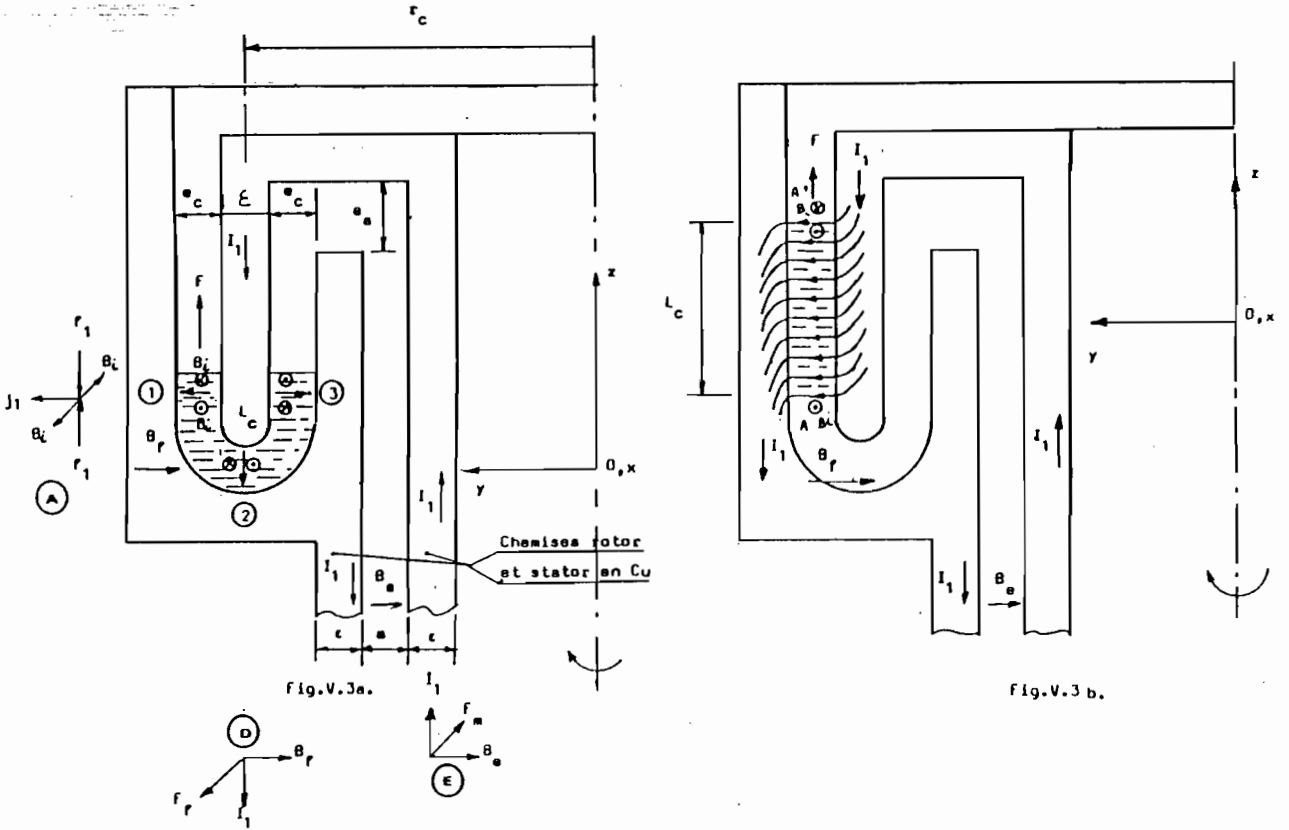
$$\vec{f}_3 = (0, 0, \pm j_3 B_{\theta 3})$$

La densité j est supposée uniforme dans la veine :

$$\begin{aligned} |\vec{j}_1| &= |\vec{j}_2| = |\vec{j}_3| = j \\ \Rightarrow |\vec{B}_{\theta 1}| &= |\vec{B}_{\theta 2}| = |\vec{B}_{\theta 3}| = B_{\theta} \\ \Rightarrow |\vec{f}_1| &= |\vec{f}_2| = |\vec{f}_3| = f \end{aligned}$$

La densité de courant j_i , dans chaque région i , crée deux inductions purement orthoradiales $\pm B_{\theta i}$. Par conséquent deux forces de Laplace résultant du produit $\vec{j}_i \wedge \vec{B}_{\theta i}$, s'exercent sur l'élément de veine parcouru par j_i . Ces forces sont égales et de sens opposés. Elles tendent à comprimer la veine et leur

Détail du contact électrique entre le rotor et le stator



effet ne déplace la veine ni dans un sens, ni dans l'autre (Fig. V.3a.A.).

2^{ème} cas

L'induction B'_i à considérer est due au courant I_1 dans le rotor. Dans les trois régions 1, 2 et 3, les densités de force f_i sont :

$$\begin{aligned} \vec{f}_1 &= (0, 0, j_1 B'_{\theta 1}) \\ \vec{f}_2 &= (j_2 B'_{\theta 2}, 0, 0) \\ \vec{f}_3 &= (0, 0, -j_3 B'_{\theta 3}) \end{aligned}$$

Dans les trois cas les forces f_i tendent à produire des effets dirigés de manière à déplacer la veine dans le sens de F. Elles tendent donc à soulever la veine. La force totale qui tend à soulever ainsi la veine de fluide est :

$F = \int_{V_c} j B'_\theta dV$,intégrale étendue à tout le volume V_c délimitant la veine de NaK. j et B'_θ sont constants, on peut les sortir du signe intégrale. Nous avons alors :

$$\begin{aligned} F &= j B'_\theta \int_{V_c} dV \\ &= I_1 B'_\theta e_c \end{aligned} \quad (5.7.)$$

car :

$$\int_{V_c} dV = A_c e_c$$

où :

- A_c : surface moyenne de la veine de contact déterminée à mi-distance entre les parois mouillées de la lèvre mobile du rotor et de la gorge fixe du stator.

$$A_c \simeq 2 \pi r_c L_c \quad (5.8.)$$

- L_c : " longueur " moyenne de la veine définie suivant la notation de la Figure V.3a.

Evaluation de B'_θ

D'après le théorème d'Ampère, l'induction B'_θ créée en un point situé à une distance r_c de l'axe d'un cylindre creux parcouru par un courant I_1 est :

$$B'_\theta = \mu_0 \frac{I_1}{2 \pi r_c}$$

Supposons que I_1 soit tel que la veine soit dans la position indiquée sur la Figure V.3b.

L'induction B'_θ qui règne dans tout l'espace occupé par la veine est proportionnelle au courant I_1 qui l'a engendrée.

Supposons isotrope le fluide de contact et uniforme la distribution du courant I_1 dans la veine.

Les lignes de courant dans la veine et dans les parties en cuivre qui sont en contact avec la veine (Fig.V.3b.), sont telles que l'induction B'_θ créée par le courant I_1 (circulant) dans la lèvre (ou l'électrode) est :

- nulle dans l'espace libre A en dessous de la veine.
- maximale (égale à B'_θ) dans l'espace libre A' au dessus de la veine.

Le courant I_1 qui parcourt la chemise (en Cu) du rotor, produit une induction B''_θ , constante dans toute la veine de contact et de sens opposés à B'_θ . Les dimensions géométriques indiquées sur la Figure V.3b. étant en réalité telles que $r_c \gg \epsilon_c, e_c \Rightarrow B''_\theta \simeq B'_\theta$.

En conséquence, l'induction magnétique qui règne dans la veine de contact peut globalement être estimée à $\frac{B'_\theta}{2}$. Et la force de Laplace s'exerçant sur toute la veine de contact

sera d'après (5.7.)

$$F \approx \mu_0 \frac{I_1^2 e_c}{4 \pi r_c}$$

$$= 10^{-7} I_1^2 \frac{e_c}{r_c} \quad (5.9.)$$

Une analyse analogue pour le contact inférieur (Fig.V.3c.) aboutit au même résultat que (5.9.)

Remarque :

Nous avons calculé la valeur de B'_g comme si les parties cylindriques en cuivre étaient infinies. Or, cela n'est pas vrai dans notre cas et les effets d'extrémité peuvent modifier ces résultats. Nous pensons néanmoins qu'en première approximation, notre analyse approchée donne des ordres de grandeurs significatives.

2) Force de Laplace due à l'induction de fuite B_f

La direction de \vec{B}_f est à peu près parallèle à l'induction utile \vec{B}_e dans l'entrefer de la machine (Fig.V.3a,b.). \vec{B}_f est donc essentiellement radial :

- pour le cas représenté par la Figure V.3b., la force de Laplace est nulle (I_1 et B_f sont parallèles).
- pour le cas de la Figure V.3a., la force de Laplace \vec{F}_f se produit dans la région 2. Son module est égal au produit de la composante axiale de \vec{I}_1 et de la composante radiale de \vec{B}_f . Cette force est orthoradiale et tend à mettre en mouvement la veine de contact dans le sens opposé à celui de rotation de la machine tournant aussi bien en moteur qu'en génératrice (Fig.V.3a/D,E). Mais cette force est très faible par rapport à la force F_m responsable du couple moteur (ou résistant) de la machine.

Le rapport des deux forces est :

$$\frac{\vec{F}_f}{F_m} = \frac{\frac{I_1}{A_c} B_f \int_{V'_c} d\tau}{\int_{-l_a/2}^{l_a/2} I_1 dl \wedge \vec{B}_e}$$

où :

$$\int_{V_c} d\tau = 2\pi r_c \epsilon_c e_c \quad , \text{ intégrale étendue à tout le}$$

volume de la veine délimitant la composante radiale du courant I_1 .

l_a : longueur active du rotor ($\approx r_c$)

B_e : induction créée dans l'entrefer par les bobines excita-
trices.

On trouve :

$$\frac{F_f}{F_m} = \frac{B_f \epsilon_c e_c}{B_e r_c L_c} \ll 1, \text{ compte tenu des valeurs relatives}$$

de B_f , ϵ_c , e_c d'une part, et de B_e , r_c et de L_c d'autre part
comme nous le verrons lorsqu'on aura dimensionné les machines
 M_1 et M_2 .

b) Force de la pesanteur

Pour éviter d'être expulsée de la gorge statorique, la veine de
NaK, de masse spécifique Λ , doit avoir un volume $A_c e_c$ tel que
d'après (5.8.), on ait :

$$\Lambda A_c e_c g \geq 10^{-7} I_1^2 \frac{e_c}{r_c}$$

$$L_c \geq \frac{10^{-7}}{2\pi \Lambda g} \left(\frac{I_1}{r_c} \right)^2 \quad (5.10.)$$

où :

. g est l'accélération de la pesanteur.

c) Force centrifuge

Elle s'exerce radialement et son module est :

$$F_r = \Lambda A_c e_c \Omega^2 r_c$$

L'ordre de grandeur des vitesses de M_1 et M_2 laisse supposer que la force centrifuge sera, de loin, plus importante que F et F_g . D'après la forme arrondie des contacts (lèvres), le fluide au contact inférieur aura, aux grandes vitesses, très probablement la même configuration que le fluide de contact supérieur (Fig.V.3c) Dans ce cas, la veine de contact ne sera jamais entraînée vers l'axe des machines, ce qui serait un inconvénient majeur.

5.3.3.2. Pertes par contact

Ces pertes ont trois composantes [14] que nous allons examiner séparément.

a) Pertes Joule dans la veine de NaK (p_j)

Nous supposons toujours la densité de courant constante dans la veine.

$$p_j = \rho \frac{e_c}{A_c} I_1^2 \quad (5.12.)$$

où :

ρ est la résistivité de l'alliage NaK ($\approx 4,35 \cdot 10^{-7} \Omega \text{ m}$)

b) Pertes aux interfaces Cu/NaK (p_{if})

Elles sont dues à la chute de tension aux deux interfaces Cu/NaK lors du passage du courant I_1 . Elles s'écrivent :

$$p_{if} = v I_1^2 \left(\frac{1}{A_{mob}} + \frac{1}{A_{fixe}} \right) \quad (5.13.)$$

où :

v est le "facteur de qualité" du contact Cu/NaK. Ce facteur dépend essentiellement de l'état des surfaces (en Cu) en contact avec le NaK. Pour une qualité de surface moyenne, on peut prendre :

$$v \approx 5 \cdot 10^{-9} \text{ V A}^{-1} \text{ m}^2 \quad [13]$$

A_{mob} et A_{fixe} sont respectivement les surfaces mouillées de la lèvre mobile et de la gorge fixe.

c) Pertes magnéto-hydrodynamiques (p_{MHD})

L'écoulement d'un fluide conducteur soumis à une induction magnétique extérieure perpendiculaire au sens de l'écoulement atteint le régime turbulent stable lorsque :

$$R_{DH} > 900 M \quad (5.14.)$$

où :

$$R_{DH} = \frac{\lambda}{\mu} \langle V \rangle D_H : \text{nombre de Reynolds défini pour un diamètre hydraulique } D_H.$$

λ : densité de l'alliage eutectique NaK ($\approx 870 \text{ Kg.m}^{-3}$)

μ : viscosité de NaK ($\approx 0,55 \cdot 10^{-3}$ poiseuille à 60 C)

$\langle V \rangle$: vitesse moyenne du fluide. Avec l'hypothèse que $\langle V \rangle$ soit la moitié de la vitesse périphérique du contact mobile :

$$\langle V \rangle = \pi r_c N \quad (5.14 \text{ bis})$$

$$D_H = \frac{4 \times \text{surface de la section droite de la veine}}{\text{Périmètre de la section droite de la veine}}$$

$$D_H = 2 \frac{L_c e_c}{L_c + e_c}$$

$$M = B \sqrt{\frac{1}{\mu \rho}} \frac{e_c}{2} : \text{nombre de Hartmann}$$

B : induction due au champ magnétique extérieur appliquée suivant la dimension e_c et perpendiculairement au sens de l'écoulement du fluide (Fig.V.3a.).

La condition d'écoulement turbulent stable (5.14.) s'écrit encore :

$$\frac{\lambda}{\mu} \langle V \rangle \frac{L_c}{L_c + e_c} > 225 B \sqrt{\frac{1}{\mu \rho}}$$

Supposons que $L_c \gg 4 e_c$. On tire de l'inégalité précédente la valeur du rayon de contact r_c :

$$r_c \geq \frac{1125}{4 \pi N \lambda} B \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$

d'approximation n'est obtenu qu'à condition d'avoir :

$$L_c / e_c \gg \pi/2$$

Compte tenu de ces remarques, on peut considérer en première approximation la relation simplifiée pour les pertes par contact :

$$p_c \simeq 2 \frac{\nu}{A_c} I_1^2 + \frac{\Lambda}{4} A_c f \langle V \rangle^3 \quad (5.17.)$$

L'intensité I_1 peut être reliée à la puissance P transmise par la machine, et à sa fem E :

$$I_1 = \frac{P}{E}$$

$$= \frac{P}{NB_e S}$$

où $S = 2\pi r_c l_a$: surface du rotor soumise à l'induction magnétique B_e régnant dans l'entrefer de la machine. Afin que les lignes de force ne soient pas trop variables sur tout le parcours du circuit magnétique, on choisit la longueur active l_a du rotor égale au rayon r_c :

$$l_a = r_c$$

Le courant I_1 dans $M_1 M_2$ devient :

$$I_1 = \frac{P}{2\pi r_c^2 B_e} \quad (5.18.)$$

Posons : $L_c = \gamma r_c$ avec $\gamma < 1$, l'expression de A_c s'écrit encore :

$$A_c \simeq 2\pi\gamma r_c^2 \quad (5.19.)$$

A l'aide des relations (5.18.), (5.19.) et en sachant que $\langle V \rangle = \pi N r_c$, l'équation (5.16.) devient :

$$p_c \simeq \frac{v_P^2}{4\pi^3 \gamma B_e^2 N^2 r_c^6} + \frac{\Lambda \gamma f \pi^4 N^3 r_c^5}{2}$$

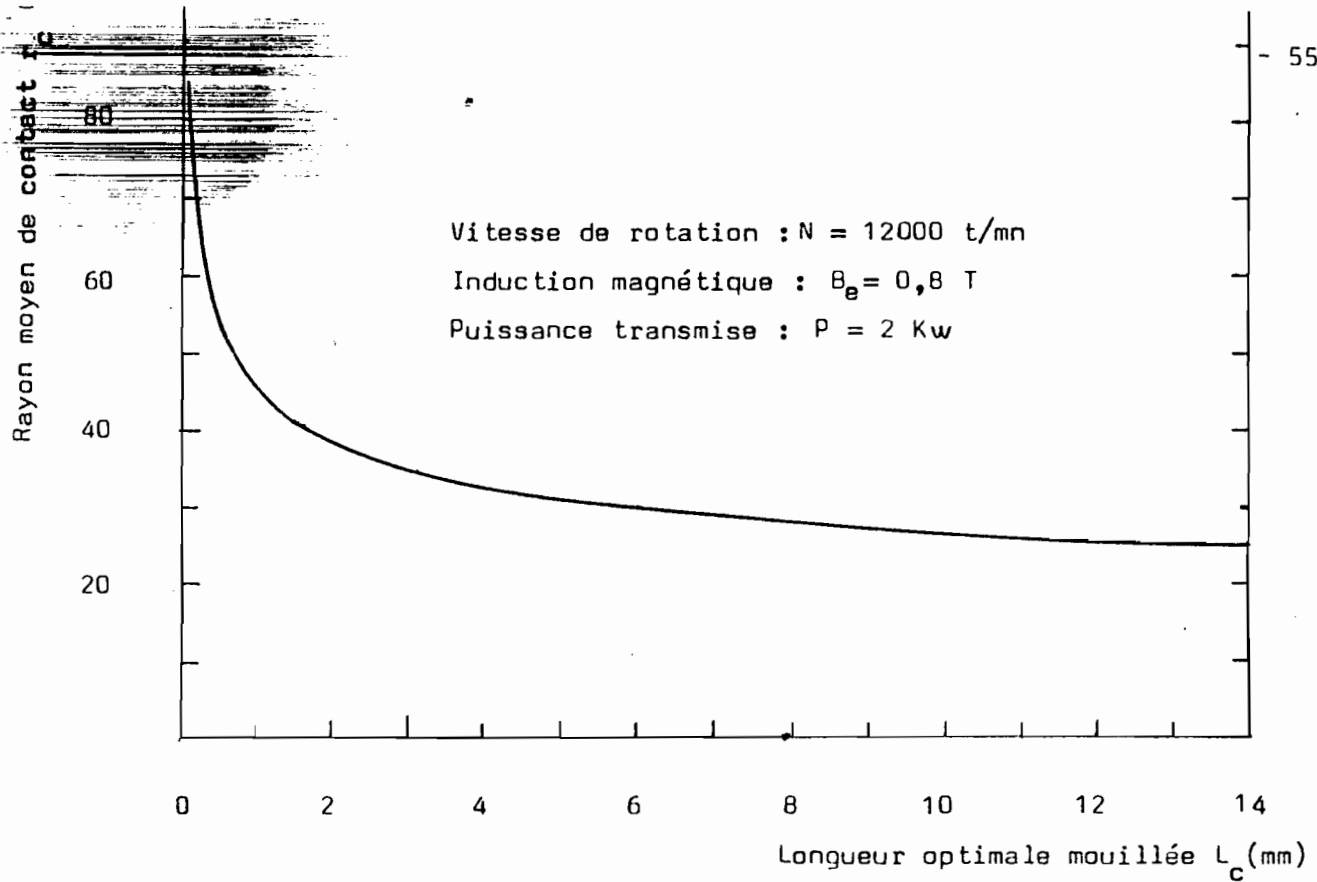


Fig.V.4.: Variation du rayon de contact de la machine M_2 en fonction de la dimension L_c optimale de la veine.

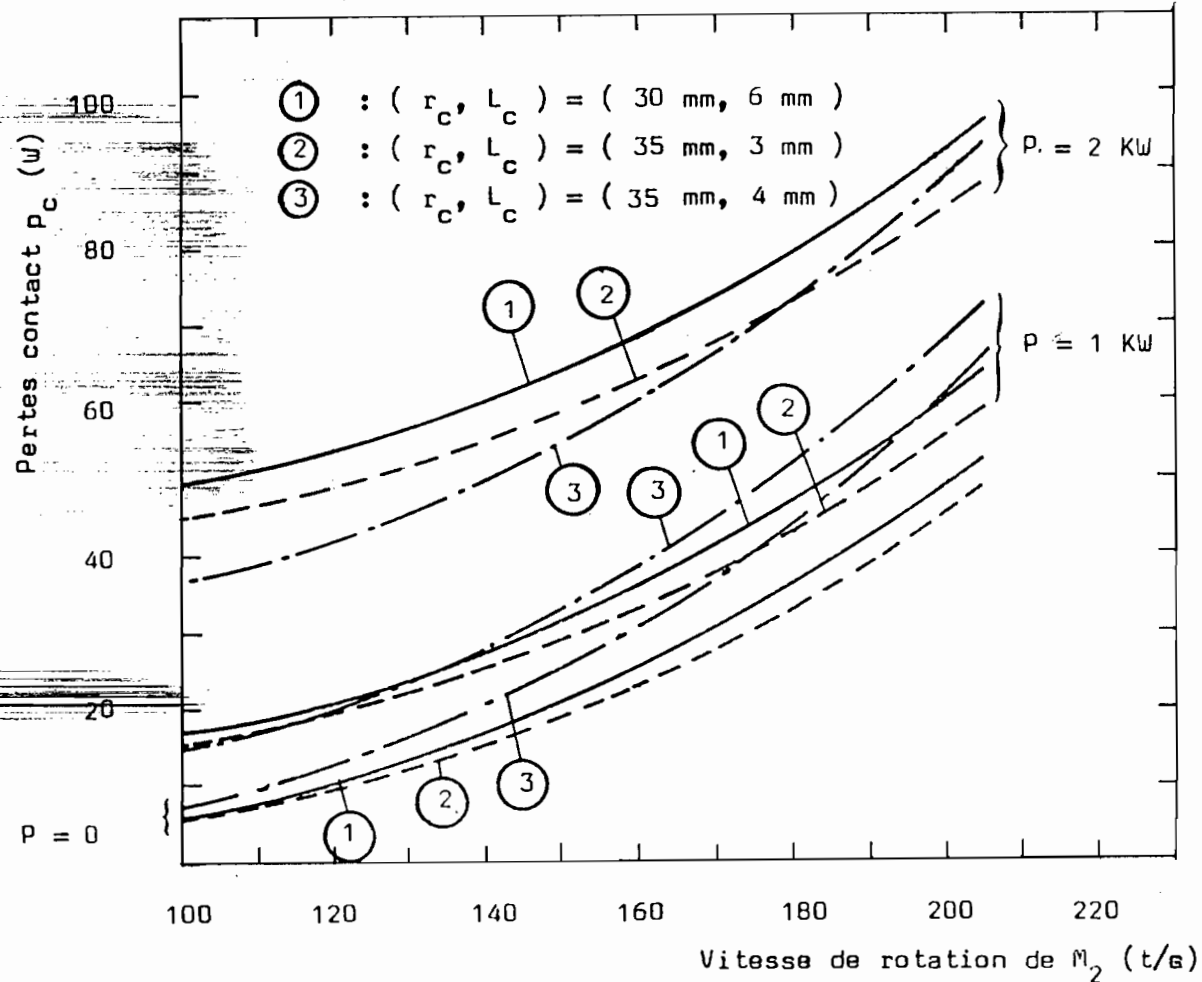


Fig.V.5.: Variation des pertes dissipées à chaque contact pour 3 couples de valeurs (r_c, L_c)

pour $r_c < 40$ mm, la variation de r_c est nettement moins rapide en fonction de L_c . Le choix de (r_c, L_c) est donc plus souple, permettant la prise en compte d'autres considérations.

Afin d'apprécier les valeurs des pertes et leur variation en fonction de la vitesse de M_2 , nous mettons la relation (5.17.) sous la forme :

$$p_c \approx R_c I_1^2 + \alpha N^3 \quad (5.21.)$$

où :

$$R_c = \frac{2v}{A_c} = \frac{v}{\pi r_c L_c}$$

$$\alpha = \frac{\Lambda f \pi^4 r_c^4 L_c}{2}$$

Les pertes en fonction de la vitesse N calculées à l'aide de (5.21.) sont représentées par la Figure V.5. pour deux couples de valeurs (r_c, L_c) obtenues à partir de la Figure V.4., et pour une puissance transmise P de 0; 1 et 2 KW (courbes 1 et 2).

Nous pouvons remarquer que des calculs faits avec l'équation (5.16.) plus précise, conduiraient à des termes indépendants de N légèrement plus importants ($\approx 4\%$) que ces calculs approchés.

a) Dimensions de M_2

Pour le choix de nos dimensions définitives de M_2 , le couple $(r_{c2} = 30$ mm, $L_{c2} = 6$ mm) doit être manifestement écarté en raison du rapport r_{c2}/L_{c2} trop faible, mais aussi à cause des pertes p_c sensiblement supérieures (courbe 1, Fig.V.5.). Les valeurs du couple $(r_{c2} = 35$ mm, $L_{c2} = 3$ mm), courbe 2, sembleraient à première vue, plus acceptables.

La relation (5.10.) conduit - à l'aide de I_1 obtenu avec (5.18.) pour $r_c = 35$ mm et pour une puissance transmise de 2 KW - à $L_c \approx 4$ mm. Cela veut dire qu'en adoptant cette dernière valeur pour la dimension L_c de la veine, on peut être à peu près sûr que

(d'après les évaluations très approchées, mais probablement pessimistes), les forces de Laplace engendrées dans les conditions les plus extrêmes (I_1 max) ne conduiraient pas à l'expulsion de la veine de la gorge statorique.

Par ailleurs, la courbe (Fig.V.5.) relative à ($r_c = 35$ mm, $L_c = 4$ mm) montre que pour les conditions moyennes de fonctionnement, ces valeurs de r_c et L_c correspondent à un compromis acceptable.

Le rayon r'_{c2} de contact supérieur (Fig.V.3c.) est :

$$r'_{c2} = r_{c2} + e_c + \epsilon_c + e + \epsilon \quad (5.21.)$$

En adoptant les dimensions suivantes :

$$\epsilon = \epsilon_c = 0,8 \text{ mm} \quad \text{et}$$

$$e = e_c = 1 \text{ mm} \quad \text{on trouve :}$$

$$r'_{c2} \approx 39 \text{ mm} \quad \text{et} \quad L'_{c2} \approx L_{c2} = 4 \text{ mm}$$

Si l'on tient compte des contacts supérieur et inférieur, les pertes aux contacts de la machine M_2 s'écrivent :

$$P_{c2} \approx R_{c2} I_1^2 + \alpha_2 N_2^3$$

$$R_{c2} = \frac{v}{\pi L_{c2}} \left(\frac{1}{r_{c2}} + \frac{1}{r'_{c2}} \right) \quad (5.22.)$$

$$\alpha_2 = \frac{\Lambda f \pi^4 L_{c2}}{2} (r_{c2}^4 + r'_{c2}^4) \quad (5.23.)$$

b) Dimensions de M_1

Les valeurs de e , ϵ et e_a relatives à M_1 sont les mêmes que pour M_2 (Fig.V.3c.).

Les rayons r_{c1} et r_{c2} des rotors M_1 et M_2 doivent être tels que les fem E_1 et E_2 soient égales lorsque les deux machines n'échangent aucune puissance entre elles ($I_1 = 0$), c'est à dire (c.f.5.3.)

$$E_1 = E_2$$

où :

$$N_1 \Phi_1 = N_2 \Phi_2 \quad \text{et} \quad \Phi_i = B_{ei}^2 \pi r_{ci}^2$$

Nous en déduisons :

$$r_{c1} = r_{c2} \sqrt{\frac{B_{e2} N_2}{B_{e1} N_1}} \quad (5.24.)$$

Le rayon de contact supérieur de M_1 se calcule de la même manière que pour M_2 (c.f.5.21.).

Les pertes aux contacts (5.17.) de M_1 sont minimales lorsque, pour I_1 et $\langle V_1 \rangle$ constants, on a :

$$\frac{dp_{c1}}{dA_{c1}} = 0$$

On en déduit la valeur de A_{c1} :

$$A_{c1}^2 = \frac{8 v I_1^2}{\Lambda f \langle V_1 \rangle^3}$$

puis à l'aide de (5.8.) et (5.14.bis), celle de la " longueur " L_{c1} de la veine de contact :

$$L_{c1} = I_1 \left(\frac{2 v}{\Lambda f N_1^3 (\pi r_{c1})^5} \right)^{1/2} \quad (5.25.)$$

Application numérique

=====

- $r_{c2} = 35 \text{ mm}$
- $B_{e2} = 1,6 \text{ T}$ lorsque $N_2 = 100 \text{ t/s}$
- $B_{e1} = 1,6 \text{ T}$
- $N_1 = 50 \text{ t/s}$

A l'aide de (5.24.), et de (5.21.), on calcule :

$$- r_{c1} \simeq 50 \text{ mm}$$

$$- r'_{c1} \simeq 54 \text{ mm}$$

Quant à la valeur moyenne de L_{c1} , elle dépend de I_1 selon (5.25.).

Sa valeur optimale est d'environ 8,5 mm pour un courant I_1 max. de 1624 A, courant correspondant à une puissance transmise de 2 KW. Mais la machine M_1 ne transmet pas constamment cette puissance maximale. Par contre, elle tourne, en régime normal 24 heures sur 24, et l'on peut se contenter d'une valeur de L_c de moitié inférieure, soit 4 mm, ce qui diminue les pertes MHD aux contacts par un facteur supérieur à 1/2.

Remarque : A partir des dimensions de M_1 et M_2 , la valeur des forces agissant sur la veine (§ 5.3.3.1.) sont :

$$\begin{aligned}
 F_g &\gg F \simeq 1,1 \text{ mN} && \text{pour } M_1 \\
 &\simeq 0,8 \text{ mN} && \text{pour } M_2 \\
 F_r &\simeq 13,5 \text{ mN} && \text{pour } M_1 \\
 13,0 &\lesssim F_r \lesssim 51,8 \text{ mN} && \text{pour } M_2
 \end{aligned}$$

où nous rappelons que F_g , F et F_r sont respectivement la force de la pesanteur, la force de Laplace et la force centrifuge.

Etant donnée l'importance de F_r par rapport à F et F_g , la veine au contact inférieur (Fig.V.3c.) prendra vraisemblablement la même configuration que la veine au contact supérieur, compte tenu de la forme arrondie des bouts des lèvres.

5.3.3.4. Pertes dans les parties en cuivre de M_1 et M_2

a) Dans les chemises en Cu du rotor et du stator (Fig.V.2.), se dissipent les pertes Joule :

$$P_{rs} = R_{rs} I_1^2$$

où :

$$R_{rs} = \rho_{Cu} \left(\frac{l_{rot}}{A_{rot}} + \frac{l_{st}}{A_{st}} \right) : \text{résistance des chemises rotorique et statorique}$$

$$l_{rot} \simeq l_{st} : \text{longueur totale de la chemise du rotor et du stator.}$$

$$A_{rot} \simeq A_{st} \simeq 2\pi r_{rs} c \quad \text{avec :} \quad r_{rs} = \frac{r_c + r'_c}{2}$$

$$\rho_{Cu} = 1,72 \cdot 10^{-8} \Omega m \quad (\text{à la température de } 20 \text{ C})$$

On en tire :

$$R_{rs} \approx \rho_{Cu} \frac{l_{rot}}{\pi r_{rs} \epsilon} \quad (5.26.)$$

b) Dans les plateaux d'épaisseur e_p situés à la partie médiane de M_1 et M_2 (Fig.V.2.) se dissipent les pertes Joule également :

$$P_{pl} = R_{pl} I_1^2$$

où : $R_{pl} = 2 \times \rho_{Cu} \int_{r_{in}}^{r_{ex}} \frac{dr}{A_{pl}}$ pour chaque machine

avec : $A_{pl} = 2 \pi r e_p$: section droite suivant l'axe du plateau

On trouve :

$$R_{pl} = \frac{\rho_{Cu}}{\pi e_p} \ln \left(\frac{r_{ex}}{r_{in}} \right) \quad (5.27.)$$

En résumé, les dimensions principales de M_1 et M_2 sont récapitulées dans le tableau suivant :

	<u>Machine M_1</u>	<u>Machine M_2</u>
• Rayon moyen du rotor et du contact inférieur r_c (mm)	50 35
• Rayon moyen du contact supérieur r'_c (mm)	54 39
• " Longueur " de la veine de contact glissant L_c (mm)	4 4
• Longueur approximative de la chemise statorique et rotorique $l_{rot} = l_{st}$ (mm)	80 65
• Epaisseur de la chemise ϵ (mm)	0,8 0,8
• Rayon intérieur du plateau r_{in} (mm)	52 37
• Rayon extérieur du plateau r_{ex} (mm)	85 80
• Epaisseur du plateau e_p (mm)	2 2

	<u>Machine M₁</u>	<u>Machine M₂</u>
. Résistance relative aux 2 contacts R _c (μΩ)	15,3 ...	21,6
. Résistance des chemises en Cu R _{rs} (μΩ)	8,4 ...	9,6
. Résistance des plateaux R _{pl} (μΩ)	1,3	2,1
. Coef ^t des pertes MHD relatif aux 2 contacts α (W.(t/s) ⁻³)	7,50.10 ⁻⁵	1,94.10 ⁻⁵

où

R_c, R_{rs}, R_{pl} et α sont calculés à partir de (5.22.), (5.26.), (5.27.) et (5.23.) respectivement.

5.3.3.5. Pertes excitations dans M₁ et M₂

L'excitation de M₁ et M₂ est obtenue à l'aide d'électro-aimants constitués par une paire de bobines par machine (b₁ et b'₁ pour M₁ et b₂ et b'₂ pour M₂).

Une batterie d'accumulateur tampon de faible capacité (environ 50 Ah - 12 volt, soit 4 x 3 A pour l'excitation maximale des deux variateurs pendant 4 heures) alimente ces électro-aimants ainsi que divers circuits de commande et d'asservissement de l'ensemble de notre système de conversion d'énergie.

Un dispositif redresseur de courant charge en permanence la batterie d'accumulateur. Même lorsque la vitesse N₂ de la roue d'inertie tombe en dessous de sa valeur minimale (6000 t/mn), tous les circuits d'asservissement et de commande devront être alimentés normalement.

L'induction magnétique B_e dans l'entrefer de M₁ ou M₂ est définie par le théorème d'Ampère :

$$ni = \sum_j H_j l_j$$

où :

- . n : nombre total des spires de chaque machine.
- . H_j = $\frac{B_j}{\mu_j}$: champ d'induction magnétique dans le milieu j.
- . l_j : longueur du circuit magnétique dans le milieu j.

Les différents milieux j du circuit magnétique sont :

- le fer doux
- l'air
- le cuivre

Le fer est un matériau de perméabilité magnétique très grande devant celle du cuivre et de l'air ($\mu_{\text{fer}} \gg 5000$) et compte tenu des dimensions du circuit magnétique, le théorème d'Ampère écrit précédemment conduit à la relation approchée :

$$ni \approx \frac{B_e}{\mu_0} e_{\text{tot}}$$

où :

. B_e est l'induction magnétique que l'on désire obtenir dans l'entrefer de la machine,

. $e_{\text{tot}} = 2e_a + e + 2\epsilon$: épaisseur totale de l'entrefer de la machine,

avec $e_a = 1,5$ mm, $e = 1$ mm et $\epsilon = 0,8$ mm, on a :

$$e_{\text{tot}} = 5,6 \text{ mm}$$

Afin de limiter les pertes Joule dans les bobines d'excitation, nous prendrons une densité de courant de l'ordre de 1 A/mm^2 .

Les bobines sont constituées de fil de 2 mm de diamètre et produisent une induction maximale $B_{e \text{ max}}$ de 1,6 T dans l'entrefer e_{tot} .

Le nombre de spires n susceptibles de produire $B_{e \text{ max}}$ est :

$$n = 2300 \quad \text{soit } 2 \times 1150 \text{ spires par machine.}$$

Si r_b est le rayon moyen de la bobine, la résistance R_b relative à chaque machine sera :

$$R_b \approx \rho_{\text{Cu}} \frac{2n r_b}{r_{\text{fil}}}$$

a) Pour la machine M_1

. $r_{b1} = 52 \text{ mm}$

. $R_{b1} \approx 4,1 \Omega$

Les pertes p_{b1} dans les bobines de M_1 , pour une excitation maximale constante ($B_{e1} = 1,6 \text{ T}$) sont égales à :

$$p_{b1} = R_{b1} i_1^2 \approx 41 \text{ WATTS}$$

b) Pour la machine M_2

. $r_{b2} = 46 \text{ mm}$

. $R_{b2} \approx 3,6 \Omega$

Les pertes sont de 36 WATTS environ pour une excitation maximale ($B_{e2} = 1,6 \text{ T}$). Mais B_{e2} , qui varie comme le courant d'excitation i_2 , n'est pas constant.

Comme B_{e2} et N_2 varient de manière inversement proportionnelle :

$$B_{e2} N_2 = B_{e2 \text{ max}} N_{2 \text{ min}} = 160 \text{ volts/m}^2$$

et comme i_2 est proportionnel à B_{e2} (équation 5.28.), on peut écrire :

$$p_{b2} = \beta_2 N_2^{-2}$$

où :

$$\beta_2 \approx 3,65 \cdot 10^5 \text{ W (t/s)}^2 : \text{ constante caractéristique de la machine } M_2$$

5.3.3.6. Pertes aux paliers p_{pal}

Le rotor de M_2 (comme celui de M_4) est solidaire mécaniquement de l'axe de la roue d'inertie R_I et bénéficie donc du même guidage que la roue. Lequel guidage est assuré par les paliers magnétiques.

Seul M_1 a des paliers à roulements à billes. Mais la valeur des pertes dans ces types de paliers, compte tenu de la vitesse de rotation de la machine (3000 t/mn) et de la masse du rotor (5 Kg environ), est négligeable (environ 0,5 WATT).

5.3.4. Rendement du variateur M_1M_2

Supposons que M_1 fonctionne en génératrice fournissant une tension U_1 , au moteur M_2 . Si I_1 est le courant absorbé par M_2 , le rendement des deux machines s'écrit :

$$\eta_1 = \frac{U_1 I_1}{U_1 I_1 + \sum \text{pertes } (M_1)}$$

$$\eta_2 = \frac{U_1 I_1 - \sum \text{pertes } (M_2)}{U_1 I_1}$$

Le rendement du variateur (M_1M_2) est :

$$\eta_{12} = \eta_1 \eta_2$$

$$\eta_{12} = \frac{U_1 I_1 - \sum \text{pertes } (M_2)}{U_1 I_1 + \sum \text{pertes } (M_1)} \quad (5.29.)$$

$$\cdot \sum \text{pertes } (M_1) = R_1 I_1^2 + \alpha_1 N_1^3 + p_{b1}$$

$$\cdot \sum \text{pertes } (M_2) = R_2 I_1^2 + \alpha_2 N_2^3 + \beta_2 N_2^{-2}$$

où :

$$\cdot R_1 = R_{c1} + R_{rs1} + R_{p11} \approx 25 \mu\Omega : \text{résistance de l'induit de } M_1$$

$$\cdot R_2 = R_{c2} + R_{rs2} + R_{p12} \approx 33 \mu\Omega : \text{résistance de l'induit de } M_2$$

$$\cdot \alpha_1 \approx 7,5 \cdot 10^{-5} \text{ W(t/s)}^{-3} : \text{facteur de perte MHD de } M_1$$

$$\cdot \alpha_2 \approx 1,94 \cdot 10^{-5} \text{ w(t/s)}^{-3} : \text{facteur de perte MHD de } M_2$$

Posons :

$$\alpha_1 N_1^3 + p_{b1} = p_1 \quad (\approx 51 \text{ W})$$

$$\text{et } R_1 + R_2 = R_{12} \quad (\approx 60 \mu\Omega)$$

La tension fournie par M_1 (fonctionnant en génératrice) est :

$$U_1 = E_1 - R_1 I_1$$

Remplaçons \sum pertes (M_1), \sum pertes (M_2) et U_1 dans (5.29.) et après réarrangement de certains termes, on obtient :

$$\eta_{12} = \frac{E_1 I_1 - (R_{12} I_1^2 + \alpha_2 N_2^3 + \beta_2 N_2^{-2})}{E_1 I_1 + p_1} \quad (5.30.)$$

La Figure V.6. représente la variation de $\eta_{12} (I_1)$ $N_2 = \text{cte}$

Remarque :

Les puissances maximales de G_{pv} , (environ 2 KW pour un éclairage de 1 KW/m^2 à 60 C) comme nous l'avons vu au Chap.IV, et de G_e , (environ 1,6 KW pour un vent de 8,5 m/s) comme nous le verrons au chap.VI, nous conduisent à adopter le variateur (M_1 - M_2) identique à (M_3 - M_4). Plus précisément, M_1 et M_3 sont identiques d'une part, et M_2 et M_4 également identiques d'autre part.

En conséquence,

$$R_{12} = R_{34} ; \alpha_1 = \alpha_3 ; \alpha_2 = \alpha_4 ; R_{b1} = R_{b3} .$$

V.4. La roue cinétique d'inertie R_I

5.4.1. Généralités sur les roues d'inertie

L'utilisation de la roue cinétique d'inertie R_I (ou volant d'inertie) par l'homme est très ancienne. Quatre mille ans avant notre ère, les potiers l'utilisaient déjà comme moyen de stockage d'énergie. Depuis la révolution industrielle, ses applications sont nombreuses notamment sur les véhicules automobiles (régulateurs de moteurs à pistons ...).

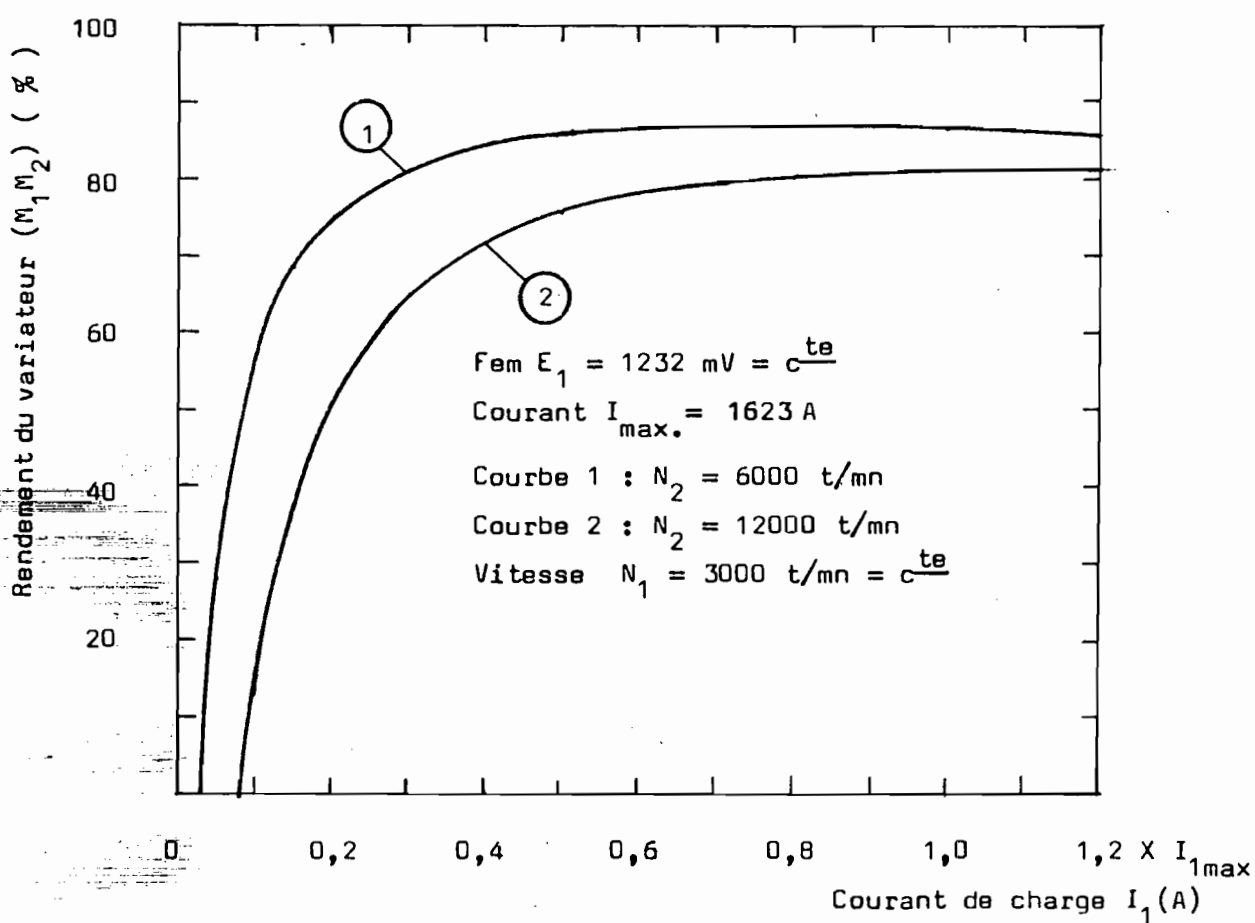


Fig.V.6.: Rendement du variateur électromagnétique de vitesse (M_1, M_2) en fonction du courant d'induit I_1 . E_1 et N_1 étant maintenus constants.

De nos jours, à cause de la crise énergétique que le monde traverse, on " redécouvre " le volant d'inertie dont on cherche à étendre le champ d'application dans des domaines aussi variés que :

- les véhicules terrestres pour le transport en commun (trolley-bus)
 - les satellites artificiels de télécommunication (INTELSAT V par ex.)
- etc ...

Dans tous les cas, la roue d'inertie est utilisée pour stocker de l'énergie en vue de son utilisation ultérieure, à un moment convenable. La restitution de cette énergie peut se faire à une puissance extrêmement élevée, sans commune mesure avec la puissance de l'installation : il suffit pour cela que le temps pendant lequel l'énergie est restituée, soit très bref. C'est une technique semblable qu'on utilise dans la recherche sur la fusion nucléaire par exemple (Laboratoire C E A de Fontenay-aux-Roses en France).

La Société Nationale Industrielle Aérospatiale (SNIAS-France) a mis au point une roue d'inertie, appelée aussi accumulateur cinétique d'énergie (ACE), en acier de 350 Kg pour des usages terrestres : sa capacité à pleine charge est de 1 KWh et elle peut délivrer une puissance maximale de 3 KW.

Le rotor de cette roue est maintenu en position par des paliers magnétiques qui éliminent ainsi tous contacts et frottements mécaniques préjudiciables à un bon rendement.

Les roues en aciers spéciaux atteignent une densité énergétique [15] de 48 Wh/Kg. Cette valeur est comparable à celle des batteries d'accumulateur au plomb (20 à 40 Wh/Kg). Mais, tandis que le nombre de cycles de charge et décharge subi par une batterie est bien limité, celui de la roue d'inertie est pratiquement illimité. De plus :

- sa décharge peut être rapide et totale sans affecter sa durée de vie. En revanche, pour une batterie d'accumulateur, le cycle de charge et de décharge ne porte que sur une fraction de sa capacité totale ($\approx 15\%$). Des décharges trop

importantes peuvent entraîner une détérioration irrémédiable.

- ses performances sont indépendantes des conditions d'environnement (humidité, température ...).
- sa maintenance est nulle.

La mise au point de nouveaux matériaux dits composites, ouvre actuellement de nouvelles perspectives pour le développement futur des roues d'inertie. Les roues construites avec ces matériaux, de densité plus faible que l'acier, peuvent tourner à de très grandes vitesses, permettant une grande capacité de stockage d'énergie.

La Figure V.7. donne les caractéristiques de ces différents matériaux.

5.4.2. Description des parties principales de R_I

La Figure V.8. schématise les principaux organes de la roue d'inertie. Celle-ci en acier de très bonne résistance mécanique, est maintenue en suspension entre deux paires de couronnes en aimant permanent 11 (Fig.V.8) solidaires d'une part de la roue elle-même (rotor 5) et d'autre part de l'enceinte (stator 4) dans laquelle le rotor est placé.

Les paliers magnétiques (ou couronnes 11) assurent un guidage radial de la roue.

L'asservissement en position axiale de R_I est obtenu à l'aide d'un électro-aimant 6 appelé " actuateur " placé dans la partie médiane de R_I .

Les Figures V.9. et 10. donnent une vue agrandie de ces deux organes. En fonctionnement normal, il n'y a pas de contact entre les pièces tournantes et les pièces fixes : il n'y a donc pas de frottement mécanique générateur de pertes, de bruit et de vibrations. Seule, la partie électronique assurant l'asservissement des positions de R_I dissipe de l'énergie qui reste faible.

En position de repos ($N_2 = 0$) ou à faible vitesse de la roue, des paliers mécaniques de secours (à roulements à billes) assurent les guidages radial et axial.

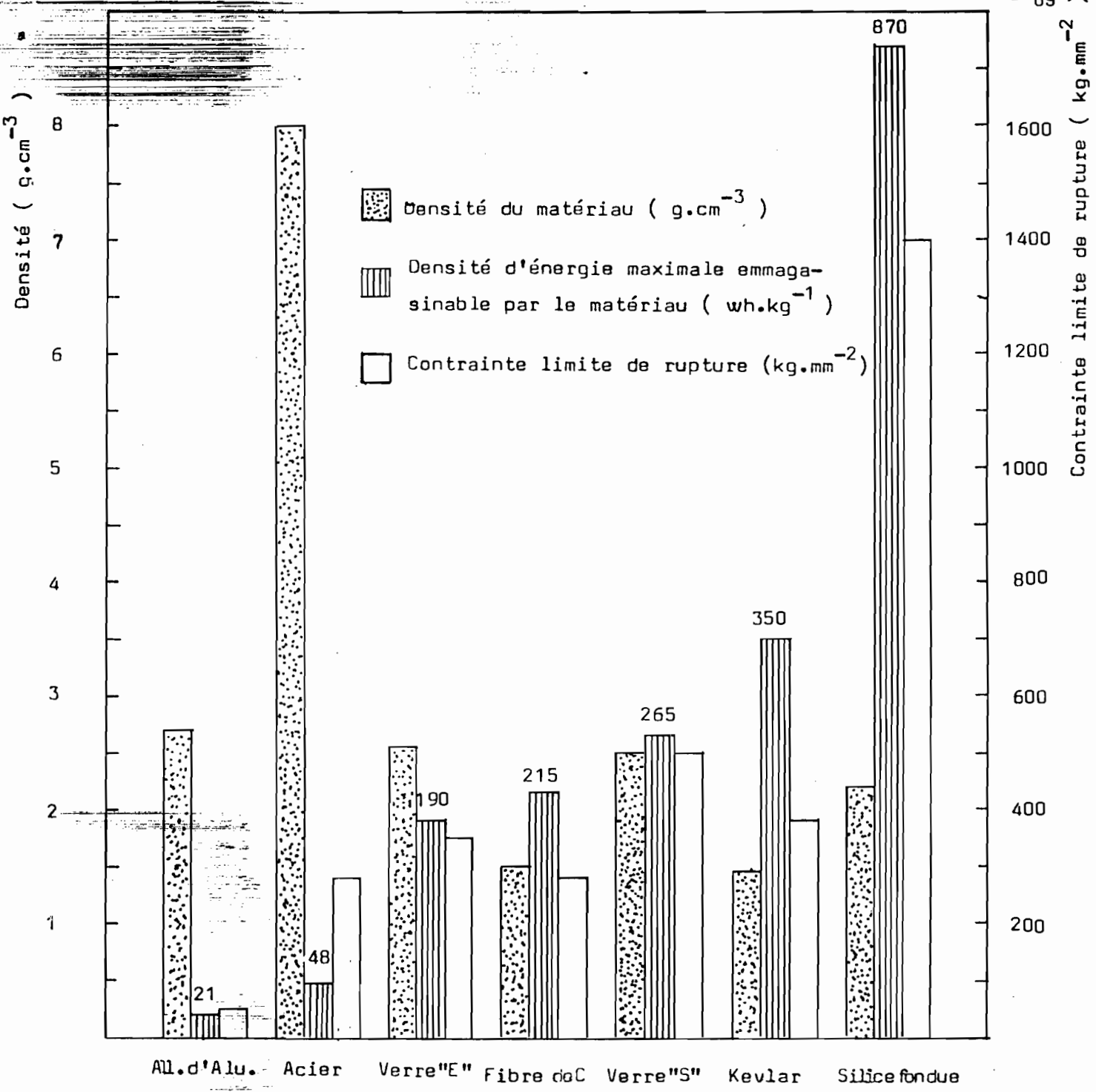
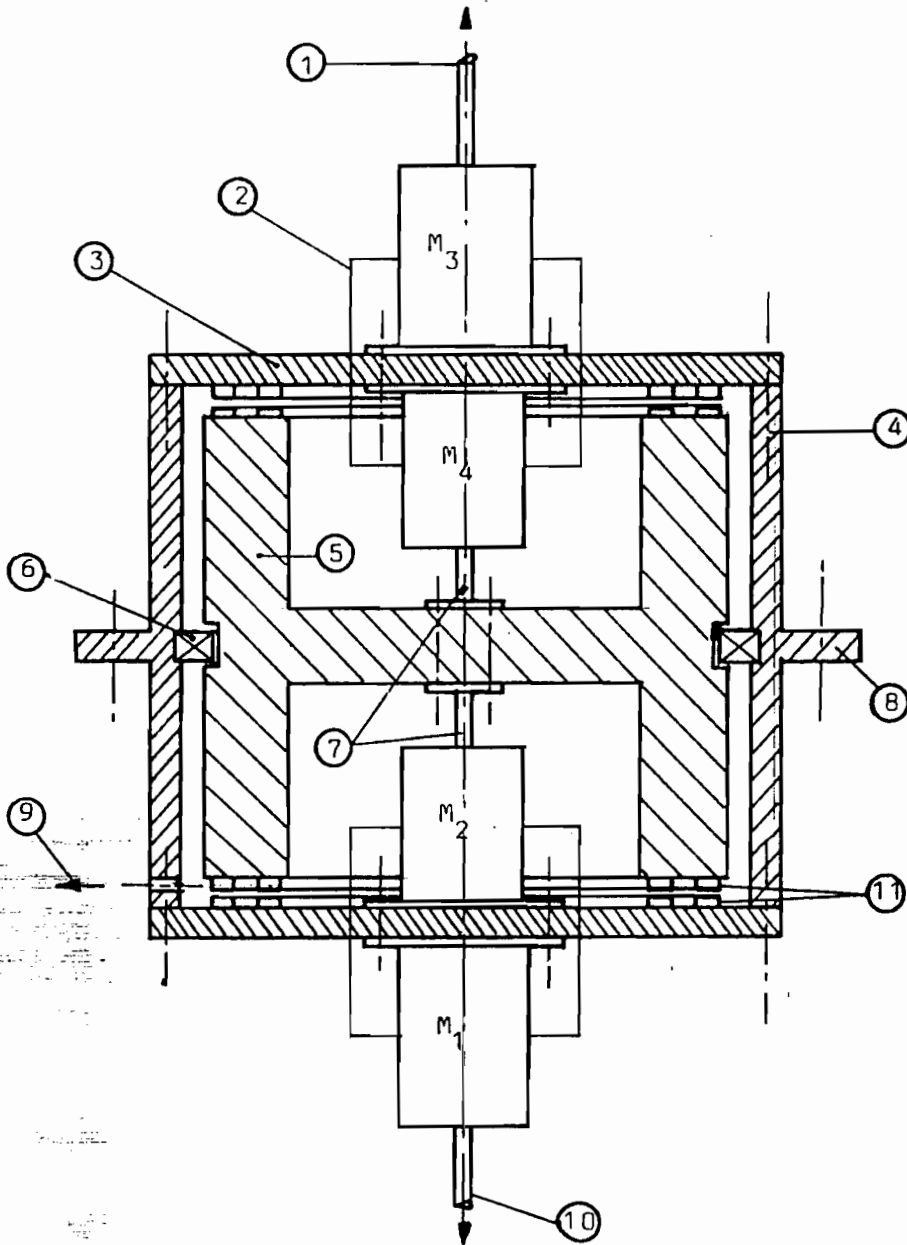


Fig.V.7.: Caractéristiques des différents matériaux utilisables pour la fabrication des roues d'inertie (réf. [15])

Vers le multiplicateur M_m



Vers l'alternateur M_5

Fig.:V.8.:Représentation schématique de la roue d'inertie R_I (Ech $\approx 1/10$)

- | | | | |
|---|--|---|--|
| ① | Axe de la machine homopolaire M_3 | ⑦ | Axe de M_2 et M_4 |
| ② | Liaisons électriques entre M_3 et M_4 | ⑧ | Patte de fixation de l'ensemble sur un bâti |
| ③ | Couvercle de l'enceinte sous vide ($p = 10^{-2}$ mm de Hg) en tôle épaisse | ⑨ | Conduite destinée à faire le vide |
| ④ | Corps de l'enceinte sous vide | ⑩ | Axe de M_1 |
| ⑤ | Roue d'inertie R_I | ⑪ | Couronnes magnétiques (paliers magn.) en aimant permanent. |
| ⑥ | "Actuateur" assurant l'asservissement de la position axiale de la roue. | | |

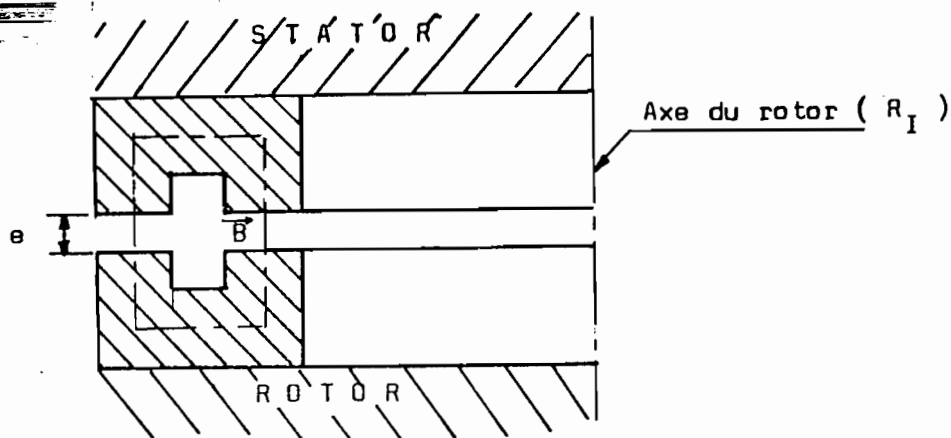


Fig.V.9.: 1/2 coupe schématique des couronnes magnétiques 11 (Fig.V.8.). Elles assurent le guidage radial de la roue.

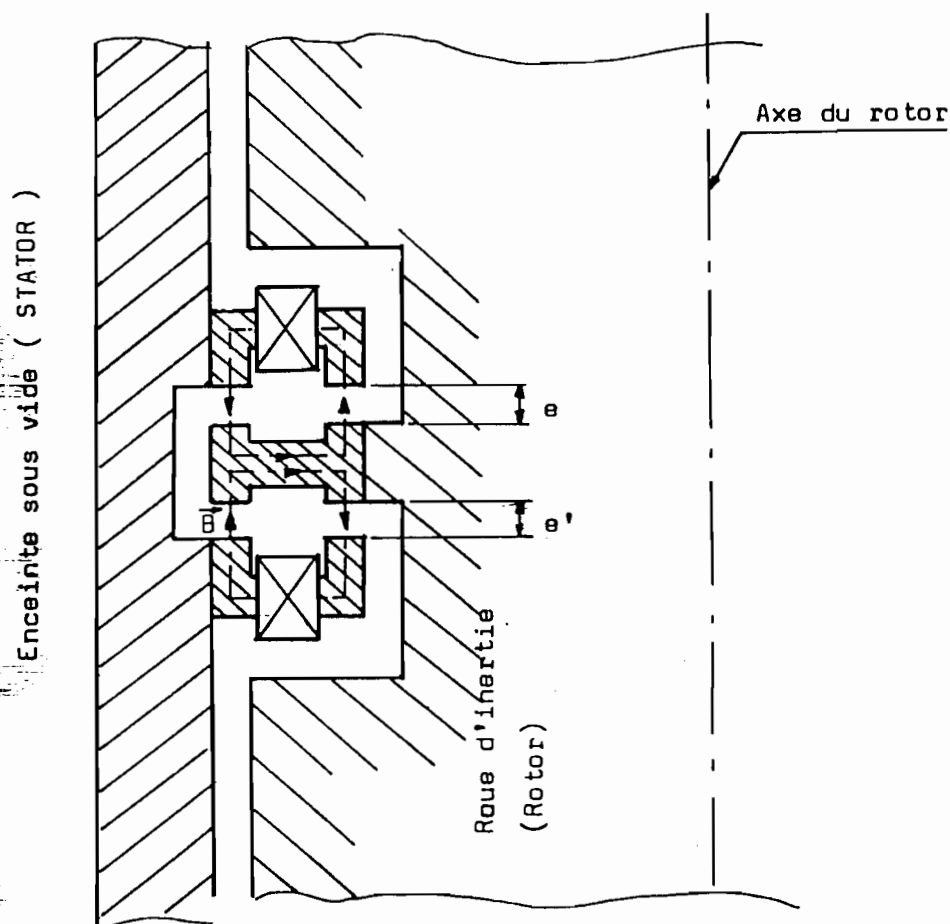


Fig.V.10.: 1/2 coupe de l' "actuateur" 6. Il comprend:

- 1 paire de bobines b et b' assurant le positionnement axial du rotor.
- 1 circuit magnétique (en fer doux) solidaire, en partie du rotor et, en partie, du stator.

Un vide de l'ordre de 10^{-2} mm de H_g est réalisé à l'intérieur de l'enceinte contenant la roue. Aussi, les pertes par frottement de la roue en mouvement avec l'air résiduel peuvent-elles être négligées. La consommation de l'énergie par la pompe à vide peut être faible car celle-ci ne fonctionne que par intermittance.

5.4.3. Moment d'inertie de R_I

La capacité de la roue d'inertie que nous nous proposons de calculer est telle que celle-ci doit fournir la moitié de la consommation journalière plus la consommation des dispositifs de commande et asservissement (Tableau III.1.), soit une énergie totale consommée E_c d'environ 8 KWh.

En vertu des principes de conservation de l'énergie, R_I doit stocker une énergie E_{RI} :

$$E_{RI} = \frac{1}{2} J (\Omega_{2 \max}^2 - \Omega_{2 \min}^2) = \frac{E_c}{\eta_5 \eta'_{12}}$$

où η'_{12} est le rendement de restitution de la roue à travers (M_1-M_2). Ce rendement est différent de η_{12} de la Fig.V.6. car il prend également en compte les pertes MHD de M_4 .

η'_{12} est représenté par la Figure V.11.

Le rendement moyen que nous avons retenu pour calculer le moment d'inertie J est $\langle \eta'_{12} \rangle = 0,75$.

Nous rappelons en outre que : $N_{2 \max} = 12000$ t/mn,

$N_{2 \min} = 6000$ t/mn et

$\langle \eta_5 \rangle = 0,9$

On trouve : $J = 72 \text{ m}^2 \text{ Kg}$

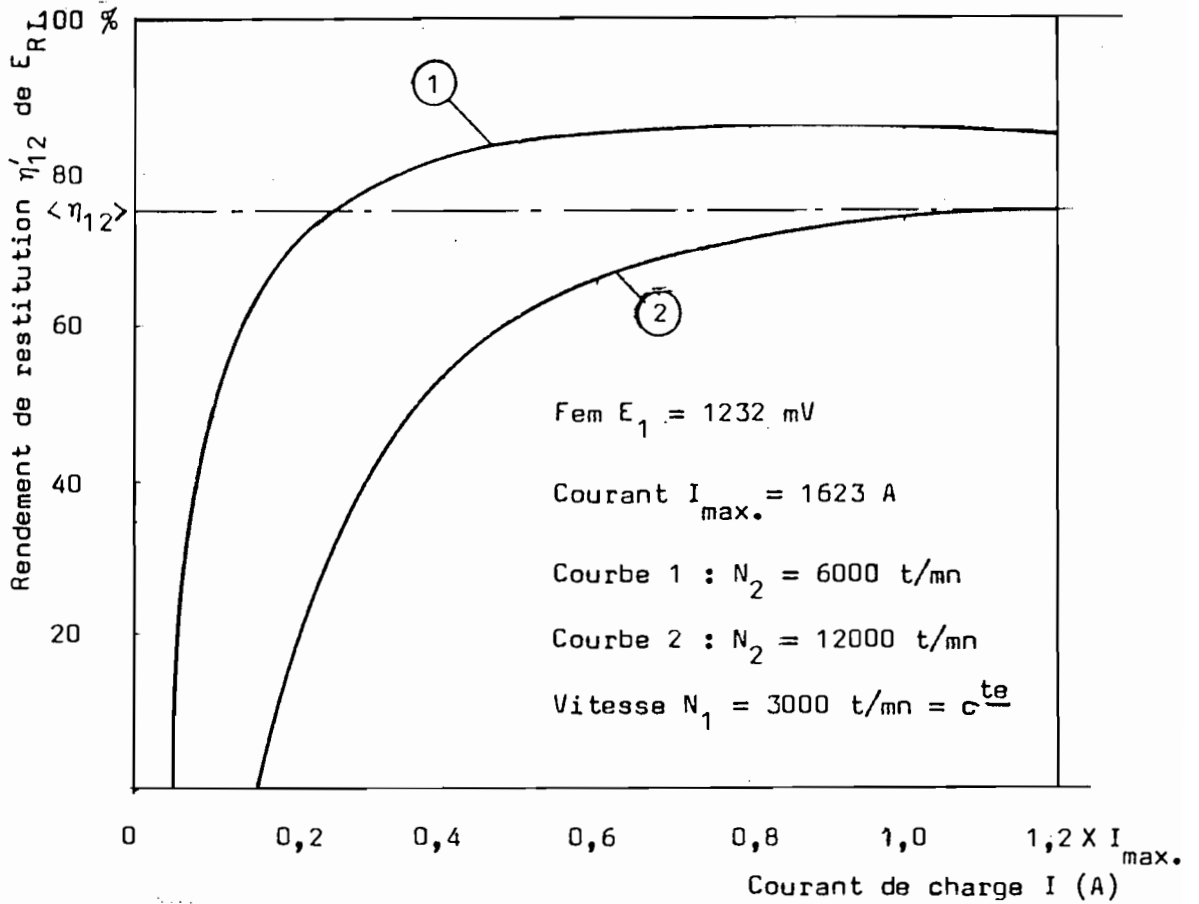


Fig.V.11.: Rendement de restitution de l'énergie stockée par R_I

5.4.4. Encombrement de R_I

Sans entrer dans les détails concernant les divers façonnages que doit subir la roue pour son bon fonctionnement (entailles de R_I pour y loger les appareils de mesure, etc ...) et qui pourraient diminuer la résistance mécanique dans telle ou telle partie de R_I , ce dont il faut nécessairement tenir compte dans les calculs de projets définitifs, nous allons supposer que R_I est un cylindre creux (si on excepte la jante centrale (Fig.V.8.)).

Le moment d'inertie d'un tel solide tournant autour de son axe est :

$$J = \frac{1}{2} M (\rho_1^2 + \rho_2^2) \quad (5.31.)$$

où :

. M est la masse de la roue d'inertie

$$M = \Lambda_{\text{acier}} \pi (\rho_1^2 - \rho_2^2) h_{RI} \quad (5.32.)$$

. Λ_{acier} : densité de l'acier

. ρ_1 et ρ_2 : rayons extérieur et intérieur de R_I respectivement

. h_{RI} : la hauteur de la roue.

Les dimensions radiales de la roue doivent satisfaire les conditions de résistance du matériau choisi.

En effet, deux sortes de contraintes de traction apparaissent dans le matériau lorsque R_I se met à tourner [18] :

- une contrainte radiale σ_r

- une contrainte tangentielle σ_t

La valeur maximale de ces contraintes lorsque la roue tourne à une vitesse périphérique V est :

$$\sigma_{r_{\max}} = \Lambda_{\text{acier}} V^2 \left(\frac{3 + \nu}{8} \right) (1 - a)^2 \quad (5.33.)$$

$$\sigma_{t_{\max}} = \Lambda_{\text{acier}} V^2 \left(\frac{3 + \nu}{4} \right) \left(1 + \frac{1 - \nu}{3 + \nu} \cdot a^2 \right)$$

où :

- $\sigma_{r_{\max}}$ est toujours inférieur à $\sigma_{t_{\max}}$. Les deux contraintes s'expriment dans le système MKSA en $N.m^{-2}$.

- ν : coefficient dit de Poisson. Il est sans dimension et sa valeur est de 0,3 pour l'acier.

- $a = \frac{\rho_2}{\rho_1}$: rapport des rayons du cylindre.

Si σ_L est la contrainte limite à la traction du matériau constitutif de la roue, la condition pour laquelle cette roue peut tourner à une vitesse périphérique V , en toute sécurité, sans risque d'incident, est :

$$\sigma_{t_{\max}} < \sigma_L$$

Application numérique

=====

Adoptons les valeurs suivantes :

- le coefficient de sécurité par rapport à σ_L : 0,6

- le rapport des rayons du cylindre : $a = \frac{2}{3}$

De l'expression de σ_t (5.33.), nous déduisons la vitesse maximale périphérique de R_I et par suite, le rayon extérieur de ce dernier :

$$\rho_1 = \frac{1}{\Omega_{2 \max}} \left[\frac{0,6 \sigma_L}{\Lambda_{\text{acier}} \left(\frac{3+u}{4} \right) \left(1 + \frac{1-u}{3+u} a^2 \right)} \right]^{1/2} \quad (5.34.)$$

$$\cdot \sigma_L = 240 \text{ Kg.mm}^{-2} = 2,35 \cdot 10^9 \text{ N.m}^{-2} *$$

$$\cdot \Lambda_{\text{acier}} = 8750 \text{ Kg.m}^{-3}$$

$$\cdot \Omega_{2 \max} = 400 \pi \text{ rad.s}^{-1}$$

Les valeurs (arrondies) des rayons de R_I déduites de (5.34.) et du rapport a sont :

$$- \rho_1 = 330 \text{ mm}$$

$$- \rho_2 = 220 \text{ mm}$$

La hauteur h_{RI} de la roue est déduite à partir de (5.32) et de (5.31.) :

$$h_{RI} = 550 \text{ mm} \quad (\text{valeur arrondie})$$

Les valeurs de la masse M et du moment d'inertie J de R_I , recalculées avec les valeurs ci-dessus de ρ_1 , ρ_2 et h_{RI} , donnent :

$$M \simeq 915 \text{ Kg}$$

$$J \simeq 72 \text{ m}^2 \text{ Kg}$$

L'énergie maximale stockée par R_I à 12000 t/mn est d'environ 15,8 KWh (soit une densité d'énergie de 17,3 Wh/Kg . La roue SNIAS stocke seulement 3,6 Wh/Kg).

La vitesse critique correspondant à σ_L est d'environ 15800 t/mn (soit une densité critique d'énergie stockable par R_I d'environ 30 Wh/Kg).

5.4.5. Pertes à vide de l'énergie stockée par R_I

Il est intéressant de savoir combien de temps la roue d'inertie peut

* Contrainte limite à la traction de l'acier au Ni-V [17].

conserver l'énergie E_{RI} qu'elle a stockée alors qu'aucune énergie utile n'est prélevée à partir de E_{RI} .

Pour connaître la réponse à cette question, découplons électriquement M_1 de M_2 d'une part, et M_3 de M_4 d'autre part, de manière à isoler la roue d'inertie. Celle-ci se mettra à ralentir sous le seul effet des frottements visqueux des contacts glissants dans M_2 et M_4 .

L'expression du mouvement de R_I est donnée par :

$$2 \alpha_2 N_2^3 = J \Omega_2 \frac{d \Omega_2}{dt}$$

qui s'écrit encore :

$$2 \alpha'_2 \Omega_2^2 = J \frac{d \Omega_2}{dt}$$

où : $\alpha'_2 = \frac{\alpha_2}{(2\pi)^3} \simeq 7,8 \cdot 10^{-8} \text{ W (rad/s)}^{-3}$

En intégrant cette dernière équation, on obtient l'expression de la vitesse de R_I :

$$\Omega_2 (t) = \frac{\Omega_{20}}{1 + \frac{2\alpha'_2 \Omega_{20}}{J} \int_{t_0}^t dt} \quad (5.35.)$$

où :

- Ω_{20} est la vitesse angulaire de R_I à l'instant initial t_0
- Ω_2 la vitesse angulaire de R_I à l'instant t quelconque.

La Figure V.12. donne l'allure de $\Omega_2 (t)$ à vide.

L'énergie maximale " utile " stockée par R_I sera consommée à vide en 102 heures. Mais la vitesse de R_I tendra asymptotiquement vers zéro pour un temps théoriquement infini.

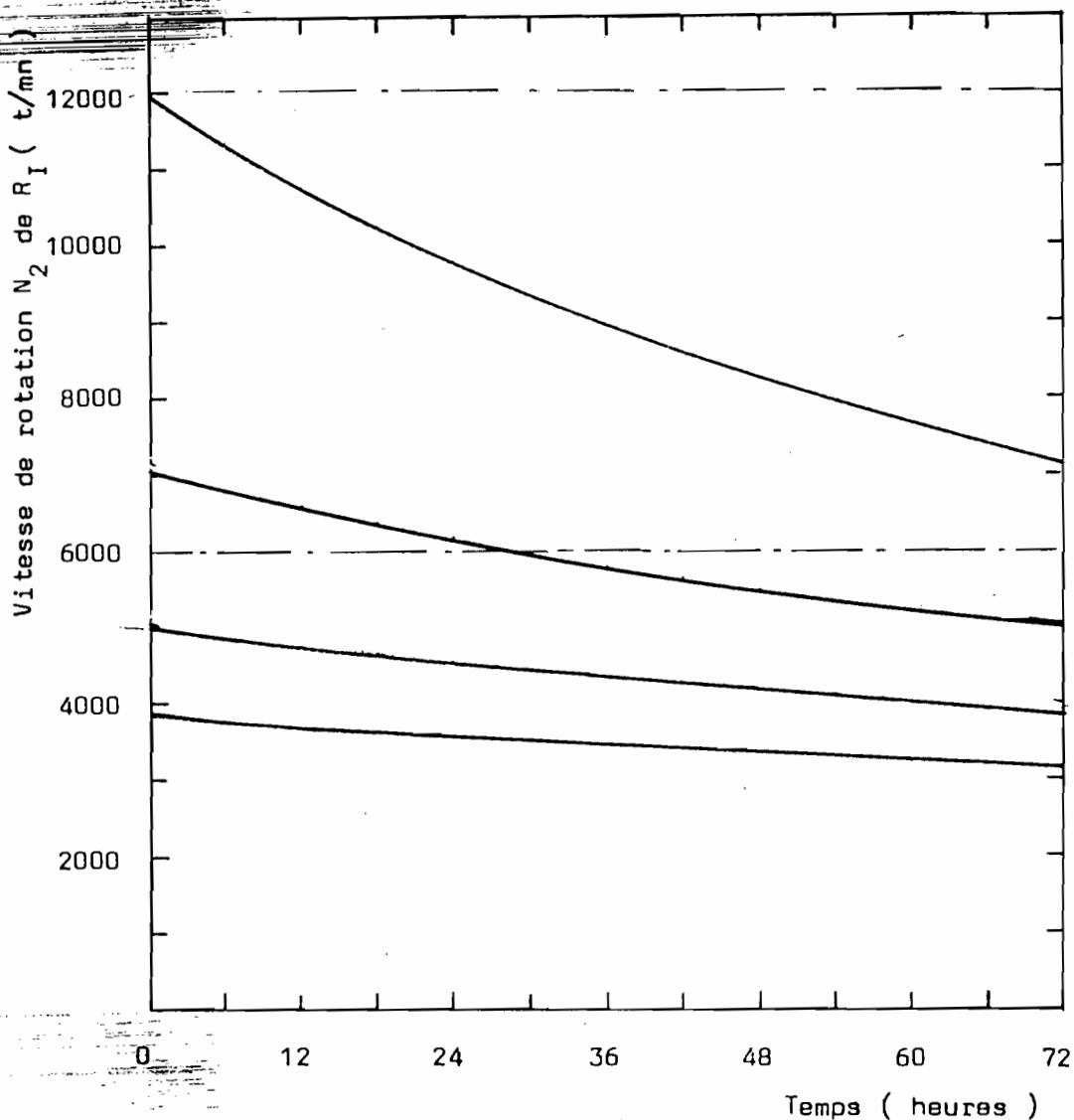


Fig.V.12.: Décélération à vide de la roue d'inertie R_I en fonction du temps.

V.5. Le multiplicateur de vitesse M_m

Le multiplicateur mécanique de vitesse (M_m) utilisé côté éolien, est du type épicycloïdal à trains composés.

Il doit être réversible afin de permettre le démarrage de l'éolienne lorsque celle-ci est à l'arrêt : il fonctionne, alors, dans ce cas, en réducteur, en prélevant l'énergie cinétique de R_I .

Le rapport de multiplication m de la vitesse Ω_{G_e} de G_e doit être tel qu'à la vitesse nominale du vent, la vitesse de rotation Ω_3 de M_3 soit d'environ 3000 t/mn :

$$m = \frac{\Omega_3}{\Omega_{G_e}} \quad (\approx 19)$$

Le rendement d'un multiplicateur mécanique de vitesse, est, comme celui des engrenages en général, fonction des facteurs suivants :

- couple transmis
- vitesse angulaire
- mode de lubrification et qualité des lubrifiants
- qualité des matériaux et des surfaces en contact
- module (finesse) des dentures
- etc ...

Nous nous abstenons donc d'entrer plus en avant dans l'étude du multiplicateur.

Nous devons simplement savoir que le rendement des engrenages et notamment des multiplicateurs mécaniques de vitesse, est excellent.

Il peut être supérieur à 98 % pour un engrenage de qualité courante.

Compte tenu de la valeur de puissance relativement faible que nous devons transmettre (≈ 2 KW) et du rapport m que nous avons adopté, nous prendrons un rendement moyen de M_m égal à 92 %.

VI - FONCTIONNEMENT DE L'ENSEMBLE DU SYSTEME DE CONVERSION D'ENERGIE

La disposition, les uns par rapport aux autres, des différents organes de la chaîne de conversion d'énergie (Fig.I,1.) permet de scinder le système ainsi constitué en deux sous-systèmes S_I et S_{II} . La régulation de ces derniers se fait indépendamment l'une de l'autre :

• S_I est formé par : G_{pv} , M , M_5 , $M_1 - M_2$ et R_I

• S_{II} est formé par : G_e , M_m , $M_3 - M_4$ et R_I

VI.1. Sous-système S_I

S_I représente à lui seul un dispositif complet de conversion et de consommation d'énergie si on lui adjoint les récepteurs (R).

Nous examinerons successivement dans ce paragraphe :

- le couplage série-parallèle des modules pv, susceptible de satisfaire un cahier des charges bien déterminé,
- la caractéristique vitesse-courant (ou vitesse-couple) de (G_{pv}, M) à vide et en charge.
- la régulation du sous-système S_I .
- le mouvement de la roue R_I sous l'effet de l'énergie fournie par G_{pv} .

6.1.1. Couplage série-parallèle des modules pv et couplage G_{pv}/M

Lorsque l'on relie électriquement le générateur pv au moteur M à courant continu, la tension aux bornes de ces deux éléments est la même. Le courant I fourni par le générateur pv et absorbé par le moteur est également le même.

La force contre-électromotrice (fcem) E'_M du moteur M s'écrit alors:

$$E'_M = k_M \Phi_M N_M = U - \Delta U_M \quad (6.1.)$$

où :

- $k_M \Phi_M$ est une constante caractéristique de M
 $(\approx 1,93 \text{ volt (t/s)}^{-1})$
- N_M : la vitesse de rotation de M (t/s)
- U : la tension fournie par G_{pv} donnée par l'expression (4.7.) en sachant que chaque module pv est protégé par une diode série D_S dont la résistance r_{ds} est d'environ $0,05 \Omega$.
- ΔU_M : la chute de tension due à la résistance de l'induit et à la réaction magnétique d'induit de M. Dans notre cas, nous avons vu (équation 5.1.) que $\Delta U_M = R_M I$ avec $R_M \approx 0,8 \Omega$.

Pour un niveau d'éclairement φ_L donné, la puissance absorbée par M doit non seulement être égale à la puissance optimale fournie par G_{pv} , mais la vitesse N_M doit également être voisine de la vitesse de synchronisme de M_5 aux tolérances près admises sur la fréquence du courant fourni par M_5 .

Au paragr. IV.2., nous sommes arrivés à la conclusion que, pour le générateur pv de notre système, il faut avoir environ 120 modules RTC, de type BPX 47 B-20. Il convient de déterminer maintenant les configurations série-parallèle les plus favorables pour un nombre total de modules peu différent de 120.

En remarquant que, pour les conditions de fonctionnement optimales, la

tension U_{op} et le courant I_{op} fourni par le G_{pv} sont reliés à la tension v_{op} et au courant i_{op} , relatifs à chaque module, par :

$$U_{op} = s v_{op} \quad \text{et} \quad I_{op} = p i_{op}$$

les montages indiqués dans le tableau ci-dessous, peuvent être envisagés pour le G_{pv} :

Montage	Nombre		
	de modules en série par branche	de branches en parallèle	total des modules
A	15	8	120
B	16	8	128
C	14	9	126
D	14	8	112

La relation (6.1.) permet de calculer, à l'aide des caractéristiques des modules, les valeurs N_M qu'on peut obtenir à des éclairements φ_L différents pour chacun des montages fonctionnant dans les conditions optimales.

Pour le montage A, avec les valeurs numériques de r_{ds} et R_M données ci-dessus d'une part, et les valeurs relevées sur les caractéristiques des modules communiquées par le constructeur d'autre part, nous obtenons pour $\varphi_L = 0,5 ; 0,8$ et 1 KW.m^{-2} (voir Annexe II), que la vitesse de rotation de M est respectivement de $N_M = 50,5 ; 50,8$ et $58,3 \text{ t/s}$ lorsque M absorbe la puissance optimale $U_{op} \times I_{op}$.

En admettant une tolérance de $\pm 6\%$ sur la fréquence du courant fourni par M_5 , les deux premières valeurs de N_M sont en accord avec les limites tolérées de la vitesse de M_5 (50 ± 3 t/s). Par contre, $N_M = 58,3$ t/s se situe en dehors de ces limites. Mais en maintenant $N_M = 53$ t/s au lieu de 58,3 t/s, pour $\varphi_L = 1 \text{ KW.m}^{-2}$, la puissance perdue n'est que de 2 % inférieure par rapport à la puissance optimale fournie par G_{pv} pour ce niveau d'éclairement.

Pour la suite de notre étude, nous retenons le montage A, obtenu par le couplage en parallèle de 8 branches constituées de 15 modules en série.

6.1.2. Caractéristiques à vide et en charge

Il s'agit de donner la variation de la vitesse de M en fonction de l'éclairement φ_L (caractéristique à vide) et en fonction du courant de charge dû à une charge extérieure appliquée sur l'arbre moteur de M (caractéristique en charge).

6.1.2.1. Caractéristique à vide

Supposons que le moteur M absorbe à vide un courant $I_0 = 0,6$ A, sa vitesse de rotation à vide, en fonction de l'éclairement φ_L , c'est-à-dire en fonction du photo-courant I_{ph} , est donnée par l'expression (6.1.) et représentée par la Figure VI.1.

6.1.2.2. Caractéristique en charge

Pour chaque niveau d'éclairement φ_L , soumettons M à un couple de charge croissant.

A partir d'une certaine valeur du couple (ou courant de charge) la vitesse N_M chute brusquement à une valeur nulle (Fig.VI.2.) : le rotor est bloqué et le moteur est dit en court-circuit. Mais on conçoit aisément que la valeur du courant de court-circuit I_{cc} est limitée par la valeur du photo-courant I_{ph} . I_{cc} n'est donc pas excessif et le moteur M

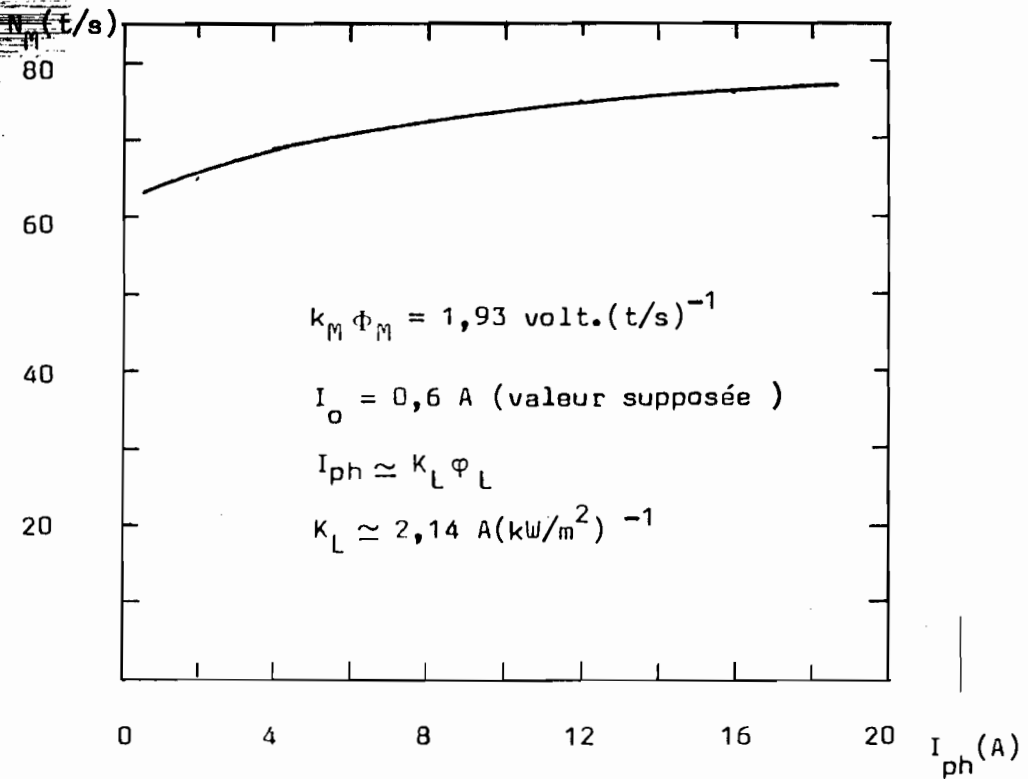


Fig.VI.1.: Caractéristique à vide de M alimenté par G_{pv} .

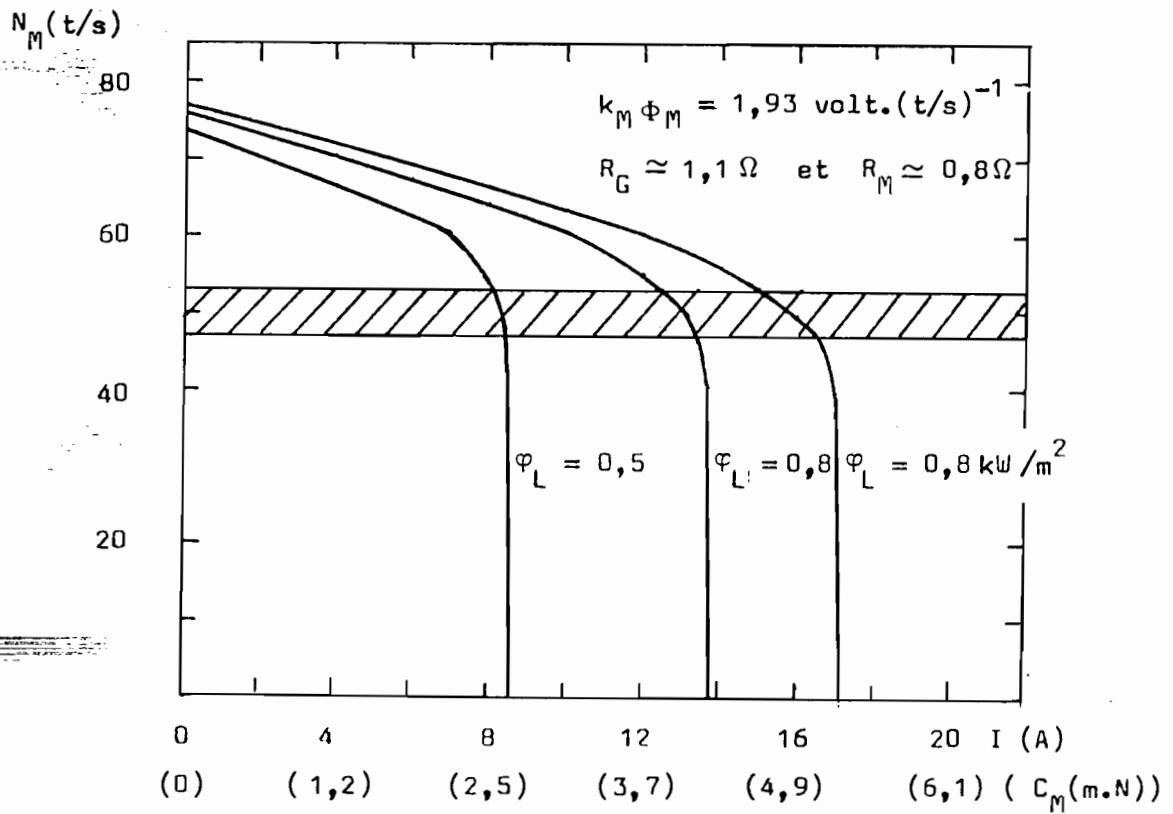


Fig.VI.2.: Caractéristique en charge du moteur M alimenté par le générateur G_{pv} .

ne risque en aucun cas de subir des avaries graves, comme cela aurait pu se produire si M était alimenté par une source puissante (réseau de distribution électrique par exemple).

Pour que N_M appartienne à ces deux limites (50 ± 3 Hz) qui délimitent la zone de fonctionnement de G_{pv} voisin de l'optimum, une régulation devient nécessaire et c'est ce que nous allons examiner maintenant.

6.1.3. Régulation du sous-système S_I

Avant d'examiner les grandeurs de régulation et un dispositif possible de cette régulation à mettre en oeuvre, nous allons d'abord étudier le comportement de S_I sans régulation.

6.1.3.1. Fonctionnement sans régulation de S_I

Supposons optimal le fonctionnement de S_I pour un éclairement φ_{L1} donné. Autrement dit, le moteur M absorbe de G_{pv} une puissance optimale $U_{op} I_{op}$.

Supposons d'autre part que la vitesse N_2 soit comprise entre $N_{2 \min}$ et $N_{2 \max}$ et que $I_1 = 0$ (aucun échange d'énergie avec R_I). Si F est le point de fonctionnement courant du système G_{pv}/M , il est confondu, dans ces conditions, avec le point de fonctionnement optimal O_1 (Fig.VI.3.).

Deux situations susceptibles de rompre cet équilibre peuvent se produire :

a) Variation de la puissance P_5 à éclairement φ_L constant

Cette variation de P_5 entraîne celle du couple résistant C_5 exercé par M_5 sur l'arbre moteur M qui peut être positif ou négatif.

1. Premier cas : $dC_5 > 0$

Le couple C_5 qui croît, aura tendance à diminuer la

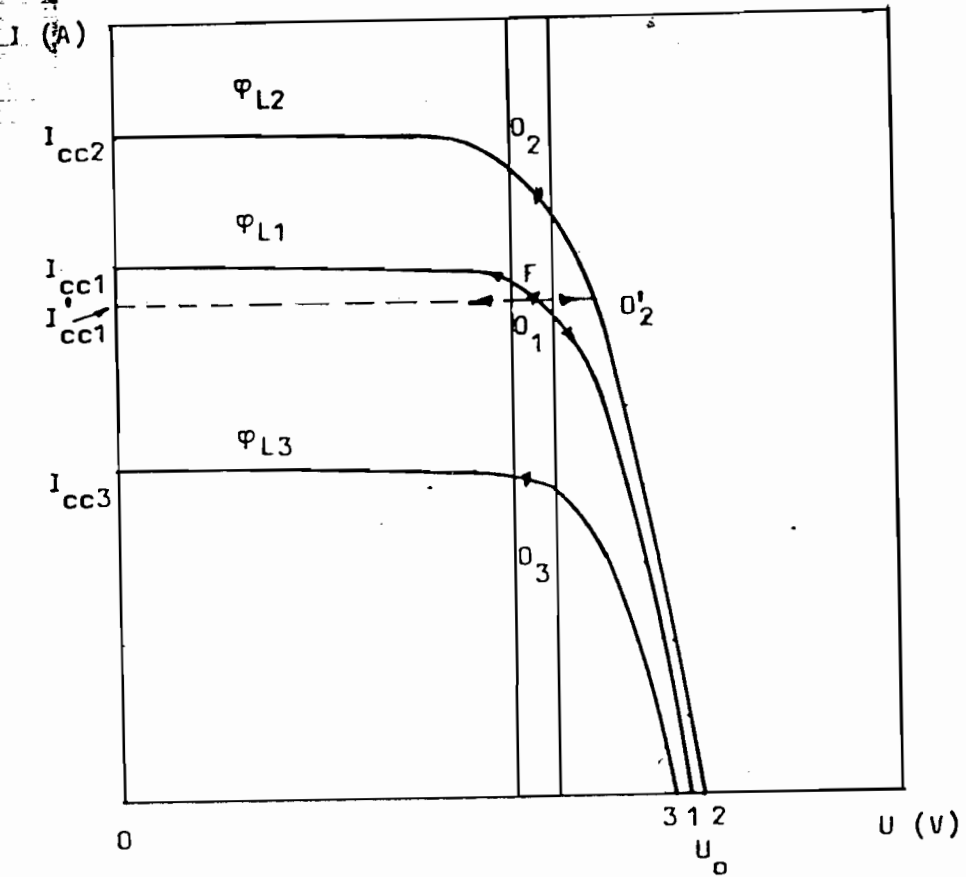


Fig.VI.3. Caractéristique courant-tension de G_{pv} et sa zone de fonctionnement optimal compatible avec la tolérance exigée sur la vitesse de rotation de M (50 ± 3 t/s)

vitesse de M , donc à diminuer la fem E_1 de M_1 ($\Phi_1 = cte$) jusqu'à ce que $E_1 < E_2$. Comme E_2 ne variera pratiquement pas à cause de l'inertie très importante de R_I

$$\frac{E_1 - E_2}{R_{12}} = I_1 < 0$$

M_2 fonctionnera en génératrice, et M_1 fonctionnera en moteur fournissant un couple $C_1 = k_1 \Phi_1 I_1$ qui s'ajoutera à C_M (de même signe que C_1) pour empêcher que N_M ne chute à zéro, le point F se déplaçant vers I_{cc} (c.f.Fig.VI.3.).

2. Deuxième cas : $dC_5 < 0$

C_5 décroît et devient plus petit que le couple C_M .
 N_M croît, ainsi que E_1 lorsque $E_1 > E_2$, le courant qui s'établit est tel que :

$$\frac{E_1 - E_2}{R_{12}} = I_1 > 0$$

M_1 est génératrice et M_2 est moteur. Ce dernier fournit un couple $C_2 = k_2 \Phi_2 I_1$ qui tend à accélérer le mouvement de R_I . Le point F se serait déplacé vers U_{01} (c.f. Fig. VI.3.) s'il n'y avait pas l'inertie de R_I .

Dans les deux cas, il y a une auto-régulation de la vitesse N_M , qui est, rappelons-le, égale à N_5 et à N_1 .

b) Variation de l'éclairement φ_L à la puissance P_5 constante

Là encore, deux cas d'auto-régulation apparaissent :

1. Premier cas : $d\varphi_L > 0$

Par exemple l'éclairement passe du niveau φ_{L1} au niveau φ_{L2} . La tension fournie par G_{pv} augmente, le point F passe de O_1 à O'_2 , et N_M tend aussi à croître.

Il en est de même de E_1 et nous nous retrouvons alors dans le second cas de a) précédent : M_1 est génératrice et M_2 est moteur accélérant le mouvement de R_I .

2. Deuxième cas : $d\varphi_L < 0$

L'éclairement diminue ici et passe du niveau φ_{L1} à φ_{L3} . La tension fournie par G_{pv} diminue, F passe de O_1 à I'_{cc1} et N_M tend à diminuer également. Il en est de même de E_1 et nous nous retrouvons dans le premier cas de a) : M_2 est génératrice et M_1 moteur.

Cette auto-régulation du sous-système S_I ne peut suffire pour maintenir durablement la vitesse N_M dans les limites strictes tolérées, si les variations de dC_5 et (ou) $d\varphi_L$ se maintiennent longtemps.

Il faut donc nécessairement, introduire une régulation pour maintenir N_M à une valeur sensiblement constante.

6.1.3.2. Fonctionnement de S_I avec régulation

En régime continu, la vitesse N_M commune aux trois machines M , M_5 et M_1 doit être sensiblement constante. Le couple résistant C_5 de M_5 doit, à chaque instant, être équilibré par la somme du couple moteur C_M de M et du couple C_1 . Ce dernier est moteur pour $C_1 > 0$ et résistant pour $C_1 < 0$.

$$C_5 = C_M + C_1 \quad (6.2.)$$

où :

$$C_5 = 3 \frac{E_o}{\Omega_{M_5} L \omega} V_5 \sin \theta \quad (6.3.)$$

- \vec{E}_o : fem de l'alternateur M_5 engendré par la force magnétomotrice (f.m.m.) $\vec{\xi}_o$ [16] (Fig.VI.4.)
- \vec{V}_5 : la tension simple fournie par M_5

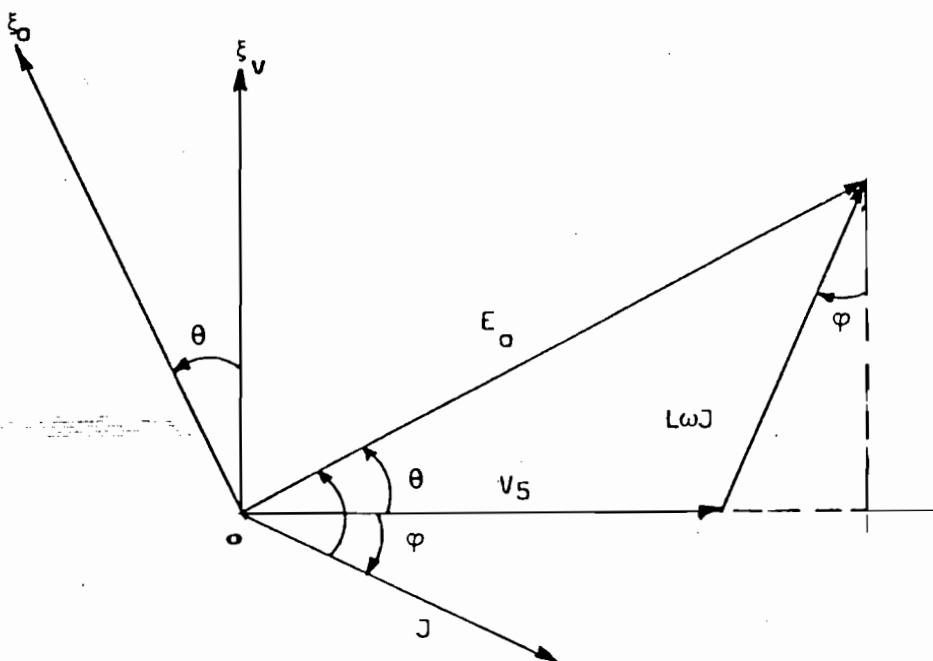


Fig.VI.4.: Diagramme des tensions de l'alternateur M_5 .

- Ω_{M_5} : vitesse angulaire de M_5
- $L\omega$: inductance de M_5
- $\theta = (\vec{V}_5, \vec{E}_0)$ angle représentant le décalage " électrique " entre la f.m.m. de l'inducteur de M_5 tournant en charge et à vide. Lorsque M_5 fonctionne à vide $\theta = 0$: \vec{E}_0 se confond avec \vec{V}_5 et C_5 est nul.
- $C_M = k'_M \Phi_M I$; $k'_M \Phi_M$ est une constante de M et I le courant d'induit. Le couple $C_M \geq 0$ lorsque $\varphi_L \geq 0$.
- $C_1 = k_1 \Phi_1 I_1 = \frac{k_1 \Phi_1}{R_{12}} (E_2 - E_1) \geq 0$ (6.4.)

L'équation (6.4.) permet la régulation de notre sous-système. En effet, réécrivons-la sous la forme :

$$C_5 = C_M + \frac{k_1 \Phi_1}{R_{12}} (E_2 - E_1) \quad (6.5.)$$

Nous constatons que :

C_5 et C_M sont fonctions des paramètres extérieurs au sous-système S_I (puissance absorbée par les récepteurs, intensité du rayonnement solaire incident).

La régulation de S_I , d'après la variation de ces paramètres, ne se fera que par le biais du couple C_1 (6.4.) Elle peut être obtenue soit à l'aide de Φ_1 , soit avec Φ_2 . Ces deux possibilités de régulation de S_I sont équivalentes.

Nous avons choisi (c.f. § 3.2.) de maintenir le flux d'induction magnétique Φ_1 constant et d'assurer la régulation de S_I par

la variation du flux Φ_2 afin de maintenir N_M sensiblement constant.

La grandeur du réglage du couple C_1 en fonction des valeurs relatives de C_5 et C_M sera donc le courant I_1 dans ($M_1 M_2$) qu'on fera varier par l'intermédiaire de E_2 , c'est-à-dire en définitive, par le flux d'induction magnétique Φ_2 .

Trois cas se présentent :

1. Premier cas : $C_5 > C_M$

Il faut augmenter Φ_2 de telle sorte que $E_2 > E_1$ et que l'équation (6.5.) soit vérifiée.

2. Deuxième cas : $C_5 < C_M$

Il faut diminuer Φ_2 de telle sorte que $E_2 < E_1$ et l'équation (6.5.) soit vérifiée.

3. Troisième cas : $C_5 = C_M$

Il faut faire varier Φ_2 de telle sorte que $E_1 = E_2$.

La variation de E_2 , par rapport à E_1 , permet donc de transmettre de la puissance vers R_I (stockage d'énergie) ou vers M_5 (restitution de l'énergie stockée).

Exemple :

=====

Soit une puissance de $P_1 = 2$ KW, à faire transmettre par M_1 à M_5 à la vitesse N_M de 3000 t/mn.

$$E_1 = N_1 \Phi_1$$

$$= 50 \text{ t/s} \times 1,6 \text{ T} \times 2 \pi (0,050)^2 \approx 1,23 \text{ volt}$$

$$R_{12} = 6.10^{-5} \Omega \quad (\text{c.f. § 5.3.4.})$$

$$I_1 = \frac{P_1}{E_1}$$

$$\begin{aligned}
 E_2 &= E_1 + R_{12} I_1 \\
 &= E_1 + R_{12} \left(\frac{P_1}{E_1} \right) \simeq 1,33 \text{ volt}
 \end{aligned}$$

La différence ($E_2 - E_1$) n'est que de 110 mV environ, soit une variation de E_2 par rapport à E_1 d'environ 8 % pour transmettre la puissance de 2 KW.

6.1.3.3. Description du dispositif de régulation de S_I

Le dispositif de régulation est indiqué sur la Figure VI.5.

Il comprend :

- un capteur de vitesse Ca1 dont le rôle est de mesurer N_M et d'envoyer le signal correspondant à un servo-mécanisme Se1 qui commande l'accouplement des deux demi-arbres de M et M_5 lorsque la vitesse N_M est voisine de la vitesse de synchronisme de M_5 (50 ± 3 t/s).
 - un capteur de tension Ct permet le désaccouplement de M et M_5 dès que la tension aux bornes de M devient négative : c'est en effet l'indication que l'ensoleillement devenant insuffisant, M commence à fonctionner en généra^{trice}. Le même servo-mécanisme Se1 peut servir aux deux usages ; accouplement, désaccouplement de M et M_5 .
 - un régulateur de flux Re1 permet le réglage de Φ_2 en fonction du signal N_1 que lui envoie le capteur de vitesse Ca2. En régime continu de S_I ($N_{2 \min} < N_2 < N_{2 \max}$), la vitesse de N_1 doit être égale à 50 ± 3 t/s.
- Lorsque $N_2 \leq N_{2 \min}$, Φ_2 est maintenu à sa valeur maximale ($B_{2 \max} = 1,6$ T), M_1 continue de fonctionner en moteur entraînant M_5 qui alimente les seuls circuits de commande (redresseur et batterie), tandis qu'un relais Rem1, commandé par Se2, coupe l'alimentation des récepteurs R. Le signal N_2

LEGENDE DE LA FIGURE VI.5.

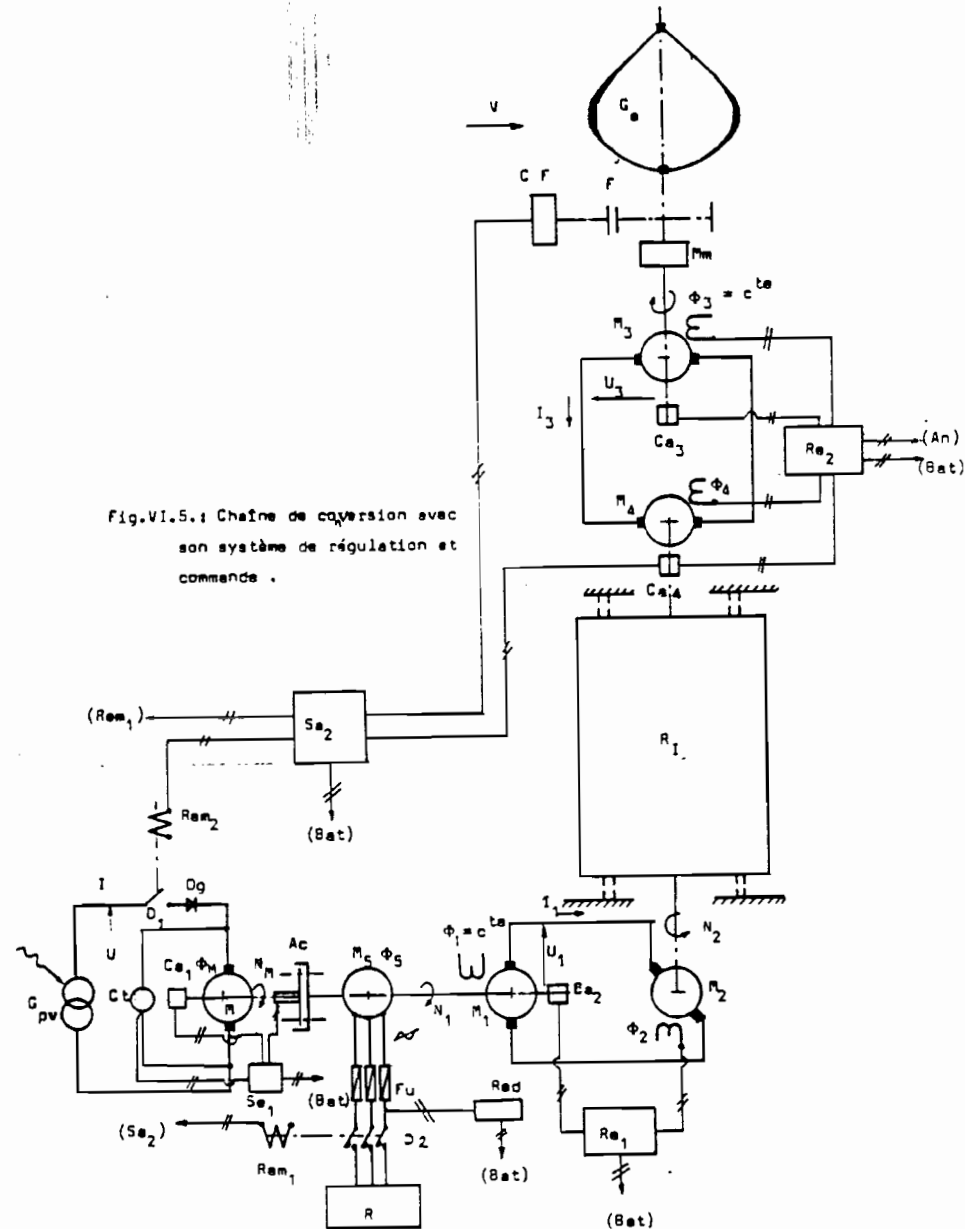


Fig.VI.5: Chaîne de conversion avec son système de régulation et commande .

- Ac : Organe d'accouplement et de désaccouplement de M et M_5 .
- An : Anémomètre indiquant la vitesse du vent.
- Bat : Liaison avec la batterie d'accumulateur.
- Ca_{1,2,3} et 4 : Capteurs de vitesse.
- CF : Commande de F.
- Ct : Capteur de tension aux bornes de M.
- D_{1,2} : Dis-joncteurs.
- Dg : Diode de protection générale de G_{pv}.
- F : Frein électromécanique.
- Fu : Fusibles.
- G_e : Eolienne.
- G_{pv} : Générateur pv.
- M : Moteur cc à aimant permanent.
- M_m : Multiplicateur mécanique de vitesse.
- (M₁-M₂) et (M₃-M₄) : Variateurs de vitesse.
- M₅ : Alternateur.
- R : Récepteurs.
- Re₁ : Régulateur du flux d'excitation de M₂.
- Re₂ : Régulateur du flux d'excitation de M₄. Il commande aussi la mise en marche et l'arrêt des excitations de M₃ et M₄.
- Red : Redresseur, chargeur de batterie.
- Rem_{1, 2} : Relais électromagnétiques de commande de D₁ et D₂.
- R_I : Roue d'inertie.
- Se₁ : Servo-mécanisme de commande d'accouplement et de désaccouplement.
- Se₂ : Servo-mécanisme de commande de D₁, D₂ et F d'après la valeur de N₂.

étant envoyé préalablement à Se2 par le capteur de vitesse Ca4 monté sur l'arbre de R_I .

- Lorsque $N_2 \gg N_{2 \max}$, Ca4 envoie le signal à Se2 qui commande l'ouverture du dis-joncteur D1 afin que la roue n'atteigne pas les vitesses dangereuses.

6.1.4. Mouvement de R_I sous l'effet de la puissance P_{pv} fournie par G_{pv}

L'équation (5.34.) décrit le mouvement à vide de la roue d'inertie. Lorsque P_{pv} varie par rapport à P_5 , la vitesse N_2 de R_I varie également.

Selon le principe de conservation de l'énergie, la variation de la vitesse angulaire de R_I entre deux instants t_0 et t s'écrit :

$$\frac{1}{2} J \left\{ \Omega_2^2 \left[\frac{\Omega_{20}}{1 + \frac{2\alpha'_2 \Omega_{20}(t - t_0)}{J}} \right]^2 \right\} = E_2 I_1 (t - t_0) \quad (6.6.)$$

où :

• J est le moment d'inertie de la roue

• $\alpha'_2 = \frac{\alpha_2}{(2\pi)^3}$: coefficient de pertes ($\approx 7,8 \cdot 10^{-8} \text{ W (rad/s)}^{-3}$).

• Ω_{20} et Ω_2 sont les vitesses de R_I aux instants t_0 et t .

• $\frac{2\alpha'_2 \Omega_{20}(t - t_0)}{J}$ est le terme d'amortissement de la vitesse initiale Ω_{20} entre les deux instants t_0 et t .

• $E_2 I_1 = E_1 I_1 - R_{12} I_1^2 - \alpha_1 N_1^3$: puissance électromagnétique fournie ($I_1 > 0$) par M_2 à R_I , ou reçue ($I_1 < 0$) par M_2 de R_I .

• $E_1 I_1 = P_{pv} - P_5$

- lorsque $P_{pv} - P_5 > R_{12} I_1^2 + \alpha_1 N_1^3$, il y a stockage d'énergie par R_I .

- lorsque $P_{pv} - P_5 < R_{12} I_1^2 + \alpha_1 N_1^3$, il y a restitution d'énergie par R_I .

VI.2. Sous-système S_{II}

Contrairement au générateur G_{pv} dont seul l'excédent d'énergie non consommée par M_5 est stocké par R_I , toute l'énergie produite par G_e transite par R_I .

Nous étudierons :

- les conditions dans lesquelles S_{II} doit être utilisé.
- les grandeurs sur lesquelles l'on peut agir par une régulation appropriée.
- le dispositif possible de régulation.
- l'énergie transmise par G_e à M_1 .
- le mouvement de R_I sous l'effet de l'énergie fournie par G_e .

6.2.1. Conditions d'utilisation de S_{II}

L'éolienne " Darrieus " ne démarre pas seule, quelle que soit la vitesse V du vent. Il lui faut donc un dispositif de démarrage. Dès que V devient supérieur à V_0 (vitesse de démarrage de l'éolienne), on excite M_3 (à sa valeur maximale $\Phi_{3 \max} = \text{cte}$), puis on excite M_4 qui fournit une fem $E_4 = N_4 \Phi_4$ pour démarrer M_3 . On prélève ainsi, pour démarrer M_3 , une fraction de l'énergie cinétique de la roue d'inertie.

Une fois le démarrage de M_3 effectué, on règle E_4 par rapport à E_3 de manière à rendre M_3 génératrice et M_4 moteur fournissant la puissance mécanique à R_I .

La transmission totale ou partielle de la puissance P_{Ge} de l'éolienne à R_I dépendra de l'écart $E_3 - E_4$ qu'il convient de donner à E_4 par rapport à E_3 . Par ce biais, on peut contrôler le couple résistant appliqué sur l'arbre éolien et donc la vitesse de rotation de G_e .

6.2.2. Grandeurs caractéristiques de S_{II}

La grandeur sur laquelle on peut agir est le paramètre de fonctionnement $\lambda = \frac{Q_{Ge}}{d(2V)}$ (défini (4.3.)), et, par voie de conséquence, le coefficient C_p (Fig.IV.3.).

En effet, excitons M_3 à une induction maximale $\Phi_{3 \text{ max}} = \text{cte.}$
 La fem E_3 de M_3 tournant à une vitesse N_3 est égale à :

$$E_3 = \Phi_{3 \text{ max}} N_3 \quad (6.7.)$$

Or, la vitesse de rotation N_3 est égale à :

$$N_3 = m N_{Ge} \quad (6.8.)$$

où :

. m : rapport de multiplication de M_m (Fig.I.1.) ($m \approx 19$)

. N_{Ge} : vitesse de G_e

$$N_{Ge} = \frac{\lambda}{\pi d} V \quad (6.9.)$$

. d : diamètre de l'éolienne

. V : vitesse du vent

E_3 devient :

$$E_3 = g_1 \lambda V \quad (6.10.)$$

où :

$$g_1 = \Phi_{3 \text{ max}} m / \pi d = \text{cte} \quad (6.11.)$$

La puissance P_{Ge} disponible sur l'arbre de l'éolienne est donnée par l'expression (4.13.).

Si η_m est le rendement de M_m , la transmission de la puissance à la roue R_I se fait par l'intermédiaire d'un courant de charge I_3 dans le variateur ($M_3 M_4$) :

$$I_3 = \frac{\eta_m P_{Ge}}{E_3} \quad (6.12.)$$

La valeur réglée de la fem E_4 qui permet d'obtenir ce courant est :

$$E_4 = E_3 - R_{34} I_3$$

A l'aide de (6.10.), (6.11.), (6.12.) et (4.13.), nous trouvons :

$$E_4 = g_1 \lambda V - g_2 \frac{C_p}{\lambda} V^2 \quad (6.13.)$$

où :

$$g_2 = \eta_m R_{34} \Lambda_{\text{air}} \frac{\pi d^3}{3m \Phi_{3 \text{ max}}} = \text{cte} \quad (6.14.)$$

La fem E_3 donnée par (6.10.) est une fonction linéaire de la vitesse V du vent. Elle dépend du paramètre de fonctionnement λ de G_e .

La fem E_4 qui est notre grandeur de réglage de la puissance (ou du couple résistant sur l'arbre de l'éolienne) transmise à R_I , nous apparaît comme une fonction de second degré en V . Mais cette relation (6.13.) purement mathématique ne peut servir telle quelle à la régulation de S_{II} .

En effet, la variation de V peut être très substantielle d'un instant à l'autre, alors que dans le même temps, N_{Ge} ne suivra pas cette variation (inertie de l'éolienne et des organes de transmission). Mais V est lié à N_{Ge} (c'est-à-dire N_3) par la relation (6.9.). C'est donc tout naturellement N_{Ge} , ou mieux, N_3 - et non V - qui sera le signal de réglage de E_4 .

6.2.3. Régulation de la puissance P_{Ge} et de la vitesse N_{Ge} de l'éolienne G_e

Cette opération consistera à faire correspondre la fem E_4 de valeur bien déterminée à une fem E_3 (ou N_3) donnée. Nous distinguerons pour cela, deux plages de vitesse de vent auxquelles nous ferons correspondre des valeurs différentes de C_p qui varie en fonction de λ suivant la Figure VI.3. :

• $V \in [V_0, V_n]$, $C_p = C_{p \text{ max}} \Rightarrow P_{Ge}$ est également maximale.

• $V \in]V_n, V_{\text{max}}]$, C_p décroît $\Rightarrow P_{Ge}$ décroît également.

V_n étant la vitesse nominale et V_{max} maximale au-delà de laquelle $P_{Ge} = 0$, car C_p est alors nul.

6.2.3.1. Régulation à C_p maximal ($V \leq V_n$)

Dans l'intervalle $[V_0, V_n]$, nous nous proposons d'extraire le maximum de puissance de G_e . Le coefficient de puissance C_p doit être maximal pour tout cet intervalle de vitesse de vent. Le point de fonctionnement de l'éolienne sur la courbe $C_p(\lambda)$, doit être constamment maintenu au sommet de la courbe de la Figure IV.3., tel que :

$$\lambda_0 \simeq 4,7 = \text{cte}$$

$$C_p(\lambda_0) \simeq 0,37 = \text{cte}$$

Pour $V \leq V_n$, E_3 et E_4 déterminés par (6.10.) et (6.13.), varient comme il est indiqué sur les courbes en trait continu 1 et 2 de la Figure VI.6,

6.2.3.2. Limitation, par la régulation, de P_{Ge} : ($V > V_n$)

Pour des raisons de tenue mécanique, on est amené à limiter la vitesse de rotation de G_e et par conséquent, la puissance maximale transmissible par G_e (auto-régulation de l'éolienne " DARRIEUS "). Ainsi, dès que $V > V_n$, nous limitons la vitesse N_{Ge} à une valeur constante $N_{Ge \text{ max}}$, entraînant la limitation de E_3 à une valeur constante.

Pour parvenir à ce résultat, nous devons faire varier E_4 suivant la courbe 2 en trait continu de la Figure VI.6. (pour $V > V_n$). En maintenant $N_{Ge \text{ max}}$ constant, λ décroît de 4,7 à environ 2 lorsque la vitesse V croît de V_n à V_{max} . Dans le même temps, le coefficient $C_p(\lambda)$ décroît de 0,37 à zéro. La puissance transmise par G_e suit la même variation que C_p .

La Figure VI.7. donne la variation de la puissance fournie par l'éolienne à M_3 dans les conditions de régulation 6.2.3.1. et 6.2.3.2. ci-dessus. Les valeurs de C_p qui ont servi à l'évaluation de cette courbe, ont été relevées graphiquement à partir de la courbe $C_p(\lambda)$ (Fig.IV.3.).

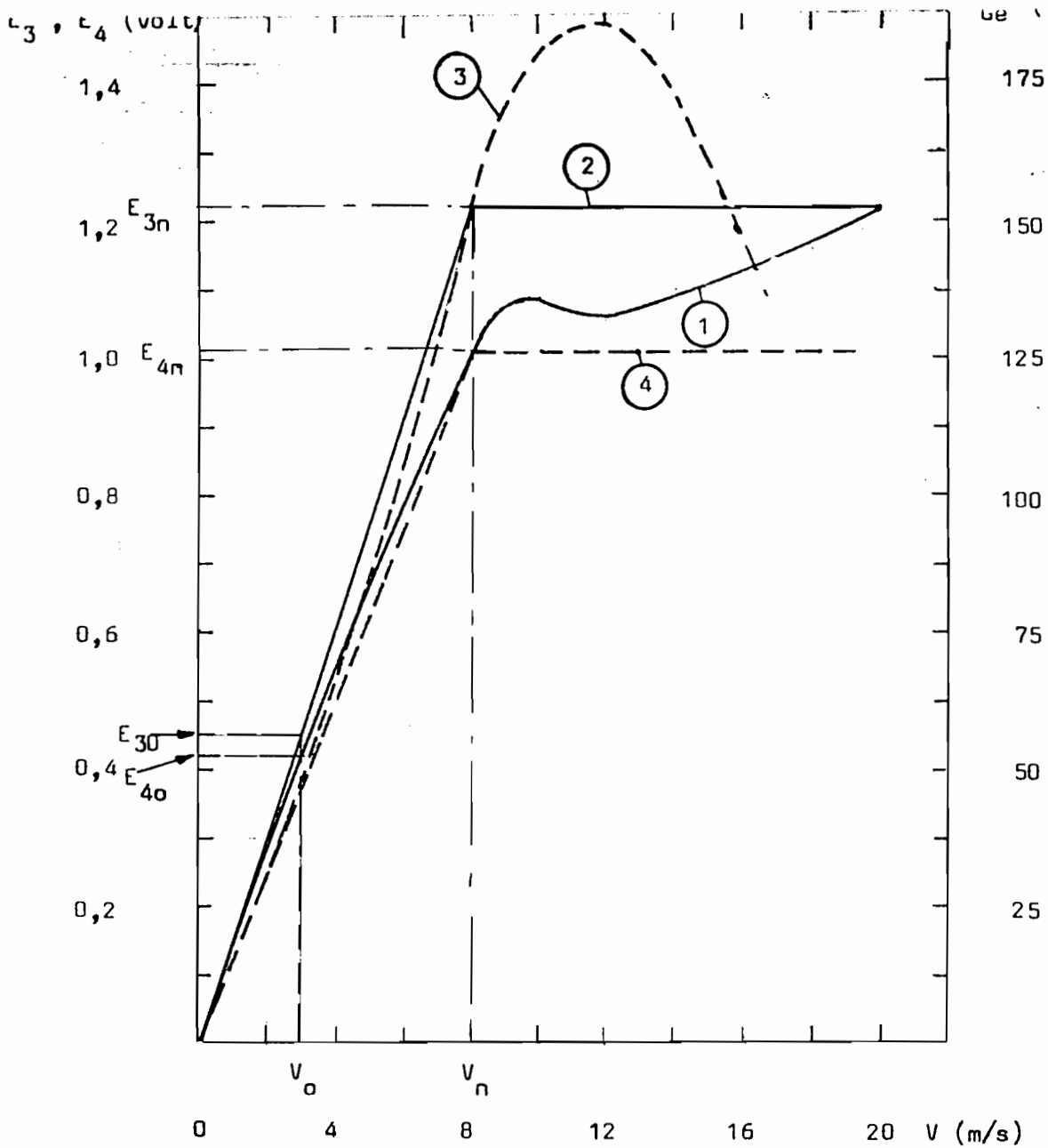


Fig.VI.6.: Variation de la fem E_3 et de la fcem E_4 en fonction de la vitesse V du vent dans les deux cas d'asservissement de S_{II} .

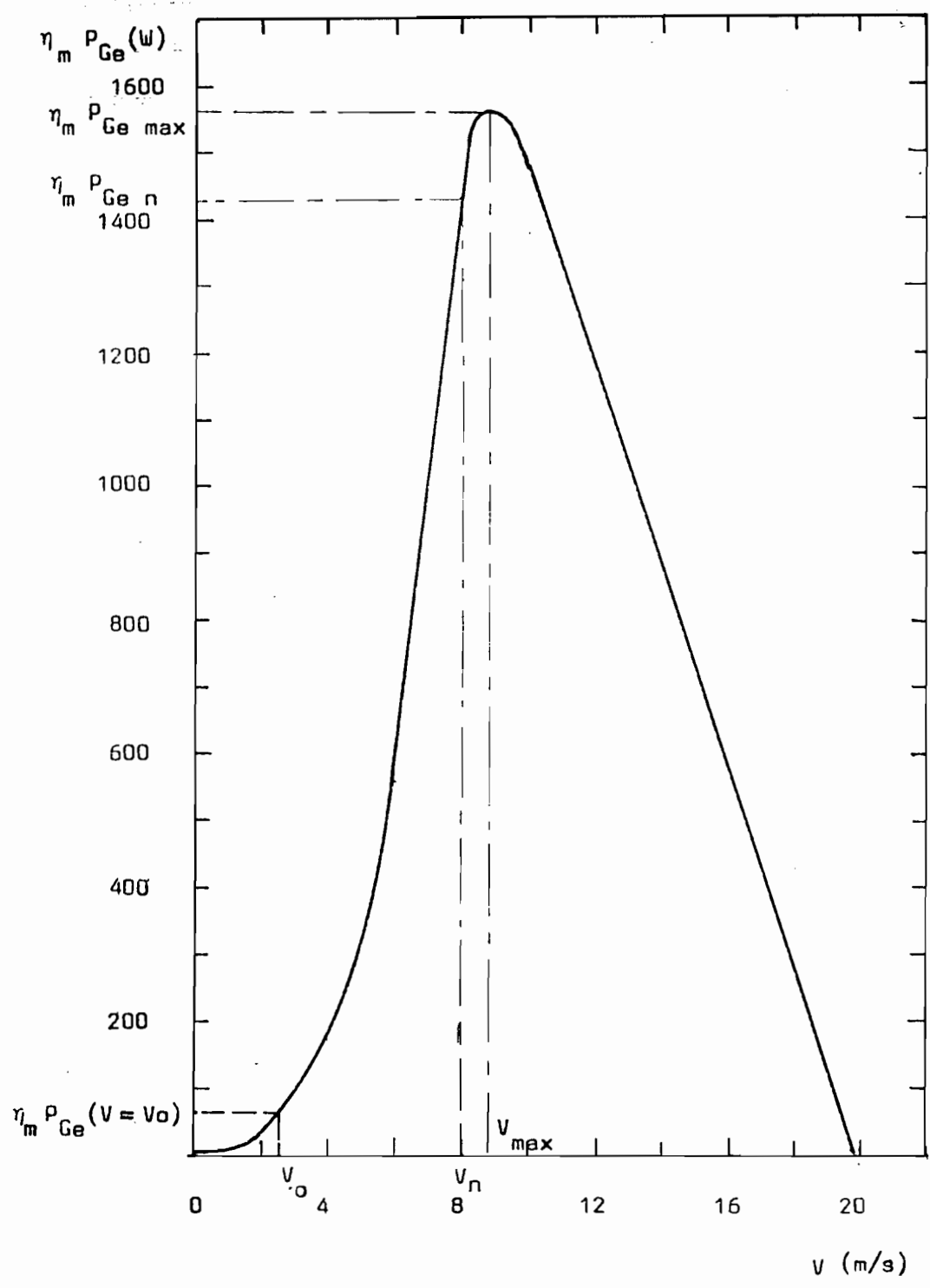


Fig.VI.7.: Variation de la puissance fournie par G_{pv} à M_3 en fonction de la vitesse du vent.

Remarque importante

=====

L'allure de la fonction $E_4(V)$ (courbe 1 - Fig.VI.6.), n'est pas simple. La mise en oeuvre d'un dispositif de régulation du flux Φ_1 , qui soit capable de distinguer la vitesse N_{Ge} à $V = 10$ m/s ou $V = 15$ m/s pour régler E_4 à une valeur adéquate, ne sera pas simple non plus.

Par contre, nous pouvons faire l'opération inverse en faisant varier linéairement $E_4(V)$ de V_0 à V_n :

$$E_4 = g'_1 \lambda_0 V, \text{ pour } V \in [V_0, V_n],$$

puis maintenir E_4 constant pour les valeurs de V supérieures à V_n :

$$E_{4 \text{ max}} = g'_1 \lambda_0 V_n, \text{ pour } V \in [V_n, V_{\text{max}}]$$

Dans ces deux domaines de vitesse V , la fem de M_3 sera :

$$E_3 = g'_2 \lambda_0 V + g_2 \frac{C_p(\lambda_0)}{\lambda_0} V^2, \text{ pour } V \in [V_0, V_n].$$

$$E_3 = g'_1 \lambda_0 V_n + g_2 \frac{C_p}{\lambda} V^2, \text{ pour } V \in [V_n, V_{\text{max}}].$$

La courbe 4 (Fig.VI.6. - traits interrompus) donne l'allure de $E_4(V)$ dans les deux domaines de variation de V .

Par contre, si $E_3(V)$ est calculable très exactement pour $V \leq V_n$, on ne peut le calculer au-delà de V_n . On peut néanmoins dire avec certitude que E_3 culmine à une valeur maximale comme il est indiqué sur la courbe 3 de la Figure VI.6. La vitesse de G_e qui est proportionnelle à E_3 , passe également par un maximum.

L'examen de la Figure VI.6. nous conduit également à la remarque suivante : en aucun cas, E_4 ne doit être supérieur à E_3 . S'il n'en était pas ainsi, M_4 fonctionnerait en génératrice et M_3 en moteur,

ce qui ferait de l'éolienne, un ventilateur, ce qui est à éviter. L'écart $E_3 - E_4$ doit donc rester toujours positif pour les valeurs de $V > V_0$.

6.2.3.3. Description du système de régulation de S_{II}

Il comprend :

- un régulateur R_{e2} (Fig.VI.5.) qui alimente les inducteurs des machines M_3 et M_4 dès que la vitesse V du vent atteint la valeur V_0 .
- un anémomètre A_n qui permet de mesurer V afin de faire démarrer l'éolienne.
- les capteurs C_{a4} et C_{a3} mesurant $N_4 \equiv N_2$ et N_3 pour permettre la régulation de E_4 par rapport à E_3 conformément au schéma décrit aux paragraphes 6.2.3.1. et 6.2.3.2.
- Lorsque $N_2 \geq N_{2 \max}$, C_{a4} envoie le signal d'une part à R_{e2} pour couper l'alimentation des inducteurs de M_3 et M_4 , et d'autre part à S_{e2} , qui commande le freinage (F) de l'éolienne. F ne se débloquent que quand N_4 atteindra une valeur inférieure à $N_{2 \max}$.
- Lorsque $N_2 \leq N_{2 \min}$, le dispositif de régulation fonctionne normalement de manière à stocker E_{Ge} comme nous l'avons déjà précisé précédemment. Mais pour $N_2 = 0$, le démarrage de l'éolienne devient impossible. Il faut nécessairement que $N_2 > 0$ pour effectuer le démarrage de G_e .

6.2.4. Mouvement de R_I sous l'effet de la puissance P_{Ge} de G_e

Selon le principe de conservation d'énergie, la vitesse Ω_2 de R_I varie sous l'effet de P_{Ge} suivant la loi :

$$\frac{1}{2} J \left\{ \Omega_2^2 - \left[\frac{\Omega_{20}}{1 + \frac{2\alpha_4' \Omega_{20} (t - t_0)}{J}} \right]^2 \right\} = E_4 I_3 (t - t_0)$$

où :

• Ω_2 et Ω_{20} sont les mêmes grandeurs définies au paragraphe 6.1.4.

$$\bullet \alpha'_4 = \alpha'_2 \simeq 7,8 \cdot 10^{-8} \text{ W (rad/s)}^{-3}$$

$$\bullet E_4 I_3 = \eta_m P_{Ge} - R_{34} I_3^2 - \alpha_3 N_3^3 : \text{ puissance transmise à la roue } R_I.$$

On peut également écrire $E_4 I_3$ en fonction de la vitesse V du vent en se servant des expressions (4.13.), (6.9.), (6.10.), (6.11.) et (6.12.):

$$E_4 I_3 = F C_p V^3 - L \left(\frac{C_p}{\lambda} V^2 \right)^2 - Q (\lambda V)^3$$

où :

$$\bullet F = \frac{1}{3} \eta_m \Lambda_{air} d^2 = \text{cte}$$

$$\bullet L = R_{34} \left(\frac{\eta_m \Lambda_{air} \pi d^3}{3 m \Phi_3} \right)^2 = \text{cte}$$

$$\bullet Q = \alpha_3 \left(\frac{m}{\pi d} \right)^3 = \text{cte}$$

VII - BILAN DES ENERGIES PRODUITES ET CONSOMMEES DE L'INSTALLATION

L'ensemble de notre système formé de deux générateurs (G_{pv} , G_e), des récepteurs (R) et de l'organe de stockage d'énergie (R_I) a été conçu pour assurer sa propre autonomie énergétique le plus complètement possible. Aussi, pour vérifier si ce but est atteint, nous allons soumettre le système aux conditions réelles ayant, à un moment quelconque, effectivement existé sur le site pour lequel les données nous ont servi de base à la présente étude.

Nous prendrons deux périodes particulières : l'une de faible insolation et de vent moyen également faible (les deux, nous l'avons vu, vont généralement de paire), l'autre de forte insolation et de vent moyen plus important. La première période se situe au mois d'Août, et la seconde au mois de Mars (c.f.Chap.II.).

Nous procéderons à l'évaluation, en fonction du temps, de :

- la puissance pv produite par G_{pv} ,
- la puissance éolienne produite par G_e ,
- la puissance consommée par R,
- la vitesse de R_I indiquant le niveau de l'énergie stockée.

Ceci nous permettra de voir si le dimensionnement de notre système a été bien optimisé et si nous ne risquons pas de produire trop, ou au contraire, pas assez d'énergie.

VII.1. Evaluation de l'énergie pv

Soit $\langle G \rangle$ la densité moyenne de l'énergie solaire globale rayonnée le $n^{i\text{ème}}$ jour de l'année sur un plan horizontal au niveau du sol. L'énergie moyenne interceptée par la surface A_{pv} du générateur G_{pv} et disponible sur l'arbre moteur M, s'écrit :

$$\langle E_{pv} \rangle = \langle \eta'_{pv} \rangle A_{pv} \langle G \rangle \quad (7.1.)$$

où :

$\langle \eta'_{pv} \rangle = \langle \eta_{Gpv} \rangle \langle \eta_M \rangle$: produit du rendement moyen de conversion de G_{pv} comprenant son système de diode de protection ($\approx 0,1 \times 0,98$), et du rendement moyen du moteur M ($\approx 0,80$).

Si H_0 est la durée totale d'insolation, la $n^{\text{ième}}$ journée, à la limite de l'atmosphère, la puissance moyenne correspondante recueillie sur l'arbre moteur M, est :

$$\langle P_{pv} \rangle = \frac{\langle E_{pv} \rangle}{H_0} \quad (7.2.)$$

En admettant une variation sinusoïdale du rayonnement solaire incident au niveau du sol (ce qui n'est pas souvent le cas en raison des troubles atmosphériques toujours possibles), on peut déterminer la puissance maximale correspondante :

$$P_{pv \max} = \frac{\pi}{2} \langle P_{pv} \rangle \quad (7.3.)$$

A l'aide des expressions (7.1.), (7.2.) et de l'équation de type d'Angström (2.1.), la puissance maximale fournie par le moteur M, s'écrit :

$$P_{pv \max} = \frac{\pi}{2} \langle \eta'_{pv} \rangle A_{pv} \frac{G_0}{H_0} \left(a + b \frac{H}{H_0} \right) \quad (7.4.)$$

Connaissant la durée effective d'insolation directe H, le $n^{\text{ième}}$ jour de l'année, on peut déterminer l'amplitude maximale de la demi-sinusoïde correspondant à la variation, en fonction du temps, de la puissance recueillie sur l'arbre M :

$$P_{pv} = P_{pv \max} \cos \theta_z \quad (7.5.)$$

où nous rappelons (voir Annexe I) que :

$$\cos \theta_z = \cos \varphi \cos \delta \cos \omega + \sin \varphi \sin \delta$$

avec :

- φ : latitude du site ($\approx 12,12^\circ$)
- δ : déclinaison du soleil par rapport au plan de l'équateur
- ω : angle horaire du soleil

Pour notre générateur pv, nous adopterons une position horizontale des

surfaces des modules pv. Car c'est dans cette position (ou dans une position très peu inclinée vers le sud, essentiellement pour faciliter l'écoulement des eaux de pluie de la surface des capteurs) que l'on reçoit le maximum d'énergie, à midi solaire, au mois d'Août. La référence particulière au mois d'Août, comme il avait déjà été signalé au Chapitre II., s'explique par sa faible durée d'insolation moyenne effective. Il convient par conséquent, de capter le maximum d'énergie pendant cette période. Le facteur $\cos \theta_z$ qui affecte la puissance rayonnée (rayonnement direct), est voisin de l'unité du 1er au 31 Août, période durant laquelle δ varie de $17,91^\circ$ à $8,10^\circ$ environ.

Cette orientation des modules du générateur G_{pv} n'affecte pas trop le bilan global annuel de l'énergie $\langle E_{pv} \rangle$.

Pour la journée particulière du 23.8.75, la variation de la puissance P_{pv} (supposée correspondre à la puissance optimale fournie par G_{pv}), en fonction du temps, est représentée sur la Figure VII.1., et l'énergie qui en résulte, est donnée par la surface foncée de cette même Figure.

VII.2. Evaluation de l'énergie éolienne

Rappelons que les relevés des vitesses de vent qui nous ont servi à cette étude, sont tri-horaires, c'est-à-dire effectués par intervalle régulier de trois heures (c.f.Chap.II.3.).

Pour être en mesure d'évaluer l'énergie éolienne en fonction du temps, nous ferons l'hypothèse suivante : entre deux relevés consécutifs, la variation de la vitesse V du vent est linéaire, comme il est indiqué sur la Figure VII.2.

A l'aide de la courbe donnant la puissance $\eta_m P_{Ge}(V)$ (Fig.VI.7.), et des diagrammes de répartition des vitesses en fonction du temps du type de la Figure VII.2., on peut être en mesure de déterminer une variation de $\eta_m P_{Ge}$ en fonction du temps. Par suite, on peut évaluer la puissance fournie par M_4 à la roue R_I . La variation de cette puissance au cours du temps, est donnée par la Figure VII.1. (rectangles blancs) pour le 23.8.75, d'après les relevés de vitesse de vent relatifs à ce jour.

VII.3. Répartition, au cours du temps, de la puissance consommée

La répartition de la puissance consommée peut se faire de différentes

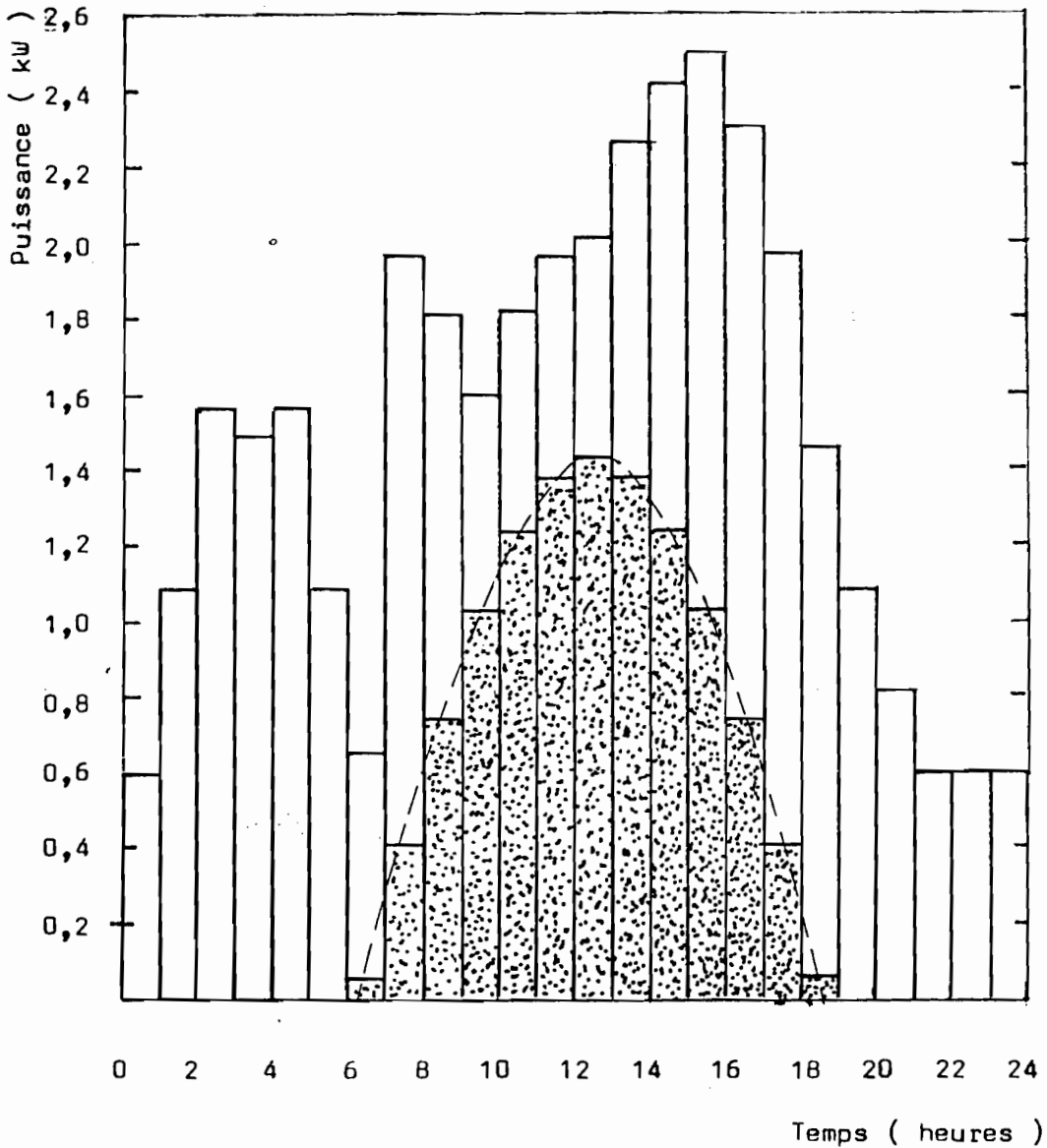


Fig.VII.1.: Puissance pv optimale fournie par le moteur M (limites de la surface en grisé) et Puissance éolienne fournie à la génératrice M_3 (limites des rectangles blancs), d'après les relevés de durée d'insolation et de vitesse du vent à N'DJAMENA le 23/8/75

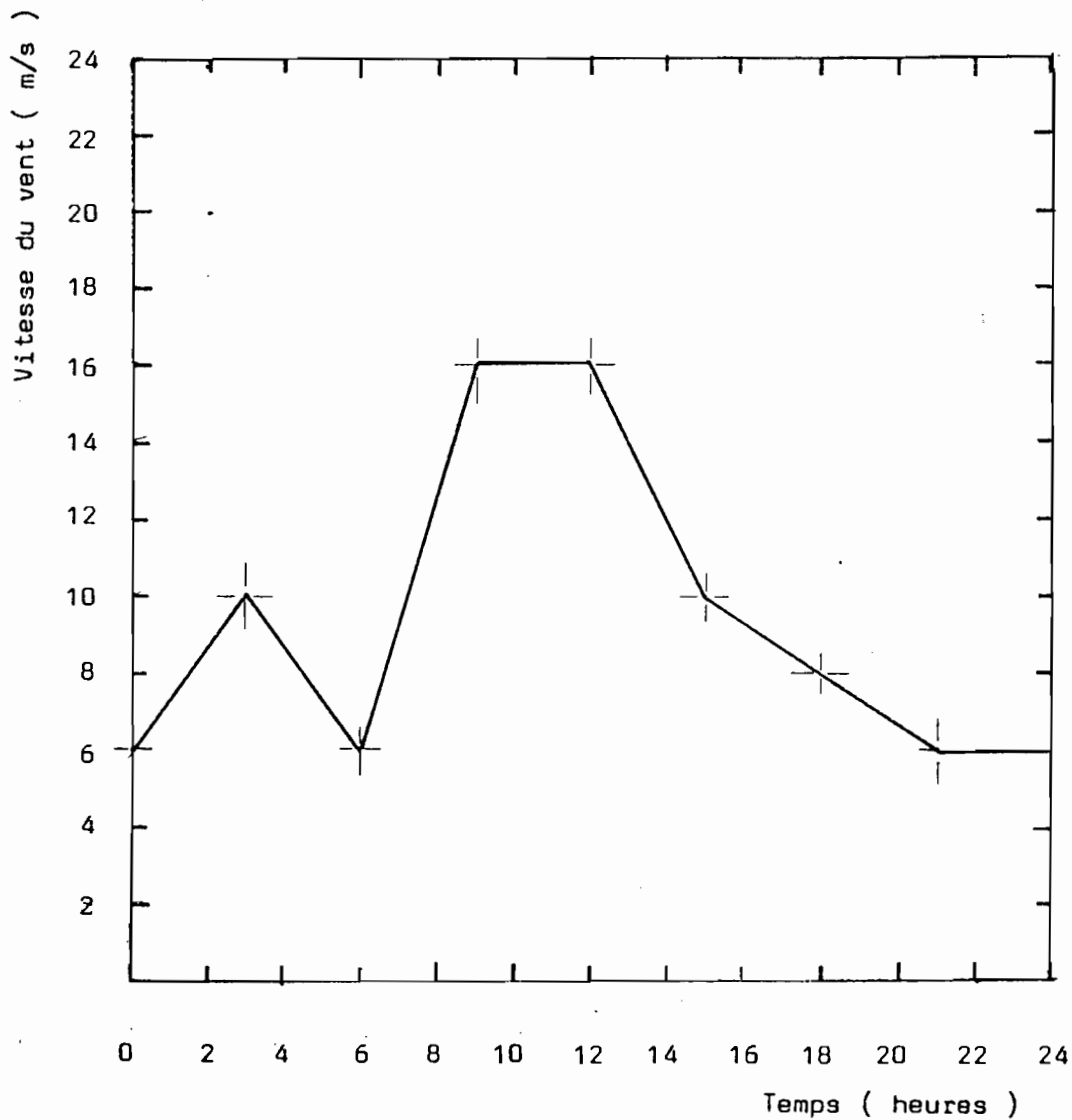


Fig.VII.2.: Variation de la vitesse du vent à l'aéroport de N'DJAMENA (Tchad): relevés du 23/8/75.

manières. Nous n'en étudierons que deux :

- a) Nous supposerons que la puissance consommée P_5 est répartie d'une manière fixe dans le temps, au moyen d'une horloge par exemple, qui déclenche la séquence marche-arrêt des récepteurs R, tous les jours, à des instants précis, suivant le Tableau VII.1. établi à partir de la variation de P_5 (Fig.VII.3) Mais comme l'énergie solaire, et surtout l'énergie éolienne sont, de par leur nature, aléatoires, et que la " pointe " ou le " creux " de l'énergie produite par G_{pv} et G_e ne coïncident pas nécessairement avec la " pointe " ou le " creux " de la puissance consommée par les récepteurs, ce mode de répartition de P_5 est rigide et s'adapte mal aux variations brusques des éclairagements ou des vitesses de vent.
- b) Il serait, par contre, plus souple de répartir P_5 suivant d'autres critères, en prenant par exemple en compte le caractère incompressible de certains besoins comme ceux qui ont été retenus dans le scénario du Chapitre III., en particulier:
- la consommation moyenne journalière de l'eau du village peut être garantie à l'aide d'un système de stockage dont la capacité couvre les besoins en eau de deux ou trois jours. Ainsi, son pompage se fera selon la disponibilité des énergies solaire et éolienne.
 - la consommation de certains appareils qui doivent fonctionner d'une manière continue (24 heures sur 24) comme le réfrigérateur, pourra être également garantie,
 - etc ...

Le critère qui nous semble le plus indiqué pour assurer cette "continuité de service " est la quantité d'énergie stockée par R_I , c'est-à-dire

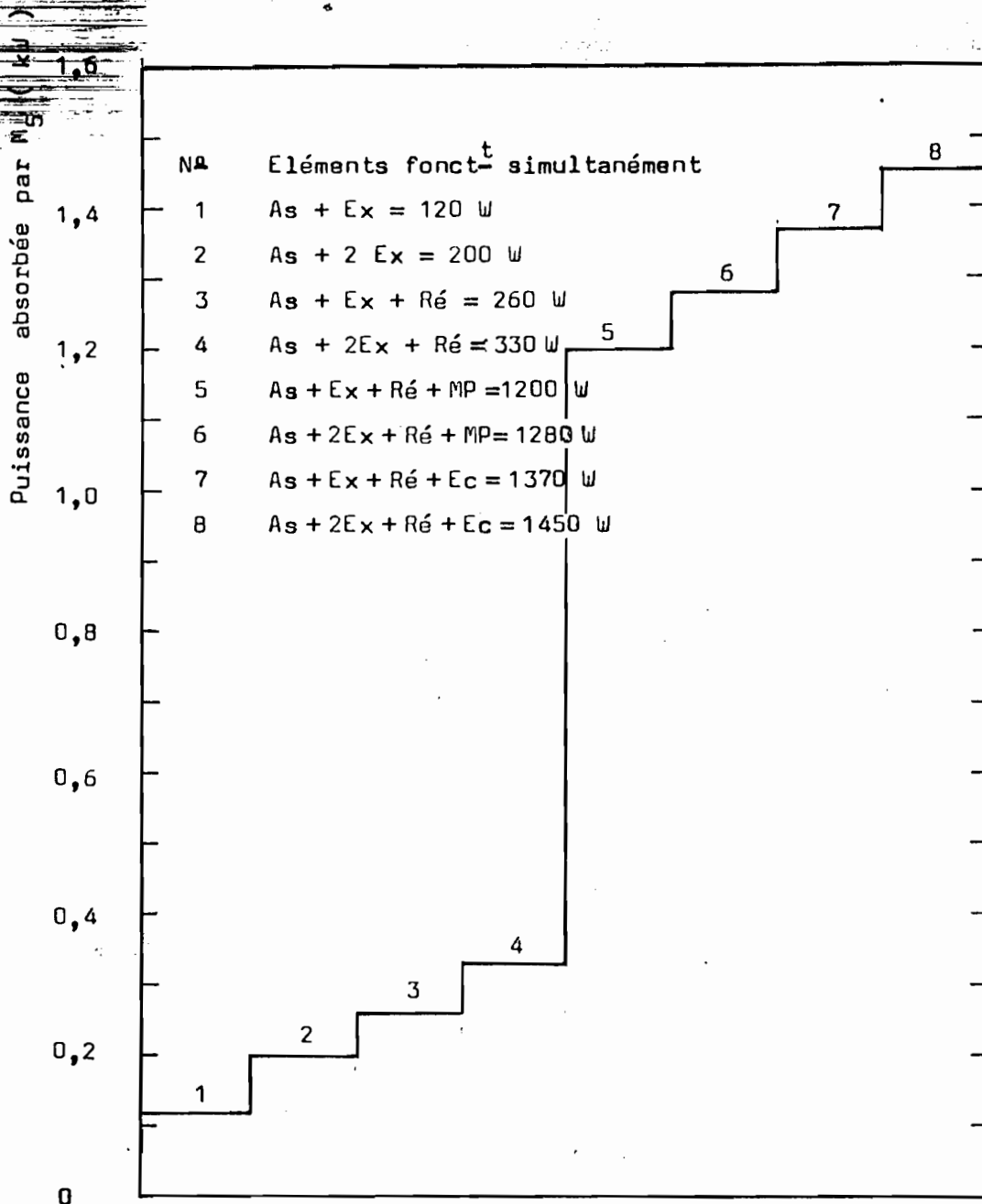


Fig.VII.3.: Niveaux de puissance absorbée par M_5 lorsque les récepteurs (R) et les dispositifs de commande et de régulation fonctionnent.

Puissance moyenne des récepteurs (R)

. Asservissement de la roue R_I (As)	40 W
. Excitation de chacun des variateurs (Ex)	70 W
. Réfrigérateur (Ré)	125 W
. Groupe moto-pompe (MP)	850 W
. Eclairage (Ec)	1000 W

Données d'énergies pv et éolienne du 23.8.75

Les deux cas, a) et b), de répartition de P_5 , et la vitesse N_2 de R_I correspondant aux deux cas.
 Les lettres A et P surmontant les chiffres signifient "Eclairage" et "Pompage".

Heure	P_{pv} sur arbre de M(W)	$\eta_m P_{Ge}$ sur arbre de M3(W)	P_{5a} (W)	N_{2a} (t/mn)	P_{5b} (W)	N_{2b} (t/r)
0	-	590	330	6160	330	6160
1	-	1080	"	6650	"	6650
2	-	1560	"	7410	"	7410
3	-	1480	"	8030	"	8030
4	-	1560	"	8650	"	8650
5	-	1080	"	8970	"	8970
6	60	590	"	9030	"	9030
7	410	1550	"	9760	1280 ^P	9280
8	740	1070	1280 ^P	9910	"	9460
9	1030	580	"	9980	"	9540
10	1240	580	"	10140	"	9720
11	1380	580	"	10360	"	9960
12	1430	580	"	10580	"	10200
13	1380	880	"	10910	"	10550
14	1240	1180	"	11280	"	10940
15	1030	1480	"	11660	"	11340
16	740	1550	330	> 12000	"	11630
17	410	1560	"	> 12000	"	11780
18	60	1400	1450 ^A	11850	1450 ^A	11640
19	-	1080	"	11560	"	11340
20	-	810	"	11150	"	10940
21	-	590	"	10650	"	10430
22	-	590	330	10670	1280 ^P	10000
23	-	590	"	10680	"	9560

la valeur de N_2 . Nous n'utiliserons certains récepteurs que dans les conditions suivantes :

- le système d'éclairage ne fonctionnera pendant 4 heures, au plus, à sa puissance maximale, le soir, que lorsque $N_2 \gg 8000$ t/mn. Nous préserverons donc ainsi une certaine quantité d'énergie stockée par R_I pour assurer l'autonomie totale de fonctionnement de certains appareils (réfrigérateur, dispositifs d'asservissement et de régulation du système) pendant une dizaine d'heures.
- le pompage ne débutera que lorsque $N_2 \gg 9000$ t/mn. Ainsi, nous utiliserons les " pointes " de puissance pv ou éolienne pour produire de l'eau qui sera stockée dans un réservoir. Nous atténuons de cette manière la vitesse de la roue qui se stabilisera, dans la mesure du possible, au voisinage de 9000 t/mn. Ce qui limite également les pertes MHD dans M_2 et M_4 .

VII.4. Variation de la vitesse de R_I au cours du temps

Les paramètres dont dépend la vitesse N_2 de R_I , en fonction du temps, sont donc : P_{pv} , P_5 , P_{Ge} et les différentes pertes (essentiellement les pertes Joule et MHD).

L'expression de la vitesse angulaire de R_I en fonction du temps, s'écrit d'après (6.6.) et (6.15.) :

$$Q_2 = \left\{ \left[\frac{Q_{20}}{1 + \frac{2 \alpha'_2 Q_{20} (t - t_0)}{J}} \right]^2 + \frac{2}{J} (E_2 I_1 + E_4 I_3) (t - t_0) \right\}^{1/2}$$

où nous rappelons les valeurs suivantes :

(7.6.)

$$E_2 I_1 = E_1 I_1 - R_{12} I_1^2 - \alpha_1 N_1^3$$

$$E_4 I_3 = E_3 I_3 - R_{34} I_3^2 - \alpha_3 N_3^3$$

avec :

- $E_1 I_1 = P_{pv} - P_5$: puissance stockée ou restituée par R_I .
- $E_3 I_3 = \eta_m P_{Ge}$: puissance sur l'arbre de M_3 fournie par l'éolienne.

Le tableau VII.1. donne, pour le 23.8.75, la variation de :

- la puissance $P_{pv}(t)$ sur l'arbre de M_1 .
- la puissance $\eta_m P_{Ge}(t)$ sur l'arbre de M_3 , que nous supposons égale à la puissance reçue par le moteur M_4 en négligeant $R_{34} I_3^2 + \alpha_3 N_3^3$ ($< 7\%$ de la puissance maximale $\eta_m P_{Ge}$).
- la puissance $P_5(t)$ absorbée par l'alternateur M_5 et répartie suivant les deux modes de répartition a) et b) en supposant exclu le fonctionnement simultané de l'éclairage et de la pompe (repérés dans cet ordre par les lettres A et P). P_5 est réparti suivant le diagramme de la Fig. VII.3.
- la vitesse $N_2(t)$ dans les deux cas a) et b) (Fig. VII.4.)

Faisons le bilan de l'énergie consommée et stockée par R_I dans les deux cas a) et b) : c'est la somme des énergies de la colonne P_{5a} ou P_{5b} du tableau VII.1. qu'on ajoute à l'énergie stockée par R_I entre les vitesses initiale (à 0 heure) et finale (à 24 heures).

On trouve environ 10 % de plus d'énergie dans le cas b) par rapport au cas a). De plus, nous ne notons pas une seule fois que N_2 dépasse les 12000 t/mn dans le cas b). Ceci signifie que nous avons capté la totalité des énergies pv et éolienne disponibles et récupérables, ce jour, par nos générateurs G_{pv} et G_e .

La répartition de $P_5(t)$ suivant le mode b), est donc la meilleure solution entre les deux cas envisagés.

Procédons aux mêmes évaluations que celles que nous avons données

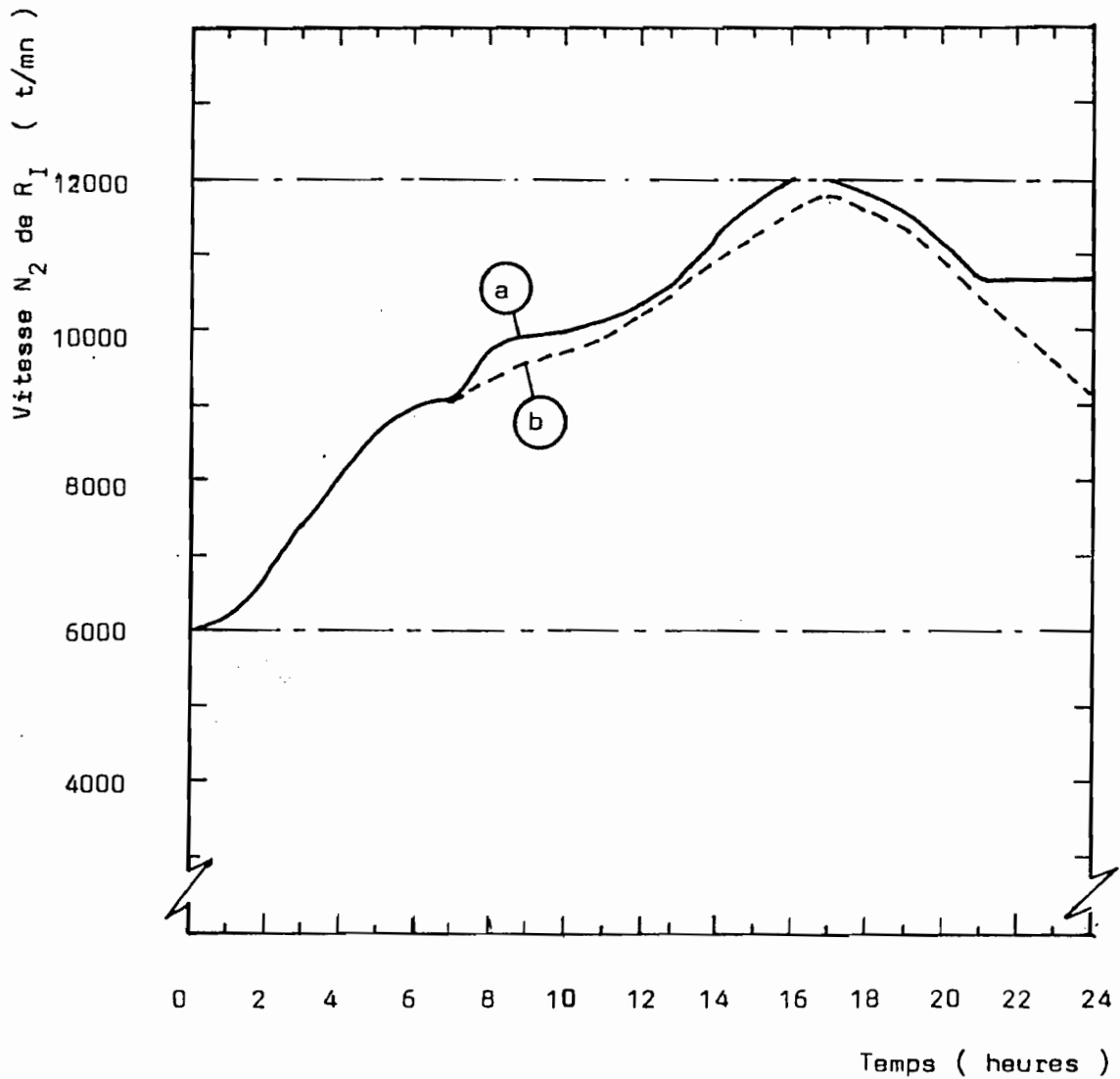


Fig.VII.4.: Variation de la vitesse de la roue d'inertie R_I en fonction du temps, d'après 2 modes de répartition de la puissance consommée par les récepteurs. Les autres paramètres étant l'énergie pv et l'énergie éolienne fournies par G_{pv} et G_e , calculées avec les données du 23/8/75

dans le tableau VII.1., mais uniquement dans le cas b) pour deux périodes bien déterminées :

- une première période allant du 23 au 31.8.75, correspondant à un niveau exceptionnellement faible d'insolation et de vitesse de vent (c.f. Tableau VII.2.), nous trouvons néanmoins que 65 % environ des besoins énergétiques moyens de l'installation définis au Chapitre III, sont satisfaits.
- une deuxième période, de longueur équivalente, allant du 23 au 31.3.70, correspondant aux énergies solaire et éolienne exceptionnellement abondantes (c.f. Tableau VII.3.), nous permet de couvrir environ 136 % des mêmes besoins moyens précédents.

Un calcul informatique plus élaboré peut être mis en oeuvre pour affiner ces résultats sur des périodes plus grandes (de plusieurs années par exemple). Mais nous pouvons d'ores et déjà prévoir que la sous-production ou au contraire la surproduction de l'énergie dans les conditions d'ensoleillement et de vent relatifs au site étudié, ne se produira que très rarement puisque ces deux situations extrêmes ne sont apparues qu'une seule fois chacune en cinq ans sur une durée totale de relevés s'étendant sur sept ans (1969 à 1976 inclus)

DATE	23	24	25	26	27	28	29	30	31
Durée d'insolation directe H (heures)	9,9	7,6	4,1	6,9	1,4	0,4	3,3	0,5	1,6
Instant de mesure de V	VITESSE DU VENT (m/s)								
0 heure	6	6	0	4	0	0	0	0	0
3	10	8	0	0	0	0	4	8	0
6	6	0	4	4	6	0	6	0	0
9	16	0	8	14	10	8	10	0	0
12	16	8	8	16	8	8	14	12	0
15	10	0	0	12	6	0	0	4	0
18	8	0	0	10	0	2	0	0	0
21	6	0	0	0	8	0	0	0	0

TABLEAU VII.3.

DONNEES DU 23 AU 31.3.70

DATE	23	24	25	26	27	28	29	30	31
Durée d'insolation directe H (heures)	9,3	10,5	10,7	10,9	10,9	10,5	10,6	10,8	10,6
Instant de mesure de V	VITESSE DU VENT (m/s)								
0 heure	16	10	10	8	8	6	6	4	6
3	14	12	10	2	8	6	4	0	4
6	12	8	8	6	6	6	6	0	2
9	12	8	8	16	14	12	10	10	10
12	14	6	6	10	12	6	8	16	14
15	12	10	10	10	14	6	6	10	12
18	12	8	8	6	10	6	8	6	6
21	10	8	8	6	6	6	8	8	8

VIII - CONCLUSION

Les éléments, pour la plupart de très grande fiabilité, que nous avons mis en oeuvre dans le système de conversion d'énergie que nous venons d'étudier sont :

- des machines électriques classiques : le moteur M, l'alternateur M_5 et l'éolienne G_e . Leur technologie est déjà éprouvée. Ils sont, de plus, bon marché, soit parce qu'ils sont fabriqués en grande série, soit parce que leur coût de fabrication est peu élevé.
- des machines électriques relativement nouvelles : les machines homopolaires $M_{1,2,3,4}$. La simplicité des formes des pièces qui constituent ces machines, permet de penser que leur coût de fabrication ne devrait pas être trop élevé. Leur étude a été faite sous différents aspects au Laboratoire de Génie Electrique des Universités de Paris VI et XI. Il reste que les calculs théoriques que nous avons faits doivent être confrontés aux résultats expérimentaux.
- une roue d'inertie R_I dont la technologie, avec l'apparition de nouveaux matériaux, évolue très rapidement. Le prix d'une roue (de capacité équivalente à celle qui est calculée dans la présente étude) sera, selon le principal constructeur français (SNIAS) fonction du nombre d'unités en chantier. Autrement dit, le coût de fabrication diminuera si les roues sont produites en grande quantité.
- un générateur pv qui est le seul élément le plus prohibitif du système, dans l'état actuel des prix. Mais ceux-ci, liés aux procédés de fabrication des cellules solaires, baissent constamment, et l'on prévoit une part non négligeable de production électrique d'origine pv dans les décennies à venir, lorsque le prix de l'énergie pv sera comparable à celui de l'énergie produite à partir d'autres sources.

Le système de conversion d'énergie, dans son ensemble, avec ses dispositifs de régulation, se caractérise par sa robustesse. Aussi, pourra-t-il constituer une solution économique au problème d'approvisionnement en énergie des habitats isolés, ou même, aux problèmes de développement rural en général.

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

- (1) J.A.DUFFIE - W.A.BECKMAN : " Solar Energy Thermal Processes "(Publication: John Wiley and Sons).
- (2) E.ABOELSALAM : " The relation between solar radiation and hours of bright sunshine for the Middle-East Region " (Publication:Revue Internationale d'Héliotechnique - COMPLES - 1er semestre 1979).
- (3) P.SOUTH - R.RANGI : " Rendement et rentabilité de l'éolienne à axe vertical " (Rapport PNM 73.303 F, du Conseil National de Recherches du Canada - Octobre 1973).
- (4) R.J.TEMPLIN : " Aerodynamic performance theory for the NRC Vertical Axis Wind Turbine " (Rapport LTR - LA.160 - June 1974).
- (5) A.J.MLAVSKY : " Cellules solaires à partir de rubans de Si à faible prix de revient - Etat des Techniques et Evolution " (Publication : Revue de l'Energie No 313 - Mars 1979 - pg 238 à 245).
- (6) A.BRAUSTEIN, J.BANY and J.APPELBAUM : " Determination of solar cell equation parameters from empirical data " (Publication : Energy conversion vol.17, pg 1-6 - Pergamon Press 1977).
- (7) G.J.NAAEIJER : " Problèmes d'adaptation des photopiles en vue d'applications terrestres " (Publication : Acta Electronica du 20.2.77 pg 165 à 185).
- (8) E.VIDDONI : " Etude théorique et expérimentale d'une génératrice à courant continu adaptable à un convertisseur d'énergie éolienne " (Mémoire du CNAM - Paris 1977).
- (9) G.M.BRAGG : " Wind power " pg 1245 to 1265 (Publication : Solar energy conversion edited by A.E.DIXON and J.O.LESLIE - Pergamon Press).
- (10) R.GOETHALS : " L'énergie éolienne " (Publication : La Recherche No 109 vol.11 - Mars 1980).
- (11) J.C.Mc VEIGH : " Wind Energy Potential " pg 154 to 164 (Publication : Sun Power - Pergamon Press).
- (12) J.R.ROGER : " Theory of direct coupling between dc motors and photovoltaic solar array " (Publication : Solar Energy - vol. 23 pg 193-198).
- (13) J.POULAIN : " Contribution à l'étude des machines homopolaires à courant continu " (Thèse Paris - Juin 1962).

- (14) J.P.CHABRERIE ; " Contribution à l'étude des machines homopolaire à inducteur supraconducteur. Etude des écoulements magnétohydrodynamiques turbulents liés à l'utilisation de métaux liquides pour la réalisation des contacts électriques glissants " (Thèse Paris - 1973).
- (15) R.F.POST and S.F.POST : " Flywheels " (Publication : Scientific American vol.229 No 6 pg 17 to 23).
- (16) R.BONNEFILLE : " Cours d'Electrotechnique 2ème cycle " (pg : M 172 à M 174 - 1965/1966).
- (17) " Hand book of CHEMISTRY and PHYSICS " (Forty Fourth Edition - 1962/63 Chemical RUBBER PUBLISHING pg 2210).
- (18) TIMOSHENKO and GOODIER : " Theory of Elasticity " [Publication : Mc GRAW-HILL , Third Edition pg 80 - 83]

A N N E X E 1

Formules permettant de calculer l'énergie solaire [1] :

- 1°) La corrélation entre l'énergie solaire globale G rayonnée sur un plan (P) horizontal situé à la surface de la terre et la durée effective H d'insolation directe s'exprime par la relation de type d'Angström

$$\frac{G}{G_0} = a + b \frac{H}{H_0} \quad (\text{AI.1.})$$

où a et b sont les constantes caractéristiques du site pour une période bien déterminée. Cette période peut correspondre au mois, au trimestre, à l'année.

G_0 est le flux d'énergie solaire globale, pendant une période donnée sur un plan parallèle au plan (P) précédent, situé à la même latitude que (P) et à la limite de l'atmosphère terrestre. H_0 est la durée des journées correspondant à la période considérée.

- 2°) Pour une journée n quelconque de l'année, le flux d'énergie globale hors-atmosphère G_{on} s'exprime par la relation :

$$G_{on} = \frac{24}{\pi} I_{sc} C_n \left(\cos\varphi \cos\delta_n \sin\omega_n + \frac{2\omega_n}{360} \sin\varphi \sin\delta_n \right) \quad (\text{AI.2.})$$

où I_{sc} est la constante solaire à la limite de l'atmosphère égale à $1,353 \text{ KW.m}^{-2}$

C_n est l'excentricité de l'orbite terrestre sur la distance terre-soleil. Elle corrige la quantité d'énergie reçue hors-atmosphère.

Son expression est :

$$C_n = 1 + 0,033 \cos\left(\frac{360 n}{365}\right) \quad (\text{AI.3.})$$

φ est la latitude du site étudié ; elle est constante et égale à $12^{\circ}07'$ pour NDjaména.

δ_n est la déclinaison du soleil c'est-à-dire la position angulaire du soleil par rapport au plan de l'équateur terrestre. Elle est variable en cours d'année et s'exprime par la relation approchée de Cooper :

$$\delta_n = 23,45^{\circ} \sin\left(\frac{360(284 + n)}{365}\right)$$

A l'instant des équinoxes de printemps et d'automne, la déclinaison est nulle (20 Mars et 23 Septembre pour l'hémisphère Nord). A l'instant des solstices d'été et d'hiver, δ est égal à $+ 23,45^\circ$ et $- 23,45^\circ$ respectivement (21 Juin et 21 Décembre pour l'hémisphère Nord).

ω_n est l'angle horaire au lever du soleil. Pour une période de 24 heures, cet angle correspond à 360° . On convient de prendre son origine zéro à l'instant correspondant à midi solaire et il est compté positivement le matin et négativement l'après-midi.

3°) La connaissance de φ et δ_n permet de déduire la valeur de ω_n par la relation :

$$\omega_n = \text{Arccos}(-\text{tg}\varphi\text{tg}\delta_n) \quad (\text{AI.5.})$$

4°) La durée totale d'insolation, pour la $n^{\text{ième}}$ journée de l'année, à la limite de l'atmosphère exprimée en heures est :

$$H_{0n} = \frac{2\omega_n}{15} \quad (\text{AI.6.})$$

5°) L'angle zénithal θ_z du soleil :

On appelle l'angle zénithal du soleil, l'angle formé par la droite qui joint le centre du soleil au point d'observation et par la normale au plan horizontal d'observation. Il est donc variable dans le temps et s'écrit :

$$\cos\theta_z = \cos\varphi\cos\delta_n\cos\omega + \sin\varphi\sin\delta_n \quad (\text{AI.7.})$$

où $\omega = 15(12 - t)$ est l'angle horaire (en $^\circ$) en fonction du temps t (heures).

Pour $t = 12$ heures, $\omega = 0^\circ$.

A N N E X E I I

CARACTERISTIQUES DES MODULES pV RTC DE TYPE BP x 47 B 20

Selon le constructeur, le module BP x 47 B 20 est constitué de 20 cellules solaires au silicium d'un diamètre de 100 mm montées en série. Ces cellules et leurs connexions électriques sont moulées dans une résine transparente prise entre deux plaques de verre. Cette disposition assure surtout une bonne protection des cellules contre les agents corrosifs de l'atmosphère (vent de sable, brouillard salin, etc...).

1°) Les caractéristiques électriques données par le constructeur, pour un flux lumineux φ_L de 1 Kw.m^{-2} sont les suivantes :

Température de la jonction	T_j	(C)	0	25	60
Puissance optimale	p_{op}	(W)	20,6	18,3	15,5
Tension optimale	v_{op}	(V)	10,6	9,1	8,4
Courant optimal	i_{op}	(A)	1,95	2,01	1,84
Tension en circuit ouvert	v_o	(V)	12,7	11,6	10,2
Courant de court circuit	i_{cc}	(A)	2,07	2,1	2,14

2°) La température de la jonction T_j est, avec la résine utilisée pour l'encapsulation des cellules, toujours supérieure à la température ambiante ($T_{amb.}$). Selon le constructeur, les caractéristiques ci-dessus des modules sont données à :

$$T_j - T_{amb.} = 15 \text{ C}$$

3°) Les courbes de la caractéristique courant-tension ($i-v$) du module pour un éclairage φ_L sont données à différentes températures (Fig. AII.1.) ; puis pour une température donnée à différents éclairages (Fig. AII.2). On relève pour cette dernière courbe les valeurs suivantes à : $T_j = 60^\circ\text{C}$

Eclairage φ_L (Kw/m^2)	:	0,5	0,8	1,0
Tension optimale (V)	:	7,0	7,3	8,4
Courant optimal (A)	:	1,03	1,58	1,84

4°) A partir de ces données, il est possible d'écrire l'équation approchée du module pv. Cette équation nous permettra de décrire la caractéristique courant-tension ($I-U$) du générateur G_{pv} et d'étudier le comportement du moteur M qui lui sera couplé électriquement.

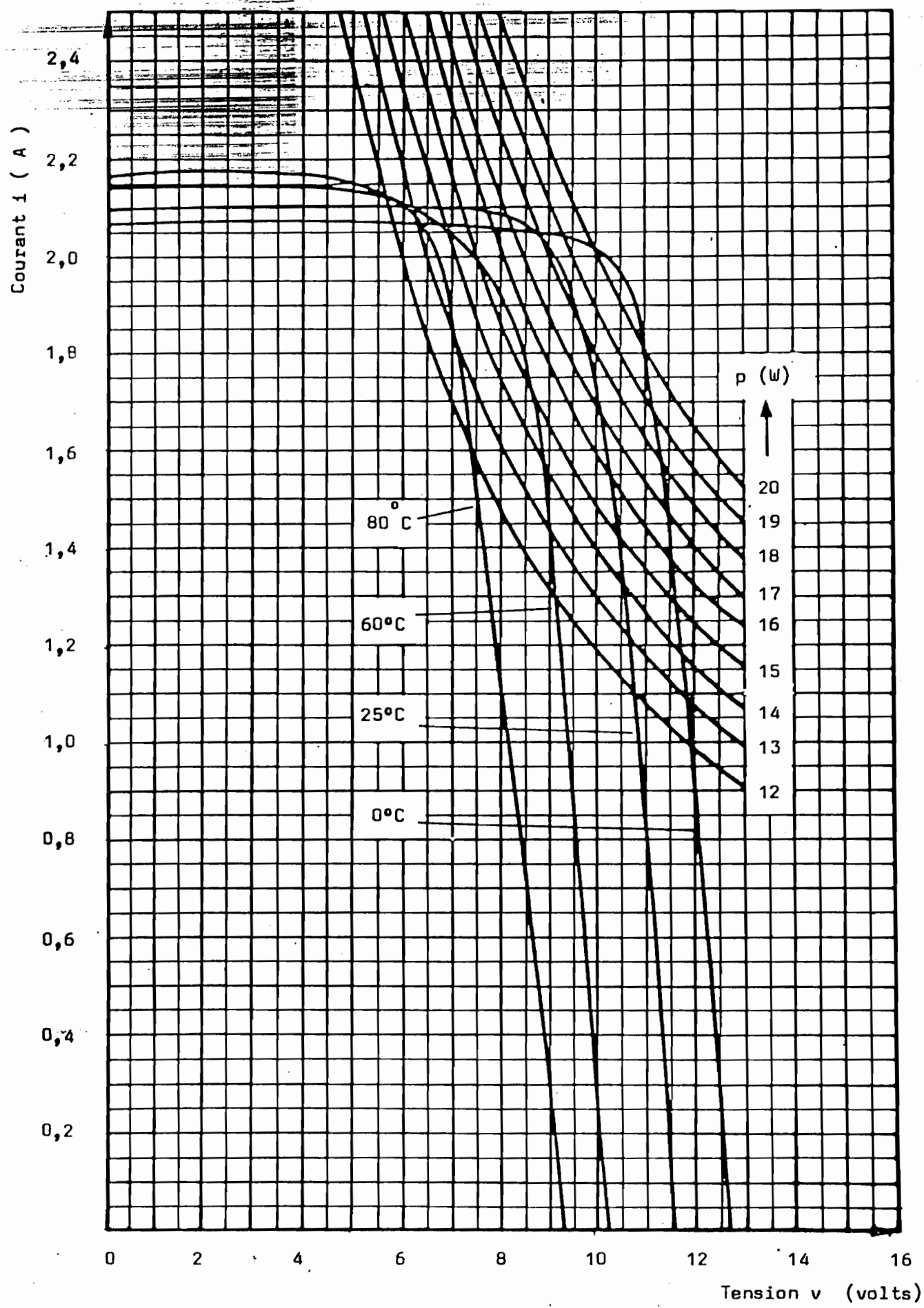


Fig.AII.1.: Caractéristique courant-tension d'un module pv (RTC-type BPX47B20) à différentes températures et sous un éclairement de 1Kw.m^{-2}

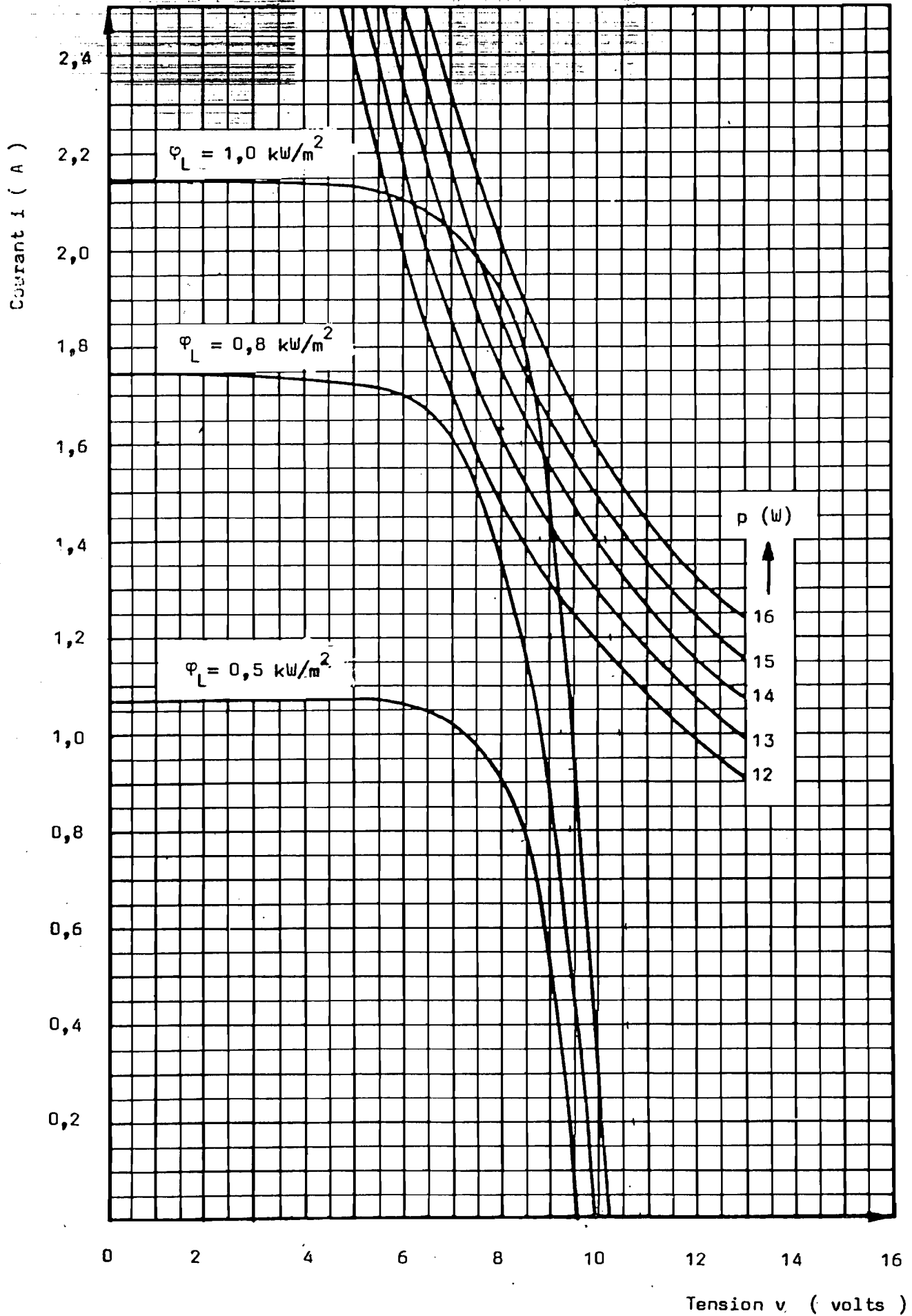


Fig.AII.2.: Caractéristique courant-tension d'un module pv (RTC-type BPX47B20) à la température $T_j = 60^\circ\text{C}$ et sous différents éclairagements.

L'équation d'une cellule pv individuelle s'écrit [6] :

$$v' = \frac{1}{\beta} \ln \left(\frac{i_{ph} - (1 + r'_s/r_{sh}) i - v'/r_{sh}}{i_s} + 1 \right) - r'_s i \quad (\text{AII.1.})$$

où v' : tension aux bornes de la cellule (en volts)

$$\beta = \frac{q}{Ak_B T}$$

avec q : la charge élémentaire de l'électron ($1,6 \cdot 10^{-19}$ C)

k_B : constante de Boltzmann ($1,38 \cdot 10^{-23}$ J.K⁻¹)

T : température de la jonction (en K)

A : facteur d'idéalité de la cellule (égal à l'unité dans le cas d'une diode idéale et compris entre 1 et 2 pour les cellules réelles). En général on le prend égal à 1.

i_{ph} : photo-courant circulant dans la cellule. Il est proportionnel à l'éclairement φ_L (en A (Kw/m²)⁻¹).

r'_s : résistance série de la cellule (en Ω)

r_{sh} : résistance shunt ou parallèle de la cellule (en Ω)

i : courant fourni par la cellule au circuit extérieur (en A)

i_s : courant inverse de saturation de la cellule (en A)

D'une manière générale les relations suivantes sont vérifiées [7] :

$$r'_s/r_{sh} \ll 1$$

$$v'/r_{sh} \ll i$$

Par conséquent l'équation (AII.1.) s'écrit plus simplement :

$$v' = \frac{1}{\beta} \ln \left(\frac{i_{ph} - i}{i_s} + 1 \right) - r'_s i \quad (\text{AII.2.})$$

La figure AII.3. donne le circuit équivalent de la cellule pv : elle se présente comme un générateur g' en parallèle avec une résistance r_{sh} et une diode d et ensuite en série avec une résistance r'_s .

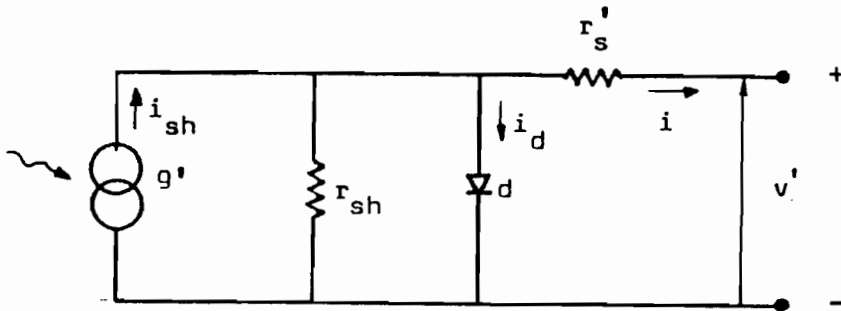


Fig.AII.3.: Circuit équivalent d'une cellule solaire.

5°) A l'aide de l'équation (AII.2.) l'équation du module comprenant 20 cellules en série s'écrit :

$$v = \frac{20}{\beta} \ln \left(\frac{i_{ph} - i}{i_s} + 1 \right) - r_s i \quad (\text{AII.3.})$$

avec $r_s = 20 r'_s$

a) Des courbes expérimentales (fig. AII.1. et 2.), on tire le courant de court circuit i_{cc} du module pv pour $v = 0$:

$$i_{cc} = i_{ph} \approx k_L \phi_L \quad (\text{AII.4.})$$

où la constante k_L est égale environ à 2,14 d'après la figure AII.2.

b) Le courant inverse de saturation est pratiquement obtenu avec les valeurs de $v_g(i = 0)$ et i_{ph} pour le plus faible éclairement indiqué sur la Fig.AII.2. ($0,5 \text{ kW/m}^2$). On trouve d'après l'équation (AII.3.) :

$$i_s = \frac{i_{ph}}{\frac{\exp(\beta v (i=0))}{20} - 1} \quad (\text{AII.5.})$$

On trouve $i_s \approx 7.10^{-8} \text{ A}$

c) La résistance moyenne r_s du module est d'environ $0,5 \Omega$.