

ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT *ELECTROTECHNIQUE*

PROJET DE FIN D'ÉTUDES

SUJET

ÉTUDE ET RÉALISATION
D'UN

CONVERTISSEUR
DC/AC de 1KVA

Proposé par :

A. MEFTAH

Étudié par :

C. LARBES
S. DJEBLOUN

Dirigé par :

B. HEMICI
. MAAZI

PROMOTION
Janvier 85

Remerciements

Nous tenons à remercier tous ceux qui ont participé à notre formation

Nos remerciements vont également à monsieur BELHAMEL ainsi qu'à monsieur MEFTAH pour avoir proposé cette étude et aussi à monsieur HEMICI et monsieur MAAZI pour l'aide et l'assistance qu'ils nous ont apporté.

Nous tenons aussi à remercier Chenaoua kamel et Mameri mouloud pour l'aide qu'ils n'ont pas hésité à nous apporté.

Enfin que tout le personnel de la station de Bouzareah trouve ici l'expression de notre profonde sympathie

DEDICACES

A mes parents

A ma femme

A mes freres

A tous mes amis

Je dédie cette étude

S. DJEBLOUN

DEDICACES

A mes parents

A mes freres et soeurs

Aux familles : HASSAINE, DJEBLOUN, NAKKOUR

A tous mes amis

je dedie cette etude

C. LARBES

Sommaire

1^{ere} Partie

	Pages
I - Introduction	1
II - Les Différents modes de Conversion de L'énergie solaire	3
1- Conversion photothermique	3
2- Conversion thermo-ionique	6
3- Conversion photobiologique	7
4- Conversion chimique	7
5- Transformations thermodynamiques	8
5.1 - thermoelastique	8
5.2 - thermoélectrique	8
6- Conversion photoélectrique	9
6.1- directe	9
6.2- indirecte	10
III - Conversion photovoltaïque	11
1- Principe des photopiles	11
2- Technologie des cellules solaires	16
3- Accumulateurs	23
3.1 - principe de fonctionnement des batteries au Plomb	25
3.2 - Facteurs caractéristiques	27
3.3 - Utilisations	28
4- Régulateurs	32
5- Onduleurs	32

2^{eme} Partie

	34
I - Etude de quelques principes de Convertisseurs DC/AC	34
1. Onduleurs a frequence variable a commutation forcée	34
2. Onduleurs a frequence fixe a commutation forcée	35
2.1 Montage a 2 thyristors en parallele	35
2.2 Montage a 2 thyristors en Serie	37
2.3 Montage a 4 thyristors	37
II - Etude theorique de l'onduleur	41
1. Fonctionnement	43
2. Amelioration du montage	46
III - Realisation pratique	49
1. Etage de puissance	49
2. Commande electronique	53
3. Amplificateur de courant	63
4. Tests pratique	69
IV - Dimensionnement d'une centrale electro-solaire	73
V - Conclusion.	81

Bibliographie.

Avant - Propos

En entamant notre travail, nous nous sommes aperçus du besoin de préciser quelques notions sur l'énergie solaire afin de situer la conversion photovoltaïque dans le domaine du solaire et justifier par la suite l'emploi du convertisseur continu-alternatif. C'est ce qu'on a fait dans la première partie.

Dans la seconde partie, on a fait une étude théorique et pratique sur l'ONDULEUR réalisé.

Nous espérons, que notre étude, sera à la hauteur de nos souhaits et constituera un document de travail.

Introduction

Pendant des milliers d'années l'homme utilisa l'énergie solaire directement ou indirectement.

Progressivement, le captage des chutes d'eau, l'extraction du charbon et l'apparition du pétrole a rendu cette dernière négligeable.

Ces derniers temps, le monde a vu une grande expansion de la consommation énergétique avec le développement industriel.

Mais cette consommation d'énergie à bon marché, a pris fin en 1973 avec l'augmentation du prix de pétrole, et l'apparition de la crise mondiale d'énergie.

Depuis, le monde a pris conscience du besoin pressent d'aménager de nouvelles sources d'énergie ; l'énergie solaire étant l'une d'elles, devenant ainsi à l'ordre du jour.

L'énergie solaire présente beaucoup d'avantages qui la distinguent des autres sources traditionnelles ; elle est non polluante, répartie, économique et inépuisable.

Pour l'instant la technologie solaire est en voie de développement, son but est de parvenir à l'utilisation des énergies secondaires (thermique, électrique et mécanique) produites à partir de l'énergie solaire sous une forme

au moins aussi commode, aussi confortable et au moindre prix .

Pour donner quelques lumières sur les différentes techniques d'utilisation de l'énergie solaire, on va voir quelques types de ces conversions .

II Les Différents modes de Conversion de l'énergie Solaire

Le but essentiel de cette partie est de faire un tour d'horizon sur les différentes conversions de l'énergie solaire même si un nombre parmi elles n'est qu'au stade du laboratoire. Afin d'avoir une idée générale et claire sur ce nouveau domaine qui est le solaire, on va essayer d'examiner les voies d'obtention des énergies secondaires à partir de l'énergie solaire.

Nous développerons surtout la voie de conversion photothermique vu son ancienneté, ses diverses applications et son développement. Nous dirons ensuite quelques mots sur les modes de conversion thermo-ionique, photobiologique, chimique, thermodynamique à titre d'information.

Enfin un chapitre sera consacré à la conversion photovoltaïque qui fait l'objet de notre étude.

1_ Conversion photothermique

C'est la plus simple des conversions, elle consiste à transformer l'énergie solaire directement en chaleur.

Le principe de la conversion photothermique est basé sur la connaissance et l'utilisation habile des phénomènes d'échange thermique entre les corps.

Les échanges de chaleur peuvent se faire par conduction, convection, ou rayonnement.

- La Conduction : qui a lieu sans déplacement de matière, est régie par le coefficient de conductibilité thermique d'un Corps .

- La convection : est liée à un mouvement de matière .

- Le rayonnement : tout corps plus chaud que son environnement, a la propriété d'émettre dans toutes les directions un rayonnement dont l'intensité et la longueur d'onde dépendent directement de sa température, l'exemple le plus frappant est le soleil . Sa température est voisine de 6000°C , il émet dans toutes les directions un rayonnement de 64000 kw par mètre carré de soleil dont la longueur d'onde moyenne est de $0,5 \mu$.

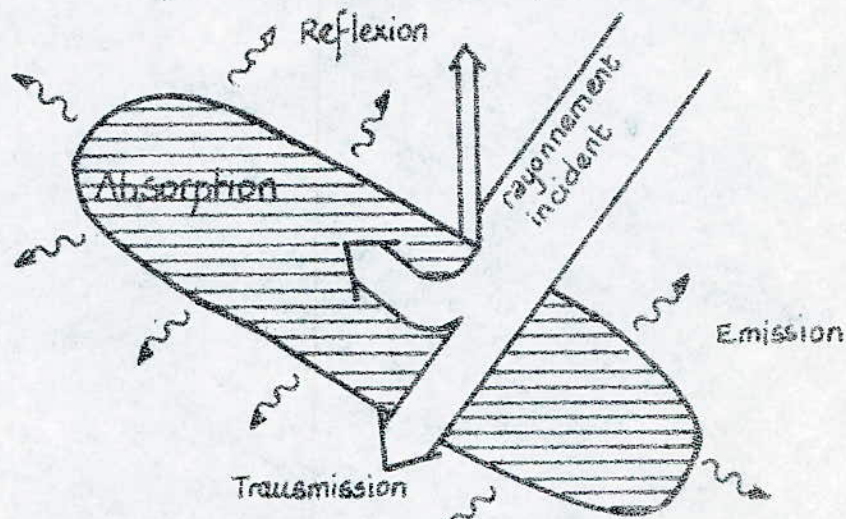
Remarque : La terre reçoit une infime partie de ce rayonnement, de l'ordre de $1000 \text{ w} / \text{m}^2$ pour une surface perpendiculaire aux rayons, la bande de longueur d'onde s'étale de l'ultra-violet à l'infra-rouge, en passant par le visible .

Un corps recevant un rayonnement, peut avoir un comportement de trois types :

Le rayonnement peut-être réfléchi, absorbé ou transmis dans des proportions bien déterminées .

Exemple : un miroir réfléchira presque tout le rayonnement solaire ; un corps noir l'absorbera en grande partie ; une vitre en transmettra 90% .

La partie du rayonnement incident qui est absorbée par le corps, conduira à l'augmentation de sa température ; et à nouveau ce corps va émettre un rayonnement dont l'intensité et la longueur d'onde dépendent de sa température.



Selon les principes évoqués ci-dessus, les capteurs seront fabriqués avec quelques dispositifs spéciaux en plus, pour diminuer les pertes et augmenter le rendement.

On peut capter directement le rayonnement solaire au moyen de panneaux plans, réceptifs, convenablement équipés, et dénommés *isolateurs*.

Selon le cas les *isolateurs* permettent, de produire de l'air chaud, ou d'échauffer un liquide; la circulation se faisant par *thermosiphon*, pompe ou ventilateur.

Au lieu de faire une captation directe comme il est dit ci-dessus on peut faire la captation indirecte au moyen de miroirs ou de lentilles qui modifient la direction des rayons solaires et généralement les concentrent avant la conversion en énergie

utilisable.

Les appareils de captation, sont fixes ou orientables.

L'orientation étant généralement assurée par un dispositif automatique. On peut aussi utiliser des appareils semi-fixes, qu'on oriente de façon discontinue selon la direction du rayonnement incident.

On citera pour la conversion photothermique, comme applications :

- dans l'industrie : les fours solaires, les chaudières solaires, et la distillation solaire.

- dans l'agriculture : le séchage agricole, le pompage de l'eau et les serres agricoles.

- dans l'habitat : les chauffe-eau solaires et la climatisation.

Avec ce type de conversion, on peut atteindre des rendements qui varient de 50 à 70 % dans des cas exceptionnels.

2 - Conversion thermo-ionique

En se basant sur le même principe que précédemment, on peut obtenir grâce au rayonnement solaire, de très hautes températures qui permettent à n'importe quel gaz de s'ioniser spontanément en formant un plasma.

Les recherches sont en cours pour obtenir d'un plasma, une différence de potentiel, pouvant être utilisée pour avoir un courant électrique.

3. Conversion photobiologique

La photosynthèse représente un moyen complexe mais efficace pour utiliser l'énergie solaire à grande échelle.

La photosynthèse chlorophyllienne, se réalise dans les plantes vertes en utilisant le gaz carbonique de l'atmosphère et, se dégage de l'oxygène, ceci en présence du rayonnement visible du spectre solaire.

Dans les molécules d'hydrates de Carbone des plantes vertes, de l'énergie solaire se trouve stockée sous forme d'énergie de liaison, entre atomes de carbone, et atomes d'hydrogène.

On pourra au moyen de cultures contrôlées et accélérées d'algues énergétiques dont le séchage par voie solaire permettra de stocker de l'énergie solaire sous forme chimique.

En pourra alors, ou bien utiliser les algues sèches faciles à stocker comme combustibles solides, ou bien les soumettre à la fermentation par digestion anaérobie produisant du méthane solaire; avec ce dernier on pourra obtenir de la force motrice pour produire de l'électricité.

4. Conversion chimique

L'hydrogène peut-être obtenu, soit par décomposition de la vapeur d'eau à une température de l'ordre de 1000°C , et avec l'aide d'un catalyseur; soit par électrolyse de l'eau.

En utilisant l'énergie solaire, soit pour produire des températures de 1000°C , soit pour produire de l'électricité, on pourra donc obtenir de l'hydrogène solaire.

Ce dernier peut jouer un rôle dans l'industrie future à cause de son pouvoir calorifique très élevé, de ses propriétés réductrices, et de ses qualités de combustibles non polluants, de plus il est facile à transporter et à stocker, de même on peut l'utiliser pour avoir une force motrice pour la production de l'électricité.

5 - Les transformations thermodynamiques

Dans cette catégorie de conversion, on peut distinguer les transformations thermoélastiques et les transformations thermo-électriques.

5.1 - Les transformations thermoélastiques

Au moyen d'un fluide, en cycle fermé, utilisé dans les moteurs thermiques fonctionnant entre une source chaude et une source froide.

La source chaude reçoit sa chaleur du soleil, la source froide reçoit sa chaleur de l'atmosphère ou de l'eau de mer.

Pour que le rendement soit acceptable il faut élever la température de la source chaude, ce qui est facile grâce au soleil.

5.2 - Les transformations thermoélectriques

Le principe de la thermoélectricité est le suivant :

un circuit fermé constitué de deux conducteurs faits de métaux

différents et raccordés par des soudures devient le siège d'un courant électrique continu quand il existe entre les deux soudures de raccordements une différence de température.

Avec l'utilisation des semi-conducteurs, le rendement de conversion énergétique a augmenté d'où le grand intérêt porté à la thermoélectricité.

Un générateur thermoélectrique est constitué d'un certain nombre de couples, chaque couple est formé de deux thermo-éléments l'un du type N, l'autre du type P, reliés par un pont métallique qui est en contact avec la source chaude, les autres extrémités étant reliées à une résistance, et maintenues à la température de la source froide.

Remarque: La source chaude peut-être un fluide chauffé par énergie solaire.

6 - Conversion photoélectrique

La souplesse de l'utilisation de l'électricité dans toutes les applications modernes a rendu la conversion de l'énergie solaire en électricité comme un problème de très haute importance.

On distingue ici deux procédés de conversion :

6.1 - Conversion directe : ou conversion photovoltaïque (sera traitée au chapitre III).

6.2- Conversion indirecte :

qui comprend au moins une conversion intermédiaire et qui peut-être thermique, chimique, photobiologique ou thermodynamique (comme on a vu précédemment).

III Conversion photovoltaïque

L'effet photovoltaïque est une conversion directe en énergie électrique, de l'énergie des photons émis par le soleil.

1. Principe des photopiles

Les cellules photovoltaïques sont essentiellement constituées de couples semi-conducteurs - métaux. Sous l'action de la lumière, elles deviennent le siège d'une force électromotrice, qui croît avec l'intensité de la lumière.

Le principe en est relativement simple : une photopile exposée au soleil va absorber la lumière qui lui parvient ; en effet les photons constituant cette lumière vont transmettre leur énergie aux électrons gravitant sur les orbites externes des atomes de la matière des photopiles. Ces électrons, ayant alors gagné suffisamment d'énergie pour se libérer de l'attraction de leurs noyaux respectifs, vont se propager dans le matériau, en laissant derrière eux des places vides.

Les trous ainsi créés, sont l'équivalent de charges positives puisqu'ils représentent un "manque" de charges négatives (électrons) dans un matériau initialement électriquement neutre.

Un électron d'un atome voisin d'un tel trou, viendra alors le combler créant un autre trou qui sera lui-même occupé par un autre électron, et ainsi de suite ; donc en plus du flux d'électrons, il y aura un flux de charges positives dans l'autre sens, et par conséquent, une différence de potentiel aux bornes de la cellule. Si ces bornes sont fermées sur une résistance, un courant s'établit dans le circuit ainsi constitué et la cellule se comporte comme un générateur de puissance électrique. Cela, c'est le principe. Dans la réalité, les choses sont beaucoup plus compliquées. Il faut en effet créer d'abord un champ électrique à l'intérieur de la pile, afin que le flux d'électrons et le flux de charges positives, créées par les photons, puissent engendrer ou migrer, un courant électrique. Le matériau de base de la quasi-totalité des photopiles actuelles est le silicium monocristallin utilisé pour sa bande interdite relativement faible, facilitant ainsi le passage des électrons vers la bande de conduction. Chaque atome de ce silicium est constitué d'un noyau entouré de 14 électrons, disposés en plusieurs couches, dont la plus externe, dite couche de valence, comporte 4 électrons. Cette couche est particulièrement importante, parce que c'est grâce aux 4 électrons de valence, que les atomes de silicium sont liés entre eux en une structure cohérente, régulière et sans faille : le cristal de silicium. Or, dans une telle structure, où tout est bien à sa place, aucun phénomène électrique ne peut se produire (n'oublions pas

que, dans la matière solide, les responsables du courant électrique sont, soit des électrons libres de leurs mouvements; soit des "trous" représentant l'absence d'un électron autour d'un atome).

C'est d'ailleurs pour cette raison que le cristal, à l'état naturel, est isolant.

Pour créer dans le silicium des possibilités de mouvements, donc des possibilités électriques, on va le doper, c'est à dire y introduire des "impuretés".

On appelle "impuretés" des atomes d'un autre matériau qui n'ont pas le même nombre d'électrons de valence que le silicium.

Par exemple : Dopage du type N : si l'on introduit du phosphore, qui possède 5 électrons de valence, alors que le silicium n'en a que 4, on va créer des électrons libres.

En effet, pour chaque atome de phosphore introduit, il y aura un électron de valence en surnombre qui ne pourra pas s'insérer dans une liaison avec un atome de silicium.

Dopage du type P : de la même façon, en introduisant des atomes de bore, qui n'ont que 3 électrons de valence, on va créer des trous, puisque, pour chaque atome de bore introduit, il manquera une liaison avec les atomes de silicium.

Le Dopage aboutit donc à produire des porteurs de charges, qui

vont pouvoir circuler.

Une photopile n'est rien d'autre que l'association d'une région dopée "P" avec une région dopée "n".

Dans la pratique, l'une des faces de la pastille de silicium est dopée au phosphore, l'autre au bore.

À l'interface entre les deux régions, il y a une situation dissymétrique due à la prédominance d'électrons d'une part et de trous d'autre part.

C'est cette dissymétrie qui crée un champ électrique dans la zone de jonction entre les deux régions.

Ce champ électrique existe, même si la photopile n'est pas éclairée.

Ceci étant, quand on expose la pastille au soleil, certains photons particulièrement énergétiques, entrant en collision avec les atomes de silicium, parviennent à délocaliser des électrons de la couche de valence, laissant à leur place des trous.

Ces paires électron-trou peuvent se former dans toute l'épaisseur de la photopile, mais, pour des raisons d'équilibre de répartition, elles ont tendance à se diriger vers la zone de jonction.

Là, sous l'action du champ électrique, les paires se séparent, les électrons se dirigent du côté "n", et les trous du côté "p". D'où une différence de potentiel entre les deux régions.

Deuxième étape : électrons et trous sont collectés par des électrodes et peuvent alors circuler, sous l'action de la différence de potentiel, dans un circuit extérieur à la photopile.

C'est précisément cette circulation qui constitue le courant photovoltaïque.

La différence de potentiel étant de l'ordre de 0,5 volt, le courant disponible (environ de 30 milliampères par cm^2) dépend naturellement de la surface offerte au soleil.

On a donc tout intérêt à associer un grand nombre de cellules à la fois en série, pour augmenter la tension, et en parallèle pour accroître l'intensité.

Un assemblage de cellules va constituer ce qu'on appelle : panneaux, ou modules photovoltaïques.

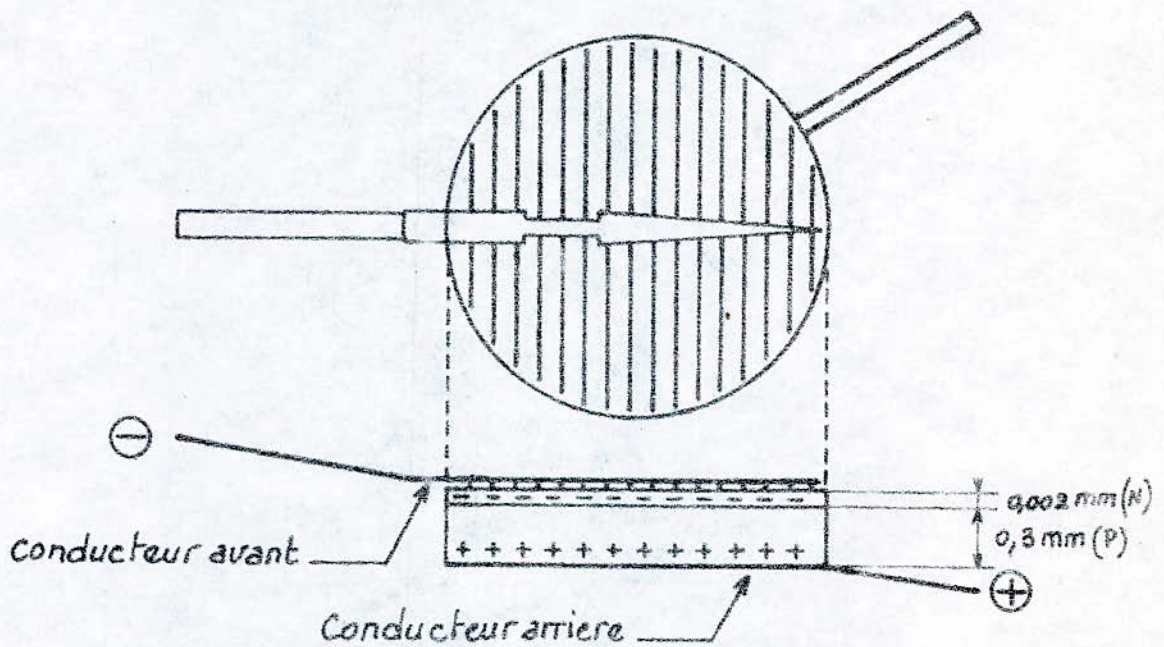
Les modules peuvent être branchés en série (pour obtenir des tensions 12, 24, 48, ..., 240V) et en parallèle en fonction des courants désirés.

Les modules doivent évidemment résister aux conditions climatiques les plus sévères, notamment aux températures élevées, aux vents de sables, à la corrosion par l'air marin, ... etc, ...

2 - Technologie des Cellules Solaires

Les cellules sont fabriquées à partir d'un semi-conducteur monocristallin ou semicristallin, elles sont rondes ou carrées; provenant de plaques découpées dans des lingots produits à partir d'une masse fondue.

La structure d'une cellule solaire ordinaire au silicium est indiquée sur le schéma de la figure suivante :



Cette structure est la plus répandue, mais on peut y apporter des modifications.

Par exemple; l'épaisseur peut-être réduite à $50 \mu\text{m}$, la couche anti-reflet peut-être supprimée pour des raisons économiques, la polarité peut-être inversée en utilisant une structure PN.

au lieu d'une structure NP. On peut aussi employer d'autres matériaux pour doper le silicium.

La jonction, qui est essentielle pour l'effet photovoltaïque, donne aux cellules solaires les caractéristiques d'une diode dans l'obscurité.

Les caractéristiques courant-tension ($I-V$) d'une cellule ordinaire de dimension 2×2 cm sont représentées sur la fig. 1.

Sous l'effet de la lumière, la courbe $I-V$ garde la même forme mais est translatée sur l'axe des courants négatifs.

Il en résulte donc une apparition de tension de circuit ouvert V_{co} sur l'axe des tensions positives et un courant de court-circuit I_{cc} sur l'axe des courants négatifs.

La courbe $I-V$ se déplace linéairement le long de l'axe des courants en fonction de l'éclairement.

Le courant de court-circuit varie donc linéairement avec l'éclairement, et l'accroissement de la tension de circuit-ouvert est une fonction logarithmique de l'éclairement.

La puissance maximale délivrée par une photopile est obtenue en optimisant le produit de I par V . Ce point correspond à une tension légèrement plus faible que V_{co} .

Deux rectangles sont tracés de part et d'autre de la caractéristique

$I-V$.

Le rapport entre le petit rectangle et le grand rectangle est appelé coefficient de remplissage. Pour les cellules solaires usuelles

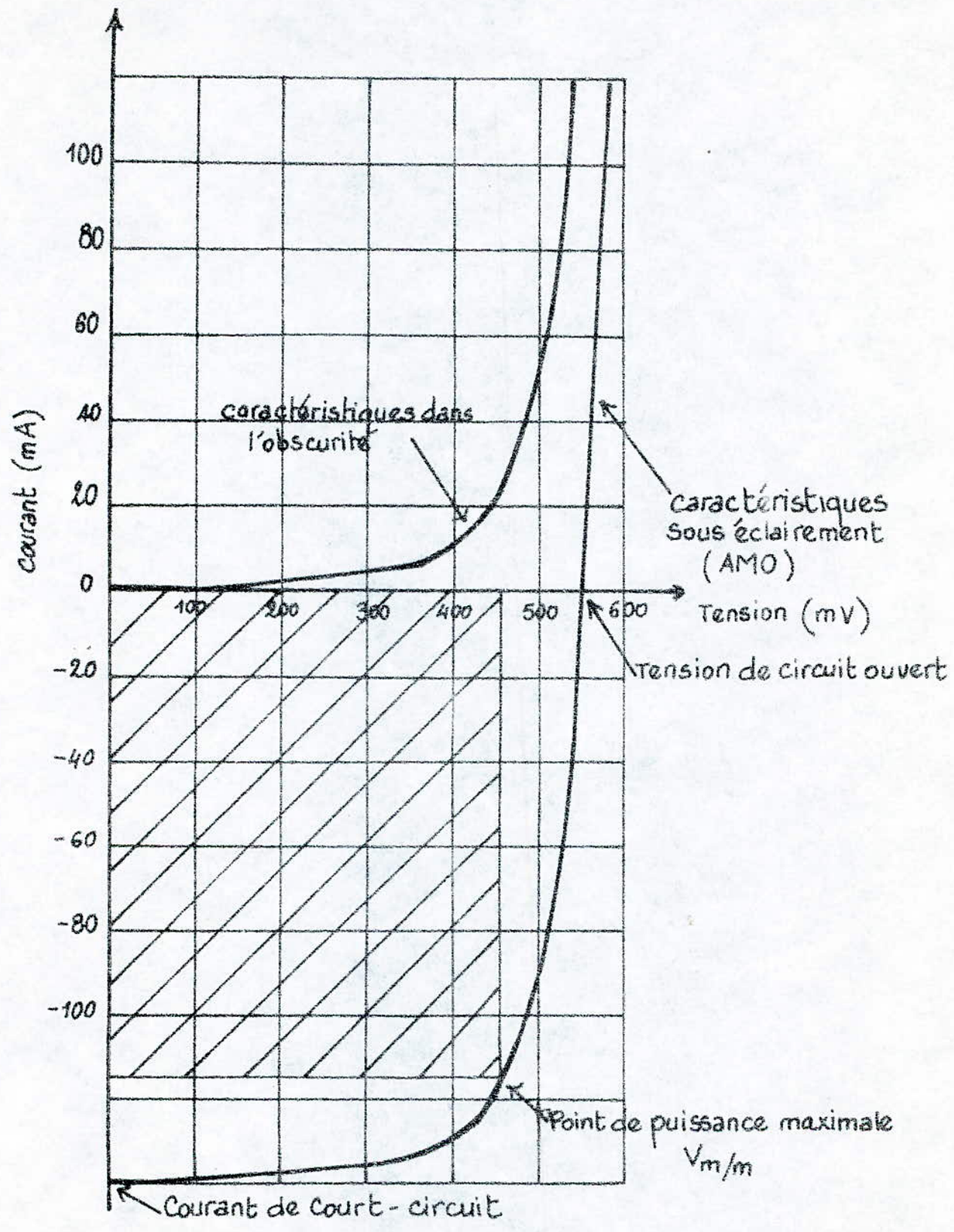
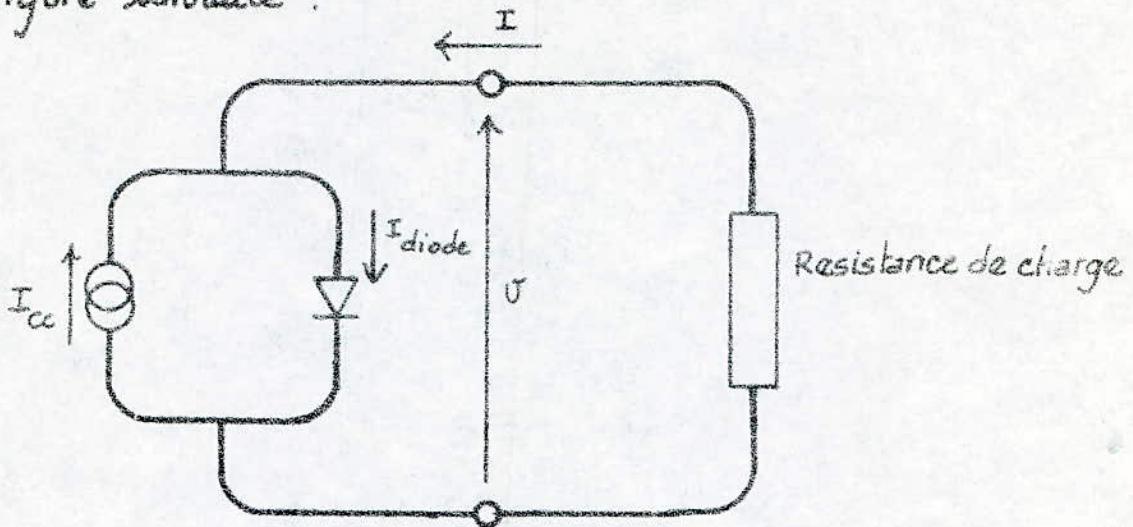


fig-1 Caractéristique I-V d'une cellule solaire ordinaire au silicium.

la valeur du coefficient se situe entre 0,7 et 0,82.

Le circuit équivalent d'une cellule solaire est indiqué sur la figure suivante :



En faisant varier la résistance de charge, de zéro à l'infini, on peut obtenir la caractéristique $I-V$ de la cellule.

La puissance utile délivrée par une cellule électronique solaire, diminue quand la température augmente (voir fig 2.3).

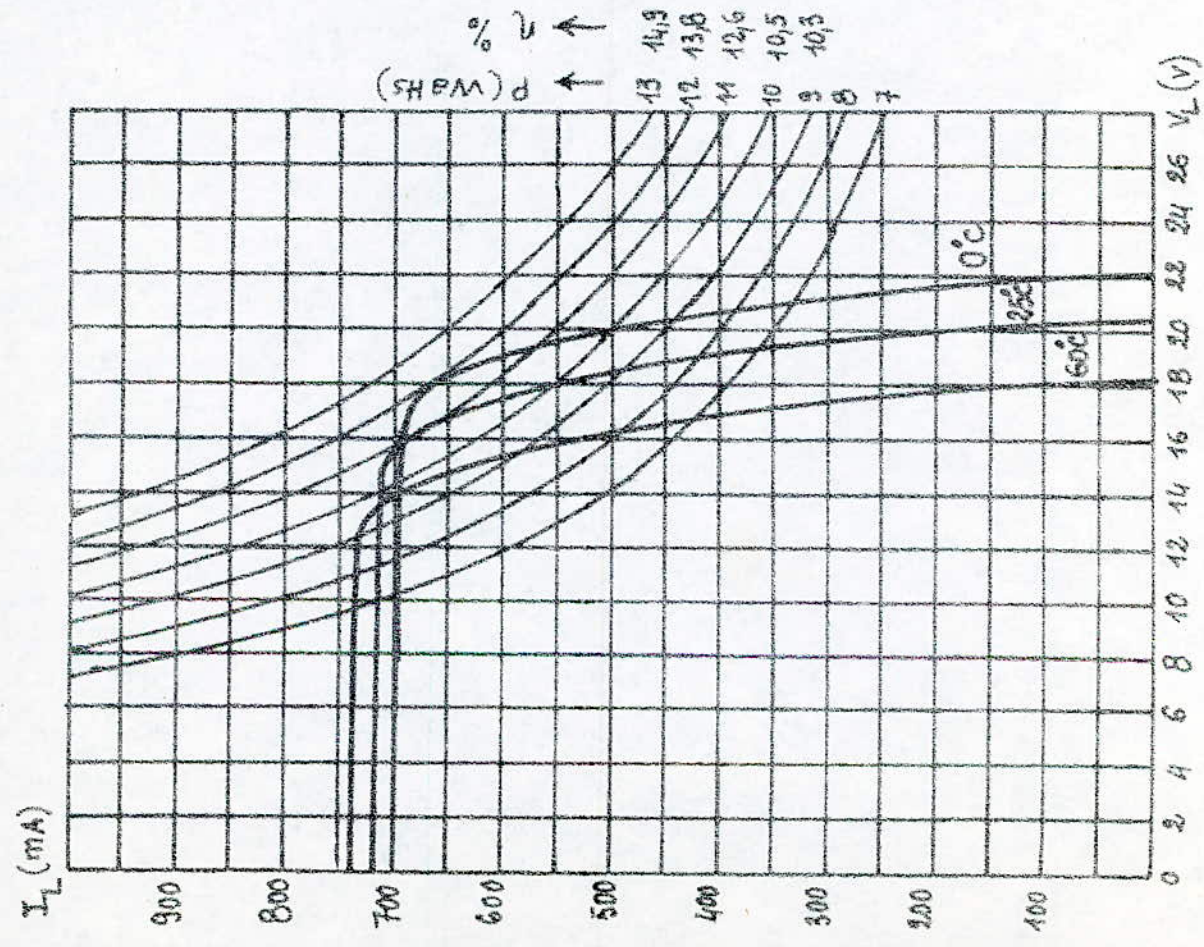
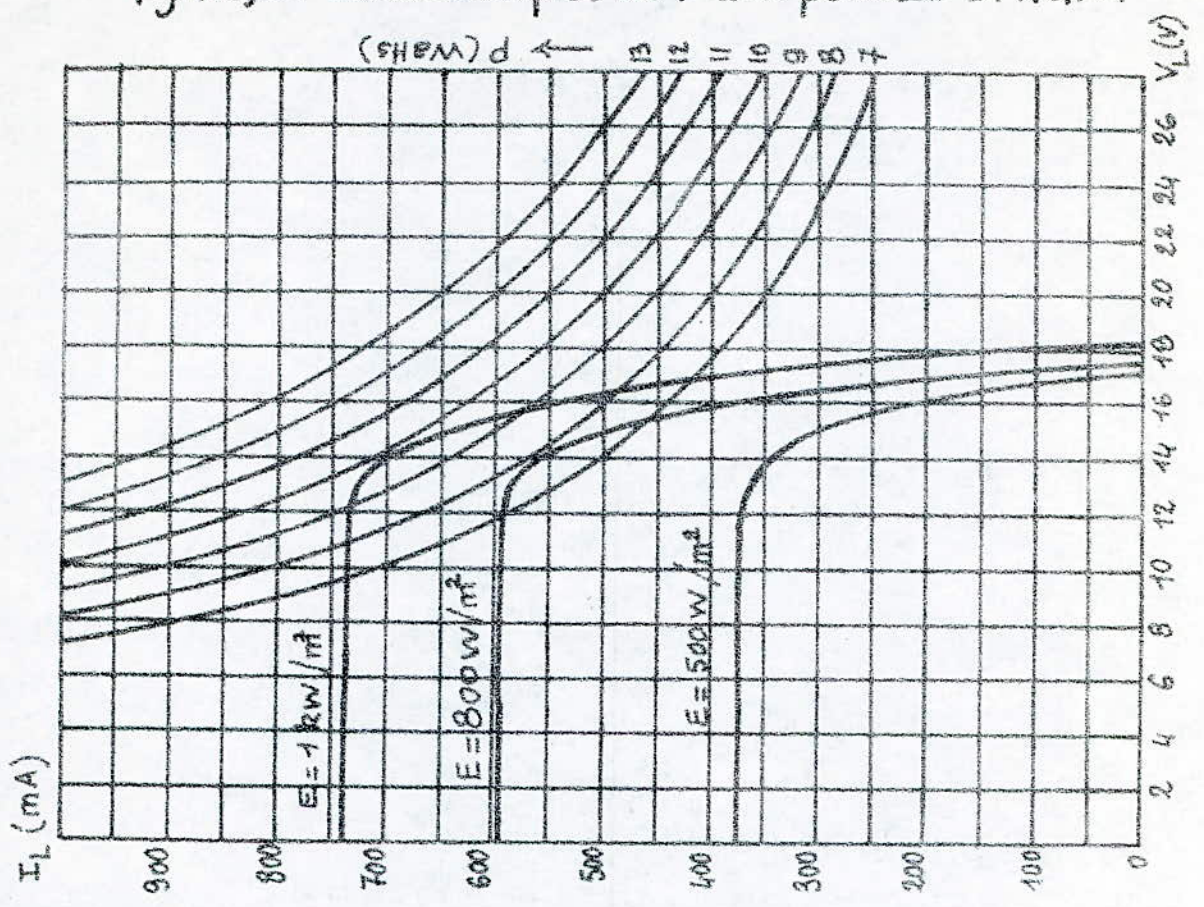
Pour les cellules ordinaires, les pertes s'élèvent à 0,35% - 0,45%.

pour une augmentation de température d'un degré celsius, en d'autres termes, une cellule solaire au silicium fournit une puissance qui est environ 20% plus élevée à 20°C qu'à 70°C.

Ces pertes sont dues principalement, à une diminution de la tension de circuit-ouvert ; ceci est caractéristique des cellules solaires pour lesquelles le courant est peu affecté par la température.

Le rendement d'une cellule solaire, défini comme le rapport entre la puissance électrique que l'on peut extraire au point de puissance maximale de la courbe $I-V$ et la lumière incidente,

fig 2.a, b. Caractéristiques I-V d'un panneau BPX 47A



a - $I_L = f(V_L)$ à différentes températures T_j pour $E = 1 \text{ kW/m}^2$.
 b - $I_L = f(V_L)$ à différents éclairements E pour $T_j = 60^\circ\text{C}$

dépend essentiellement de l'éclairement (voir fig 2.b).
 Les rendements obtenus à l'heure actuelle avec les photopiles au silicium commercialisées se situent entre 10% et 15%, selon les fabricants et selon les conditions de fonctionnement.

Amélioration du Rendement

Afin que la lumière arrive jusqu'à la jonction, la région N choisie comme face avant doit être extrêmement fine, et peut-être revêtu d'un dépôt antireflet, ou être dépolie par attaque chimique.

Pour collecter au mieux le courant électrique, la face arrière est entièrement métallisée et la face avant est revêtu d'un réseau métallique couvrant par exemple 8% de la surface totale.

Comme la température affecte le rendement, il est donc important d'amurer une ventilation, et d'assurer un bon contact thermique entre la cellule et son support.

Dans le cas d'un ensemble constitué par l'association de photopiles élémentaires, le rendement du panneau varie en fonction de son remplissage : des cellules carrées donneront un remplissage voisin de 100%, au contraire des cellules circulaires ne rempliront la surface du panneau qu'à moins de 75%. Le rendement global baisse d'autant.

L'influence de l'angle d'inclinaison du panneau par rapport au

soleil est importante. Le rendement est maximum lorsque la direction du soleil est perpendiculaire à la photopile. Il faut optimiser cette inclinaison, comme pour les capteurs filaux thermiques, par exemple si on veut une production peu variable en cours d'année.

L'inclinaison sera égale à la latitude + 10°.

Si on veut tirer le maximum de l'installation, la photopile sera asservie à la position du soleil par un système héliostatique, ou bien elle sera entraînée par un mouvement d'horlogerie (amplement suffisant pour cette application ne demandant pas une extrême précision comme dans les systèmes à concentration.).

3. Accumulateurs

D'après la caractéristique $i-v$ d'un panneau à différents éclaircissements, on constate que pour chaque ensoleillement, on trouve un point de fonctionnement optimum (M_1, M_2, \dots), pour lesquelles la puissance fournie par le panneau est maximale (voir fig 3).

Il est clair, que si le panneau est adapté à la charge R pour un éclaircissement donné, il ne le sera pas pour un autre.

Or, l'ensoleillement varie d'une heure à l'autre, d'une saison à l'autre; il y aura donc une optimisation à faire.

Dans la pratique, la meilleure solution consiste à utiliser une batterie d'accumulateurs en tampon entre le panneau et la charge.

Il faut choisir un panneau de tension en circuit ouvert supérieure à celle de la batterie, par exemple 18 volt pour une batterie de 12 volt.

En plus de son rôle de tampon, assurant au mieux l'adaptation du panneau, la batterie sert à stocker l'électricité produite pour pallier l'absence d'ensoleillement la nuit ou par temps couvert.

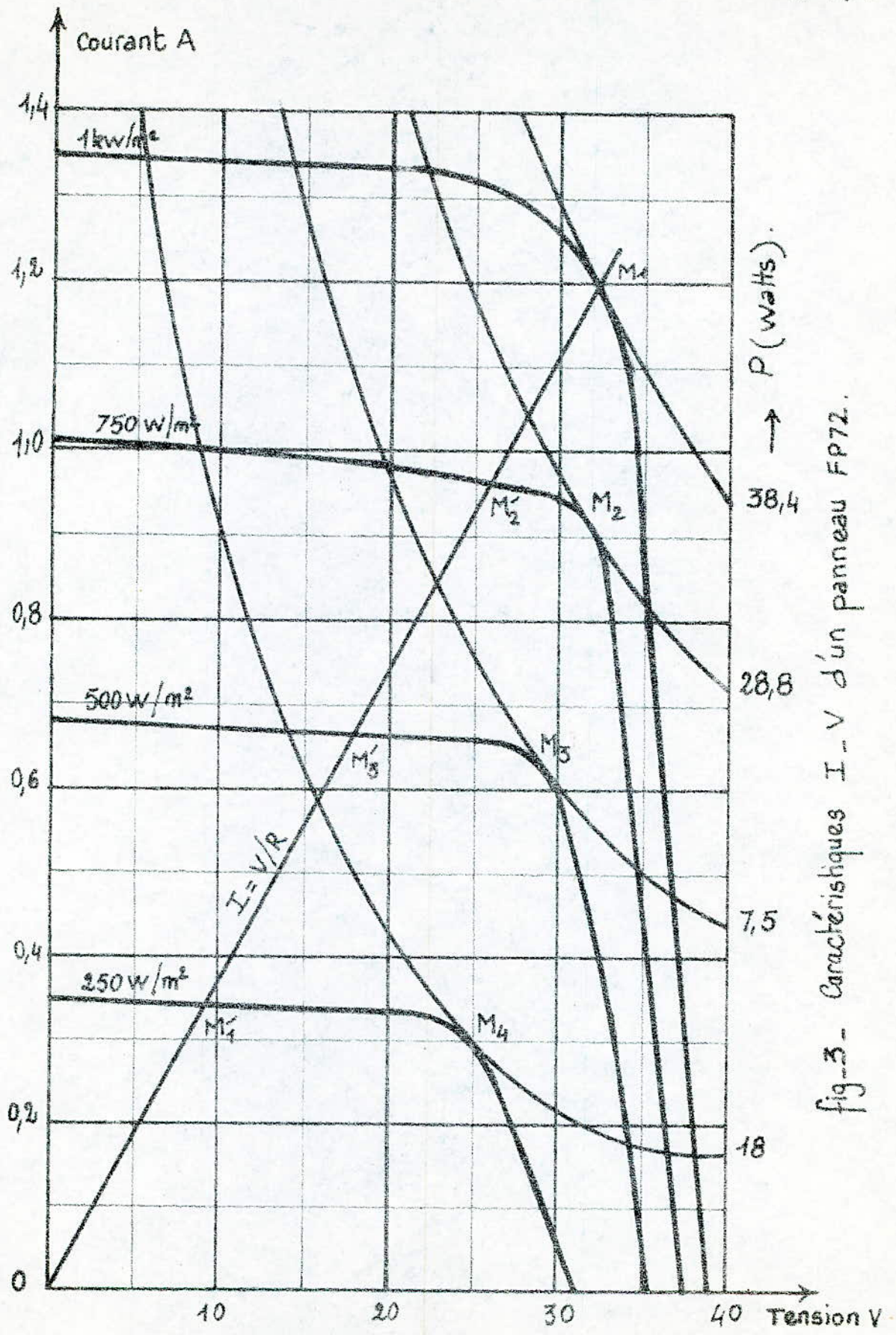


fig. 3 - Caractéristiques I - V d'un panneau FP72.

À l'heure actuelle, la batterie électrochimique ou accumulateur, constitue un système de stockage meilleur marché et très efficace.

Tout comme les générateurs photovoltaïques, les batteries sont des appareils statiques, non polluants à courant continu, basse tension et leur association à un système énergétique de haute fiabilité paraît séduisant. À l'intérieur d'un réseau électrique, les batteries pourraient se trouver immédiatement en pleine charge.

La batterie au plomb est très répandue et bon marché, certaines batteries, comme celle du Nickel-cadmium d'une fiabilité encore plus grande sont disponibles, mais leur coût empêche leur utilisation à grande échelle.

D'autres types de batteries sont actuellement en cours de mise au point.

Dans notre travail, on va traiter surtout la batterie au plomb car c'est elle qui convient le mieux dans l'immédiat pour le stockage d'énergie.

3.1 Principe de fonctionnement des batteries au Plomb

Elles utilisent de l'eau acidulée, par l'acide sulfurique dans lequel se trouve plongées deux plaques de plomb.

On peut résumer leur fonctionnement dans ce qui suit :

Equation de décharge:



on assiste à une formation de sulfate de Plomb, et, dans l'électrolyte à une absorption d'acide et une libération d'eau; la densité de l'électrolyte diminue pendant la décharge.

Equation de charge:



Il y a donc reconstitution de plaques et enrichissement de l'électrolyte.

Réfection des niveaux

Pendant la décharge, il se produit aussi une électrolyse (passage du courant dans l'eau entraîne sa décomposition en hydrogène et oxygène).

Il peut y avoir aussi perte d'eau par simple évaporation. Ces pertes doivent être compensées par addition périodique d'eau.

Sulfatation

On appelle sulfatation, la formation de sulfate de Plomb. Toutefois, le mot est utilisé pour désigner le durcissement de la matière active des plaques par suite d'un emploi défectueux.

3.2 Facteurs caractéristiques :

Ces facteurs concernent tout les types de batteries.

Débit :

C'est l'intensité en Ampère que l'accumulateur peut fournir dans un circuit donné.

Capacité :

C'est la quantité d'électricité qu'il peut renfermer. Elle devrait se mesurer en Coulombs, mais en pratique on utilise l'ampère-heure : $1Ah = 3600 \text{ coulombs}$.

Cette capacité s'obtient en multipliant le débit moyen au cours d'une décharge par le temps qu'a duré cette décharge.

Puissance :

Elle est représenté à chaque instant par le produit du courant débité, par la tension existant à ce moment entre les bornes de l'accumulateur. Elle est exprimée en Kw/h.

Energie :

La capacité d'un accumulateur mesurée au cours d'une décharge multipliée par la tension moyenne aux bornes durant cette même décharge donne l'énergie que peut renfermer l'accumulateur. Elle s'évalue en Watts-heures.

Rendement :

On distingue deux sortes de rendements :

- le rendement en quantité : qui est le rapport de la quantité d'électricité que l'on recueille à la charge sur la quantité

d'électricité qu'on lui a fourni pendant la charge précédant cette décharge .

- Le rendement en énergie : s'évalue en faisant le rapport de l'énergie fournie par l'accumulateur au cours d'une décharge sur l'énergie absorbée par l'accumulateur pendant la charge précédant cette décharge .

3.3. Utilisations

Il existe 3 grandes utilisations particulières de l'accumulateur au plomb .

- La batterie de démarrage .
- La batterie de traction .
- La batterie de Stationnaire .

Batterie de démarrage

Elle est utilisée pour le démarrage, l'allumage et l'éclairage des automobiles .

Caractéristiques :

- capacité en 20 heures
- aptitude à fournir une très forte intensité en quelques secondes .

La courte durée de vie des batteries de voitures n'est pas caractéristique, car leur mode d'utilisation entraîne des courants de décharge élevés, un contrôle de charge médiocre et de grandes variations de températures .

Batterie de Traction

Elle est utilisée pour la traction électrique.

- chariot de manutention
- Locomotives de mines.
- Transpalette
- Laveuses
- véhicules électriques

Elle est utilisée en générale pour des véhicules lents, transportant des charges relativement importantes.

Elle est déchargée journallement avec une profondeur de décharge de 80%.

Caractéristiques :

- Capacité donnée en 5 heures pour une tension d'arrêt de 1,70 volt par élément.

Batterie Stationnaire

Elle est utilisée en cas de coupure secteur dans différents domaines :

- Eclairage de secours
- Centraux téléphoniques
- Convertisseurs statiques.

Elle est adaptée selon les cas :

- à la décharge lente à partir de 3 heures jusqu'à 10 heures.
- à la décharge rapide avec parfois des autonomies de 5 minutes.

Caractéristiques : Capacité donnée en 10 heures.

Il y'a parfois contradiction dans les exigences, nécessitant alors un compromis.

C'est le cas de la batterie solaire à qui l'on demande des performances de :

- batterie de traction : parce qu'on lui demande un cycle journalier de décharge (Pas toujours suivi d'une recharge).

- batterie stationnaire : parce qu'on lui demande de stocker une énergie, et de la restituer en cas de non-ensoleillement.

Pour conclure ce chapitre parlons un peu de la durée de vie des accumulateurs à plomb.

Cette dernière est très limitée par le nombre de charges et de décharges qu'ils peuvent subir.

Suivant les régimes d'utilisations, qu'elles sont appelées à subir, les batteries au plomb ont des caractéristiques de construction différentes, et par suite des durées d'existence particulières pour chaque type. Les batteries stationnaires peuvent fonctionner pendant 6 à 10 ans, à condition qu'on remplace les plaques positives tous les 3 ans environ.

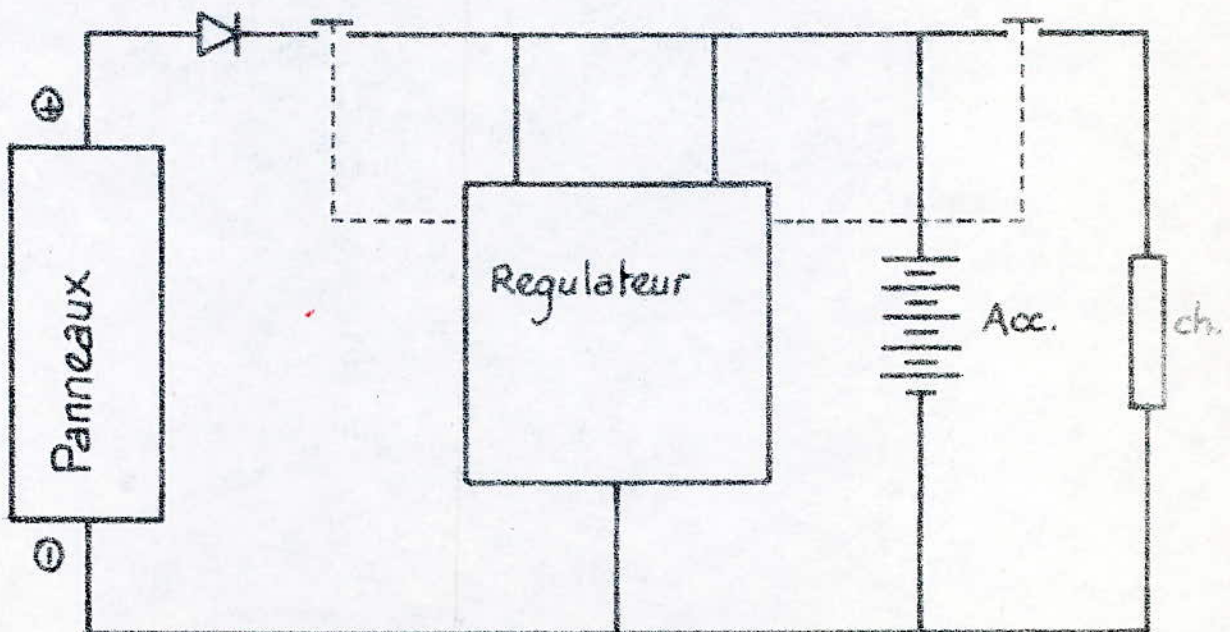
Les batteries de traction doivent pouvoir assurer 500 à 600 décharges en accusant une diminution de la capacité de 20% de la capacité nominale.

si les batteries au plomb se déchargent lentement et incomplètement (floating) 1,85 V/élément, et si les surcharges leur sont évitées, leur durée de vie peut dépasser 10 ans. Durant la charge, il ne faudrait pas laisser la tension dépasser 2,4 volt par élément.

afin d'éviter l'électrolyse et les inconvénients qui s'ensuivent tel que la perte d'eau et les risques de surpression.

Sous des conditions favorables, les batteries au plomb ne demandent aucun entretien, il faut seulement ajouter de l'électrolyte une fois par an.

Pour contrôler le bon fonctionnement de la batterie l'insertion d'un régulateur s'impose :



4. Le régulateur

Les batteries de stockage d'énergie, nécessitent, un entretien permanent, et une bonne tenue de leurs performances dans le temps. Le régulateur de charge, assure le contrôle des conditions de charge et de décharge des batteries.

Son fonctionnement se déroule comme suit :

- arrêt de l'arrivée de l'énergie à partir du panneau par ouverture d'un relai (ou blocage d'un transistor), dès que la batterie aura atteint son seuil de charge maximum.

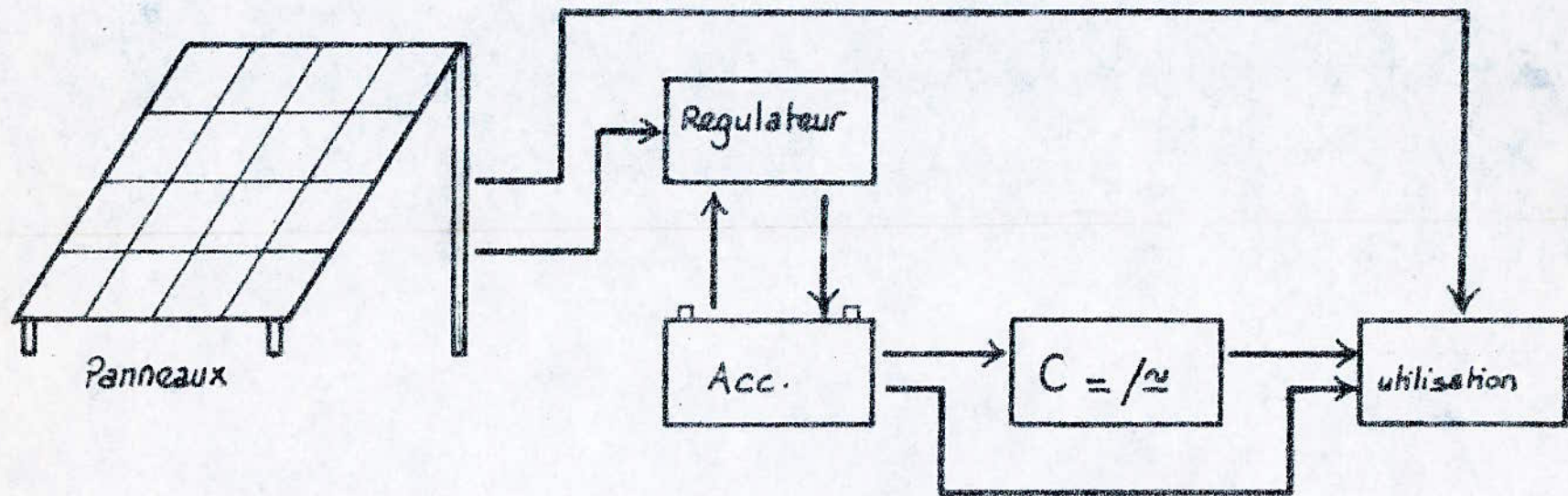
- déstasse de l'utilisation, dès que la batterie atteint son seuil de décharge minimum.

5. L'onduleur

La plupart des appareils domestiques nécessitent pour leur fonctionnement du courant continu, facilement récupérable sur les panneaux solaires.

Neanmoins, Certains appareils nécessitent du courant alternatif pour leur mise en marche, donc une conversion en courant alternatif du courant continu s'avère nécessaire.

La conversion, continu-alternatif, s'effectue à l'aide d'un montage électronique à transistors ou à thyristors, plus ou moins puissant, appelé onduleur (sera traité dans la 2^{ème} partie).



Elaboration d'une centrale photovoltaïque

2^{ème} PARTIE

Cette partie sera consacré tout d'abord à l'étude de quelques principes de convertisseur continu-alternatif puis à une étude théorique et pratique de l'onduleur réalisé.

I. Etude de quelques principes de Convertisseurs DC / AC

Il existe différents types de montages réalisant la conversion, chacun d'eux choisi en fonction des contraintes d'utilisation.

Leurs principe est le même, il repose sur la commutation, quelle soit naturelle ou forcée pour les thyristors, ou le régime de commutation pour les transistors.

On peut, cependant, les classer en deux catégories; les onduleurs non-autonomes et les onduleurs autonomes.

- Les onduleurs non-autonomes ou "assistés", sont reliés à un réseau alternatif qui leur impose la fréquence, et la forme d'onde de la tension de sortie.

- Les Onduleurs autonomes: déterminent eux même la fréquence et la forme d'onde de la tension alternative fournie au récepteur. Parmi les nombreux domaines d'emploi des onduleurs autonomes on trouve principalement :

1 - les onduleurs à fréquence variable à commutation forcée.

Alimentés à partir du réseau industriel par l'intermédiaire d'un montage redresseur, ils délivrent la tension de fréquence et de valeur variables nécessaires pour faire tourner à vitesse variable un moteur à courant alternatif.

2. Les Onduleurs à fréquence fixe à commutation forcée.
Alimentés le plus souvent par une batterie d'accumulateurs, ils jouent d'ordinaire le rôle d'alimentation de sécurité.
Ils constituent, à ce titre, le principal débouché actuel des onduleurs autonomes.

Pour ce type d'onduleur, on peut distinguer trois montages principaux :

2.1. Montage à 2 thyristors en parallèle

Pour bien comprendre le principe de fonctionnement on remplacera les thyristors par des interrupteurs.

Pour obtenir une tension alternative à partir d'une tension continue avec deux interrupteurs, il faut un point milieu :

Dans le montage à 2 thyristors en parallèle, le point milieu est obtenu du côté sortie à l'aide d'un transformateur à point milieu, (voir fig 1-a).

Principe :

Pendant une alternance, th_1 est fermé :

$$V_o - \bar{V}_B = E, \quad \bar{V} = 2 \frac{n_2}{n_1} E$$

Pendant l'autre alternance, th_2 est fermé :

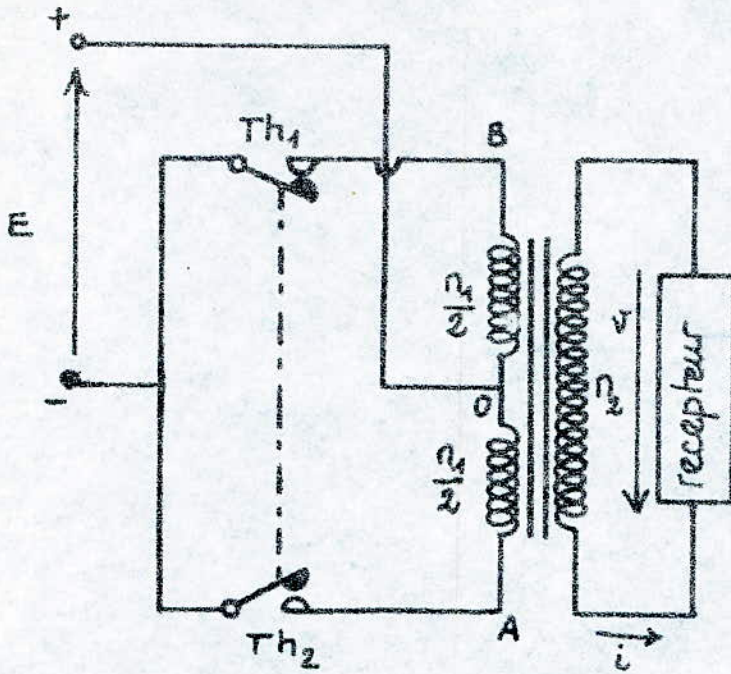


fig 1-a

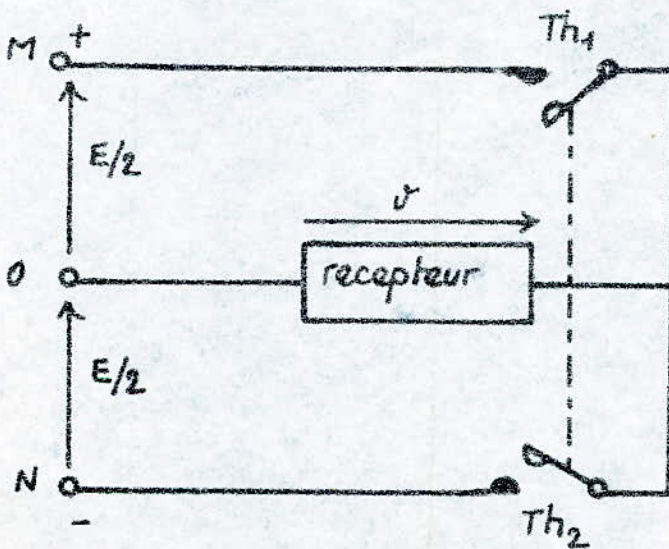
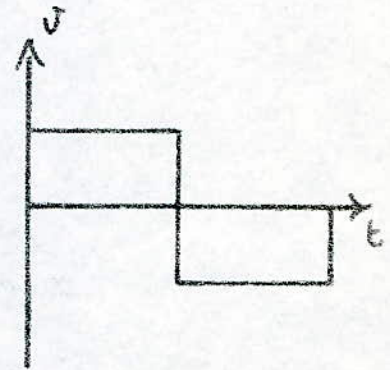
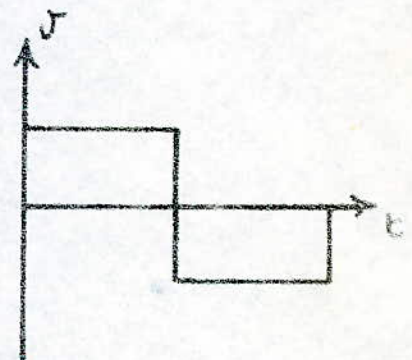


fig 1-b



$$V_0 - V_A = E, \quad v = -2 \frac{n_2}{n_1} E$$

Il faut évidemment que la fermeture de Th_1 provoque l'ouverture de Th_2 .

2.2. Montage à 2 thyristors en série

Le point milieu dans ce cas est réalisé à l'entrée, grâce à une source à point milieu (voir fig 1-b).

La fermeture de Th_1 applique au récepteur une tension v égale à $V_{N1} - V_0$ donc à $E/2$.

Durant l'autre alternance, c'est Th_2 qui fermé applique $V_N - V_0$ au récepteur, donc $-E/2$.

Avec ces deux montages, on ne peut régler que la cadence d'ouverture et de fermeture des deux interrupteurs, donc, la fréquence. Mais il n'est pas possible d'agir sur le rapport de transformation continu-alternatif.

3.3 Montage à 4 thyristors

Avec quatre interrupteurs (ou thyristors) on obtient un montage en pont, qui permet de régler le rapport de transformation grâce à la commande décalée. (voir fig 2.3)

En commande symétrique : à l'instant $t=0$, en même temps, on ferme Th_1 et Th_2' et on ouvre Th_2 et Th_1' . La tension de sortie prend la valeur $+E$.

pour $t = \frac{T}{2}$ on ouvre Th_1 et Th_2' et on ferme Th_2 et Th_1' ; la tension v devient égale à $-E$.

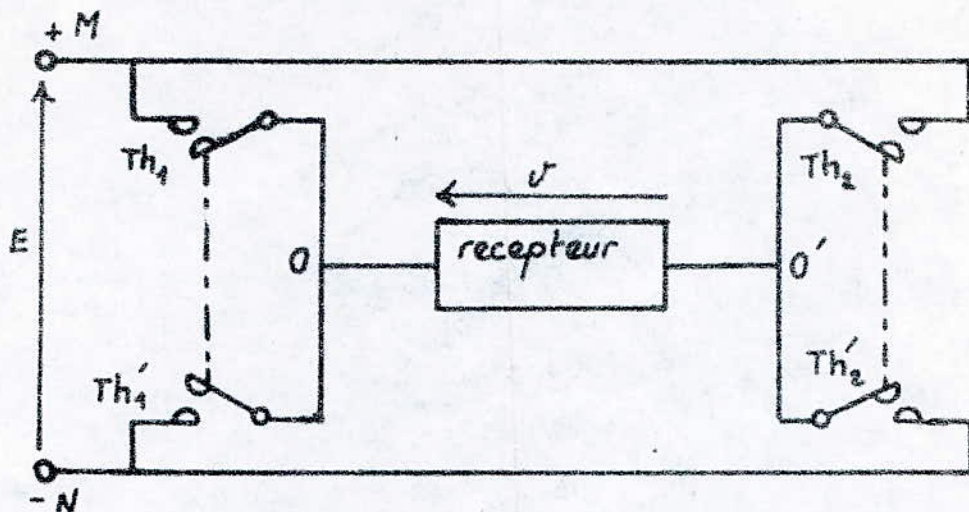


fig 2.a

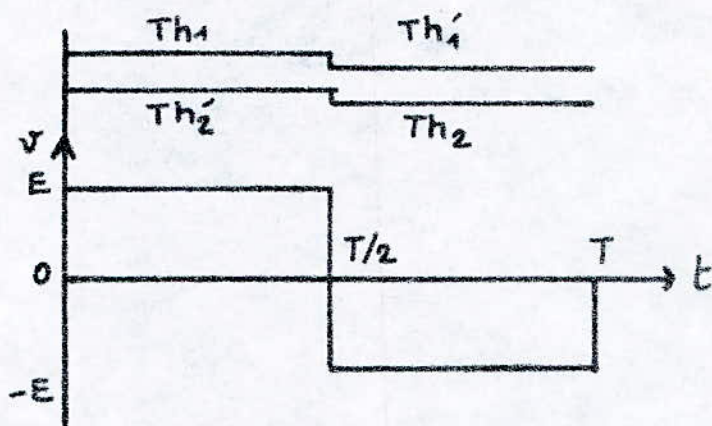


fig 2.b

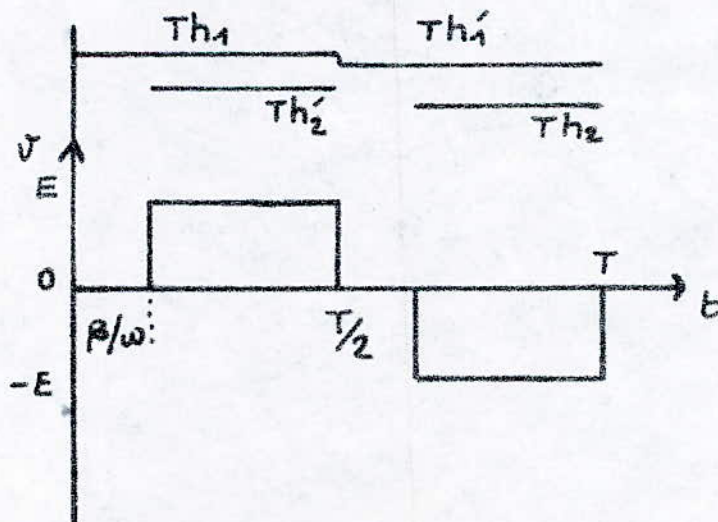


fig 2.c

Pour $t = T$ on recommence . (voir fig 2.b) .

La tension de sortie est formée de signaux rectangulaires joints. Sa valeur efficace V est égale à E .

En Commande Décalée :

on ferme Th_1 de $t = 0$ à $t = T/2$. Th_1 de $t = T/2$ à $t = T$.

comme précédemment .

Mais on retarde d'un angle β les phases de conduction de Th_2' et Th_2 . Th_2' est fermé pour $\beta/\omega < t < T/2 + \beta/\omega$, Th_2 pour $T/2 + \beta/\omega < t < T + \beta/\omega$ en désignant par ω la pulsation $2\pi/T$.

La tension de sortie v est égale à $+E$ quand Th_1 et Th_2' sont simultanément conducteurs , à $-E$ quand Th_2 et Th_1' sont fermés . Il apparaît deux intervalles , de durée β/ω , correspondant au débit simultané de Th_1 et Th_2 , puis Th_1' et Th_2' , durant lesquels la charge est court-circuitée et la tension de sortie nulle .

Par action sur l'angle β , on peut faire varier V de E à zéro .
(voir fig 2.c) .

Remarque : pour les faibles puissances , les thyristors peuvent être remplacés par des transistors fonctionnant en régime de commutation .

Dans la plupart des montages à thyristors , on préfère la commutation forcée , à la commutation naturelle , vu les inconvénients que présentent cette dernière .

Inconvénients de la Commutation naturelle :

- La Commutation naturelle suppose un récepteur à faible facteur de puissance pour qu'il soit peu amorti, car elle ne s'accommode pas du débit sur charge purement résistive.
- elle est très tributaire de la charge. A fréquence fixe la variation de charge tolérable serait très réduite, on ne peut maintenir le régime alternatif qu'en agissant sur la fréquence et en l'adaptant à la pseudo-période du circuit oscillant.
- En commutation naturelle, le courant s'annule de lui-même.

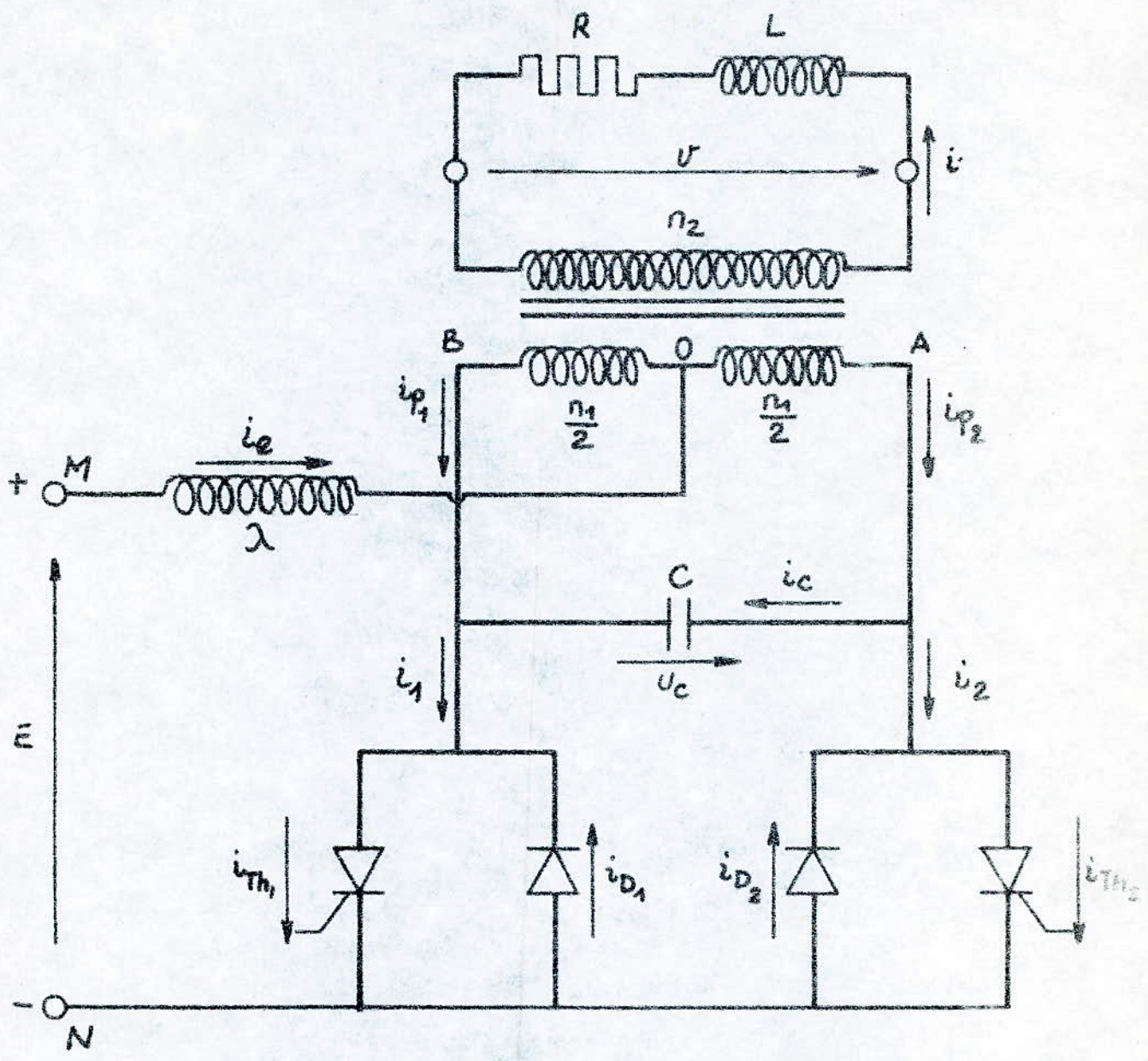


fig - 3 -

1. Fonctionnement

À l'instant $t = 0$, on amorce Th_1 , la borne B du transformateur sera reliée à la borne N de la source (voir fig 3).

on aura les tensions suivantes :

$$V_o - V_B = E, \quad V_A - V_B = u_c = 2E, \quad v = 2E \frac{n_2}{n_1}.$$

L'inductance λ limite la pointe de courant pris à la source pour charger C. Sans elle u_c prendrait instantanément la valeur $2E$, la pointe serait infinie.

À cause de λ , la tension a approximativement la forme d'onde représentée par la figure

C'est aussi la forme d'onde de la tension de sortie v , car $v = \frac{n_2}{n_1} u_c$.

De u_c on passe au courant i_c de charge de C par $i_c = C \frac{du_c}{dt}$.

Connaissant la nature du récepteur (charge R, L) on déduit de v le courant i qui le traverse (voir fig 4-b).

Durant la demi-période $0, T/2$. B étant reliée à N, le courant i_p dans le demi-primaire OA égale i_c , c'est à dire $i_p = i_c$ ①.

Dans la partie OB de cet enroulement, le courant i_p est donné par l'équation des ampères-tours :

$$i_p \frac{n_1}{2} - i_p \frac{n_1}{2} - i n_2 = 0 \dots \dots \textcircled{2}.$$

$$\textcircled{1} \text{ et } \textcircled{2} \implies i_p = \frac{2n_2}{n_1} i + i_c \dots \dots \textcircled{3}$$

Le courant d'entrée i_e débité par la source est égal au courant i_1 écoulé par l'ensemble $Th_1 - D_1$.

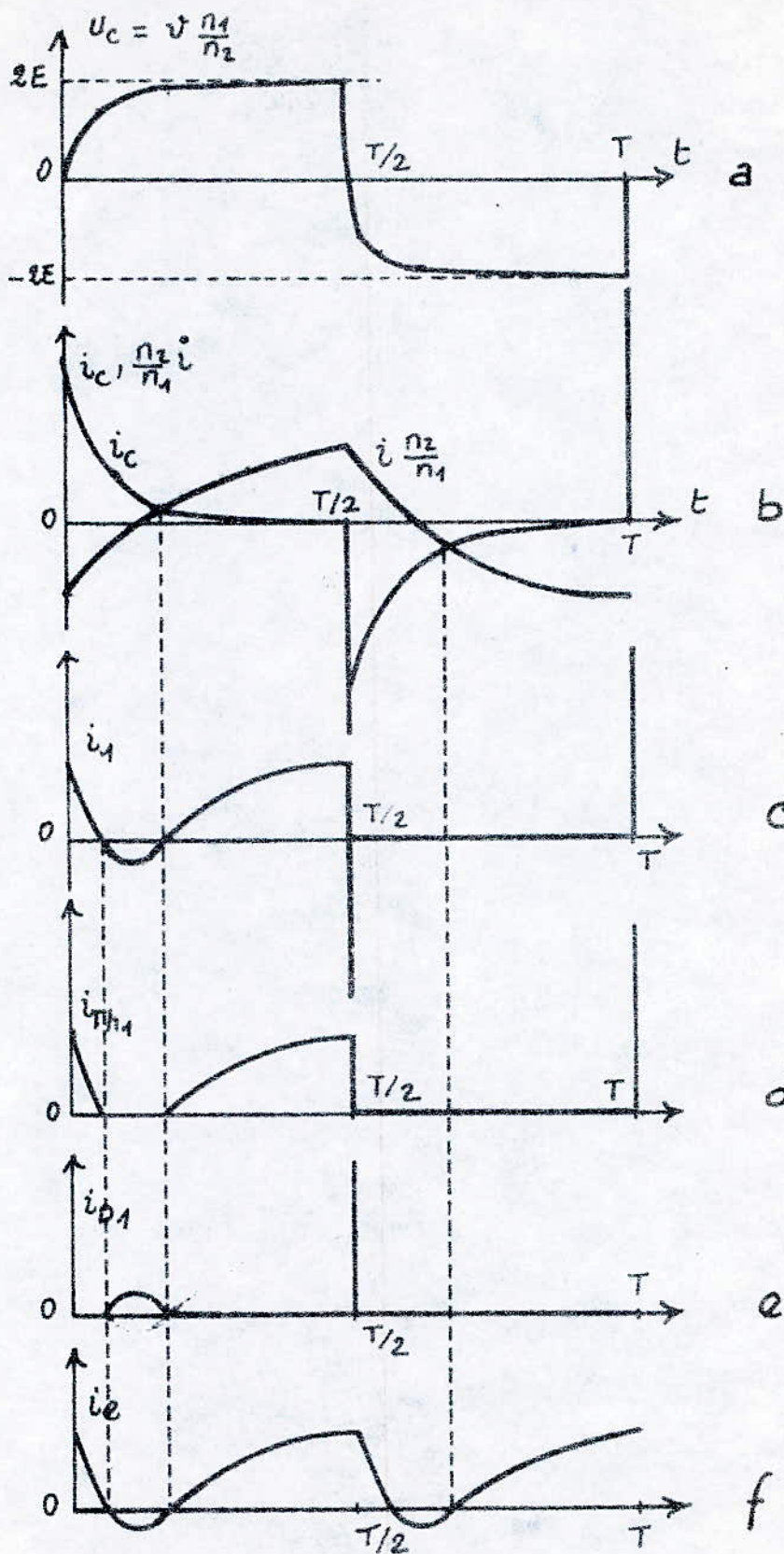


fig-4-

$$i_e = i_1 = i_p + i_c \dots \dots \textcircled{4}$$

$$\textcircled{4} \text{ et } \textcircled{3} \Rightarrow i_e = \frac{2n_2}{n_1} i + 2i_c \quad (\text{voir fig 4-f})$$

Au début de cette demi période, i est négatif mais i_c est positif et si fort que i_1 est lui-même positif & c'est Th_1 qui conduit. A cause de l'inductance du récepteur, qui retarde le passage du courant i à une valeur positive, ce n'est que pour $t = t_1$ que i_1 s'annule; la diode D_1 devient alors conductrice. Le débit de D_1 , qui correspond à un renvoi d'énergie vers la source, cesse pour $t = t_2$ quand i_1 redevient positif. Durant l'intervalle $t_2 - T/2$, Th_1 conduit à nouveau.

À l'instant $t = \frac{T}{2}$, la tension aux bornes du thyristor Th_2 , pratiquement égale à u_c , diffère peu de $2E$. Le signal de déblocage reçu par Th_2 le fait entrer en conduction. Le débit de Th_2 applique la tension de blocage $-u_c$ aux bornes de Th_1 . (En réalité C se décharge brutalement dans le circuit formé par Th_2 et D_1 . Si elle n'était pas limitée, cette décharge risquerait de détruire les redresseurs.

En tout cas, elle correspond à une brève annulation de u_c , donc de v . De plus elle rend pratiquement nul le temps pendant lequel la tension aux bornes du thyristor Th_1 à bloquer est négative).

À partir de $t = \frac{T}{2}$, on coupe la liaison B-N et on établit la liaison A-N, la seconde alternance de la tension v , identique

au signe près à la première, Commence .

Les expressions des diverses variables pour $\frac{T}{2} < t < T$ se déduisent directement de celles trouvées pour $0 < t < \frac{T}{2}$.

(voir fig 4) .

2 Amélioration du montage : (voir fig 5)

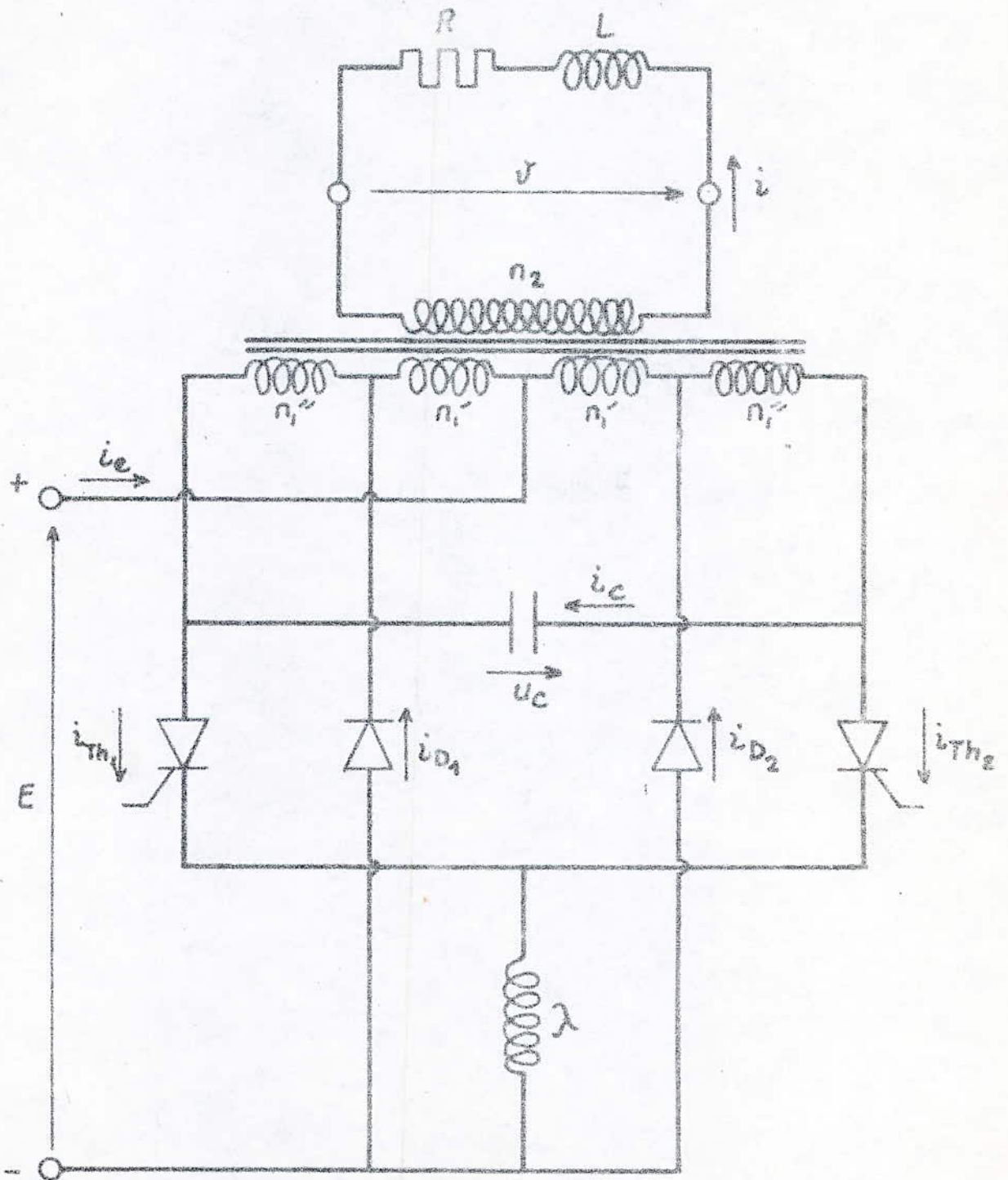
L'étude précédente montre :

- qu'il ne faut pas monter les diodes directement aux bornes des thyristors, sinon, elles mettent pratiquement en court-circuit la source de tension de blocage, c'est à dire le condensateur de commutation convenablement chargé .

Le montage doit être tel que la diode placée en parallèle inverse aux bornes d'un thyristor ne conduise pas pendant l'intervalle de blocage de celui-ci .

- La diode D_1 renvoie de la puissance vers la source pendant l'intervalle $t_1 - t_2$. Le rendement de l'onduleur sera d'autant meilleur que la tension que la quantité d'électricité ainsi renvoyée sera plus voisine de celle correspondant à la partie négative de l'onde représentant $2 \frac{n_2}{n_1} i$ au cours de l'alternance positive de v . L'écart correspond aux pertes par commutation . Aussi, dès la fin de l'intervalle de blocage d'un thyristor, faut-il hâter la prise de courant par la diode et essayer d'accroître le courant dans celle-ci, afin de récupérer une partie de l'énergie cédée par la source aux auxiliaires de

fig. 5.



Commutation. On dit qu'il faut activer les diodes. Celles-ci doivent être placées sur les prises intermédiaires du transformateur, de façon à être activées.

- L'inductance λ nécessaire pour limiter les pointes du courant i_e à l'entrée en conduction des thyristors, est bien mise en série avec ces redresseurs. Au contraire λ qui freinait la récupération ne se trouve pas dans les circuits des diodes.

- Les commutations forcées rencontrées ici sont du type indirect ou par impulsions. Pour $t = 0$ par exemple, Th_1 interrompt la conduction de Th_2 , puis laisse à D_1 le soin d'écouler le courant secondaire ramené au primaire $\frac{e n_2}{n_1} i$. Le thyristor Th_1 ne reprendra ce courant que plus tard au cours de l'alternance quand il aura pris le même signe que la tension v .

Cela suppose que les signaux envoyés sur les gâchettes des thyristors aient une durée suffisante (supérieure à t_2). On trouvera ce type de commutation forcée pour tous les onduleurs lorsqu'ils débitent sur une charge résistive et inductive, ce qui est le cas de la majorité des récepteurs. A cause de l'inductance de la charge le courant i dans celle-ci est au début de chaque alternance de v , de signe opposé à v .

III - Réalisation Pratique

Dans cette partie notre travail consiste à compléter nos connaissances sur l'onduleur étudié précédemment. Pour cela on va le présenter sous forme de deux étages, l'un étudie la commande électronique l'autre, l'étage de puissance.

1. Etage de Puissance

Le schéma du montage est donné par la figure qui représente le schéma de l'onduleur amélioré.

Dimensionnement des Thyristors

La puissance demandée étant égale à 1 KVA, pour avoir un courant raisonnable on a choisi la tension d'entrée égale à 60V.

ce qui nous donne un courant égale à $\frac{1000}{60} = 16,66 A$.

Pour cela les thyristors doivent avoir un courant nominal supérieur à 16,66 A.

Pour notre cas on a utilisé des Thyristors du type 2N688 ayant les caractéristiques suivantes :

courant nominal continu		25 A
tension inverse de claquage		400 V
courant direct moyen maximal	I_{TAV}	16 A
courant de crête accidentel	I_{TSM}	150 A
courant minimum de gâchette d'amorçage	I_{GT}	25 mA
tension minima de gâchette d'amorçage	V_{GT}	3 V
courant de maintien	I_H	20 mA
temps d'amorçage		20 μ s
vitesse critique de croissance de tension	dv/dt	30 V/ μ s
	I_t^2	75 A ² s

Dimensionnement des Diodes de récupération

Les diodes utilisées sont du type BYZ 42 dont les caractéristiques sont :

- tension inverse 600 V
- courant nominal 10 A
- température de la jonction 125 °C
- chute de tension 1 V

Protections

Pour la protection des redresseurs contre l'échauffement, on utilise des radiateurs à ailettes en Aluminium sur chaque redresseur pour

L'évacuation naturelle de la chaleur .

Les dimensions des radiateurs utilisées sont :

$$a = 4 \text{ mm}; l = 8 \text{ cm} \quad L = 16 \text{ cm}$$

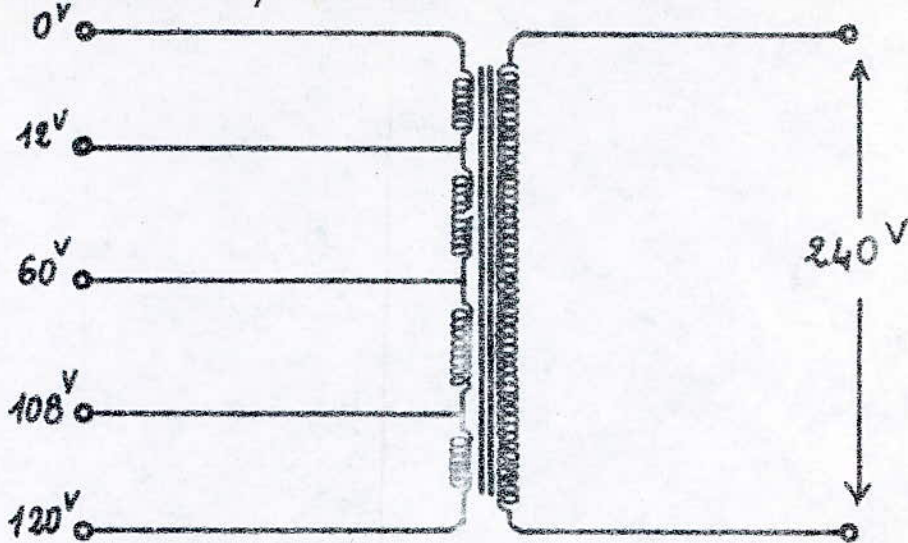
- Pour une éventuelle protection contre les court-circuits, on utilise des fusibles. Ils doivent être rapide, voire ultra-rapide.

Réalisation du transformateur

Comme on a pris la tension d'entrée $E = 60 \text{ V}$ et on sait que théoriquement la tension au primaire du transformateur est égale à $2E = 120 \text{ V}$, pour avoir à la sortie une tension voisine de 220 V , on a pris un rapport de transformation $\frac{n_2}{n_1} = 2$.
Donc le transformateur utilisé possède les caractéristiques suivantes :

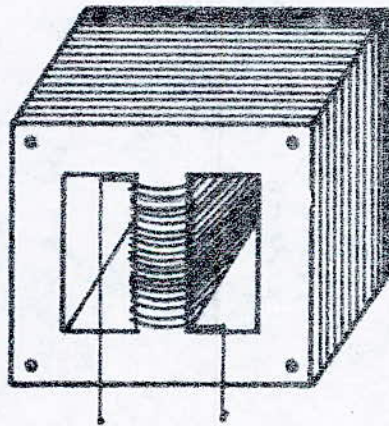
Tension d'entrée :	$120 \text{ V} \pm 10\%$ avec prise médiane
Tension de sortie :	$240 \text{ V} \pm 10\%$
Puissance nominale :	1,5 KVA
Fréquence :	50 Hz $\pm 2\%$
Pertes à vide :	$\leq 3\%$
Rendement :	$\geq 90\%$

Schéma du transformateur



Choix de la Self

Sur des tôles magnétiques récupérées d'un ancien transformateur, a été réalisé un enroulement supportant 30A (voir fig).



Remarque : La réalisation de la Self et du transformateur a été faite par un privé .

Choix des Condensateurs

Le condensateur doit être non polarisable Capable de bloquer les Thyristors , sa valeur a été déterminée expérimentalement $C = 150\mu F$

ou l'indisponibilité de celle-ci on a utilisé 5 condensateurs montés en parallèle de capacité $C = 30 \mu F$ et de tension de service $T_s = 380 V$.

2 - Commande électronique

La commande électronique a pour but d'amorcer les thyristors alternativement avec une fréquence bien déterminée.

Sa réalisation doit tenir compte des facteurs suivants :

- Modes d'amorçage :

Il existe plusieurs procédés d'amorçage des thyristors

- par courant continu

- par courant alternatif

- par train d'impulsions

Dans notre cas on a utilisé le mode de déclenchement par train d'impulsions pour les raisons suivantes :

- Avec l'amorçage par impulsions, il est possible d'utiliser une puissance crête supérieure à la puissance moyenne de gâchette admissible.

- Un plus grand courant appliqué sur la gâchette diminue le temps de montée du courant anodique t_{on} , ceci permet d'obtenir une meilleure synchronisation entre le moment où le signal de gâchette est appliqué, et celui où le thyristor s'amorce complètement.

Dans le cas d'amorçage par impulsions, l'échauffement

Correspondant est très réduit si le temps de montée de l'impulsion est très faible. De ceci il ressort qu'un amorçage par impulsions permet compte tenu de la dispersion de caractéristiques d'obtenir une précision plus grande de l'instant d'amorçage et une dissipation moindre dans la fonction de gâchette que l'amorçage et une dissipation moindre dans la fonction de gâchette que l'amorçage en continu ou en alternatif.

Il se peut qu'une seule impulsion n'arrive pas à amorcer le thyristor, pour éviter ce phénomène on envoie un train d'impulsions.

Cette solution présente l'avantage de prélever peu d'énergie moyenne sur le circuit de commande.

De plus ce mode permet l'attaque des gâchettes par le biais d'un transformateur d'impulsions, ce qui isole galvaniquement le circuit de puissance du circuit de commande.

L'utilisation d'un déclenchement par impulsions permet d'employer de petits composants, de faible puissance, peu coûteux pour commander des thyristors de puissance élevée.

La durée τ du train d'impulsions a une valeur bien déterminée. Théoriquement, on a vu que τ doit être supérieur à t_2 ($\tau > t_2$), pour une charge R, L (voir ch.), en même temps $\tau < \frac{T}{2}$ pour éviter le déclenchement simultané des deux thyristors.

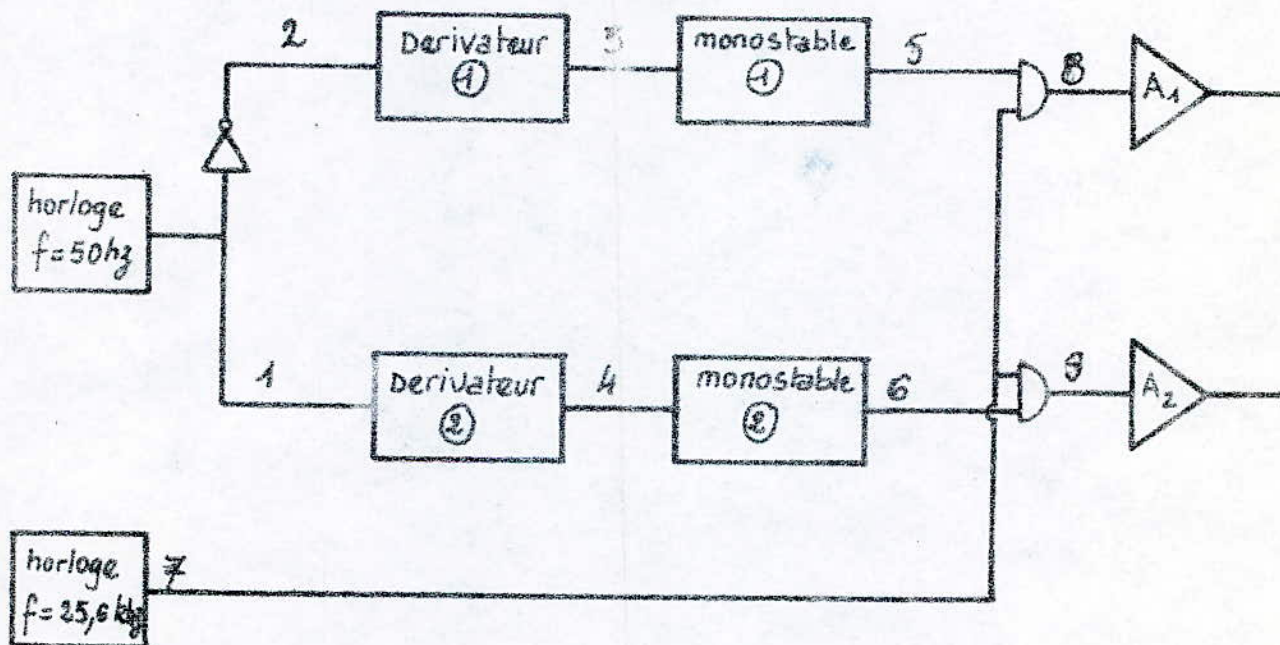
d'où :
$$t_2 < \tau < \frac{T}{2}$$

Dans notre cas, on a choisi :

$$\tau = \frac{2}{3} \cdot \frac{T_H}{2} = \frac{T_H}{3} = \frac{20}{3} = 6,66 \text{ ms}$$

T_H : étout la période du signal délivré par l'horloge .

Schéma Synoptique de la Commande



Principe de fonctionnement

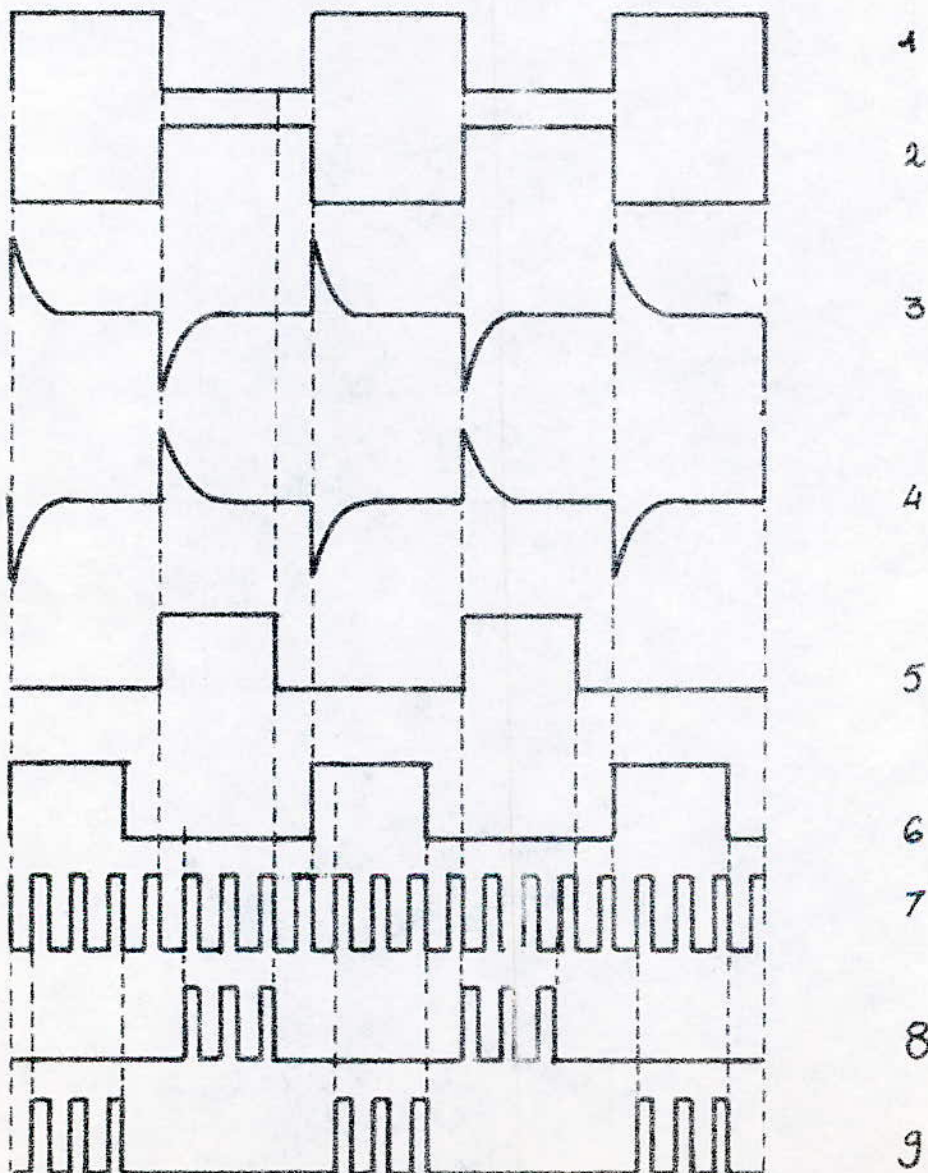
L'horloge principale de fréquence $f = 50 \text{ Hz}$ génère un signal carré, celui-ci va être inversé de façon à obtenir deux signaux alternés de même fréquence 50 Hz .

Ces deux derniers attaquent deux étages dérivateurs, pour pouvoir

Commander alternativement par impulsions deux monostables.

Les créneaux issus des monostables vont être multipliés à l'aide de portes AND avec un signal carré de fréquence assez élevée (25,6 kHz) pour obtenir deux trains d'impulsions alternés, de durée τ chacun.

Après une amplification en courant, les trains d'impulsions vont commander les thyristors à tour de rôle avec une fréquence de 50 Hz.



Déclenchement :

À l'instant $t = T_0$, le condensateur est supposé déchargé.

L'impulsion de déclenchement appliquée à la borne 2 du CI, met le bistable interne en position charge. De ce fait, le transistor T_1 est bloqué et la sortie est à l'état haut.

Temporisation :

Cette étape correspond à la temporisation et à la charge du condensateur C extérieur au C.I. La charge à travers la résistance R , en série avec C , se fait d'après la loi :

$$V_c = V_{cc} (1 - e^{-t/RC})$$

elle se poursuit jusqu'au moment où $V_c = V_{ref} = \frac{2}{3} V_{cc}$.

Fin de temporisation :

Ce moment étant atteint, le comparateur 1 change d'état et ramène le bistable interne dans sa position initiale, et de ce fait :

- a. le transistor T_1 est saturé,
- b. C est déchargé
- c. Sortie au niveau bas

Le circuit étant revenu à son état initial est prêt à recevoir une nouvelle impulsion de déclenchement.

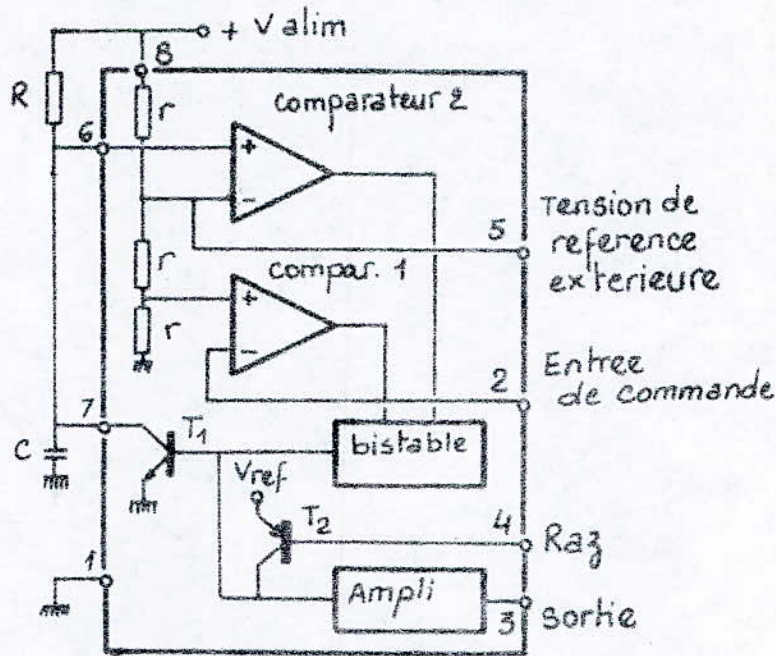
Puisque la tension de la capacité externe varie exponentiellement de 0 à $\frac{2}{3} V_{cc}$, on écrit :

$$\Delta V = V_{cc} (1 - e^{-t/RC}) \text{ d'où : } t = -RC \ln \frac{1}{3}$$

$$t = 1,1 RC$$

Réalisation pratique

Avant de détailler le calcul des différents étages du schéma synoptique, faisons un petit rappel sur le circuit intégré NE555. Pour expliquer le fonctionnement du 555, on utilisera le schéma synoptique suivant :



On distingue deux types d'utilisations :

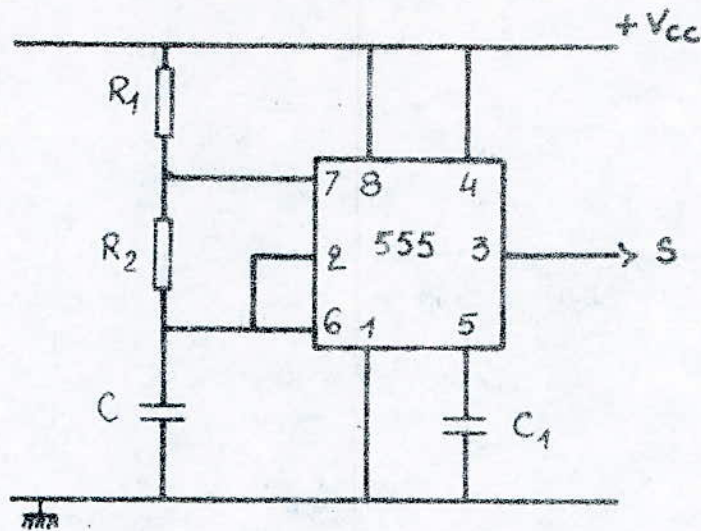
- En monostable

Le C.I 555 a été, essentiellement, conçu pour être utilisé en monostable de longue durée. La temporisation peut varier entre quelques micro-secondes et quelques heures.

Expliquons maintenant, rapidement son fonctionnement en monostable :

EN astable

Sous ce cas, le circuit se déclenche lui-même, la borne 2 est reliée à la borne 6 comme indiqué sur la figure suivante :



Le condensateur se charge à travers R_1 et R_2 , et lorsque la tension à ses bornes atteint $\frac{2}{3} V_{cc}$ le comparateur 2 change d'état, le multivibrateur bistable bascule, T_1 se sature et le condensateur se décharge à travers R_2 . Lorsque la tension à ces bornes atteint $\frac{1}{3} V_{cc}$, le comparateur 1 change d'état. Le multivibrateur bistable bascule à nouveau et cette fois bloque T_1 . Le condensateur recommence à se charger, et le cycle continue. Le temps de charge s'écrit pour cette application :

$$t_1 = 0,7 (R_1 + R_2) C.$$

Le temps de décharge s'écrit :

$$t_2 = 0,7 R_2 C$$

La période du signal fourni par un tel multivibrateur astable, peut donc s'écrire :

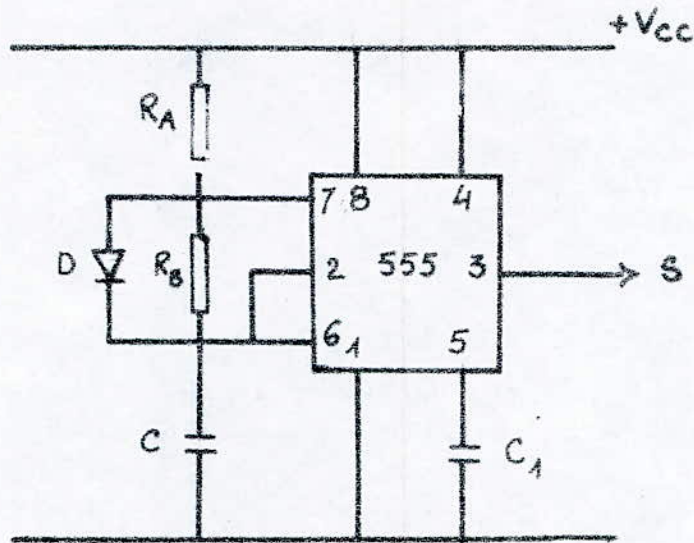
$$T = 0,7 (R_1 + 2R_2) C.$$

Calcul des différents étages

Horloges :

elles ont été réalisées avec un NE 555 monté en multivibrateur astable.

schéma du montage :



La diode D a pour rôle d'avoir une charge du condensateur à travers R_A et une décharge à travers R_B .

donc : $T_A = 0,7 R_A C$; $T_B = 0,7 R_B C$.

pour avoir des signaux parfaitement symétriques ($T_A = T_B$), il suffit de prendre $R_A = R_B = R$.

1^{er} cas : $f = 50 \text{ Hz} \Rightarrow T = \frac{1}{50} \text{ s} \Rightarrow T_A = T_B = \frac{1}{100} \text{ s}$.

$$\Rightarrow RC = \frac{1}{10} \text{ s}$$

Choix des Composants :

$C = 4,7 \mu\text{F}$; $R_A = R_B = \text{Ajustable de } 3,3 \text{ k}\Omega \text{ pour le réglage de la fréquence.}$; $C_1 = 10 \text{ nF}$; $D = 1\text{N}4001$.

2nd Cas : $f = 25,6 \text{ kHz}$

$$C = 10 \text{ nF}$$

$$R_A = R_B = 2,8 \text{ k}\Omega$$

$$C_1 = 18 \text{ pF}$$

$$D = 1N4001$$

Inverseurs

Pour l'inversion du signal d'horloge, on a utilisé une porte NAND



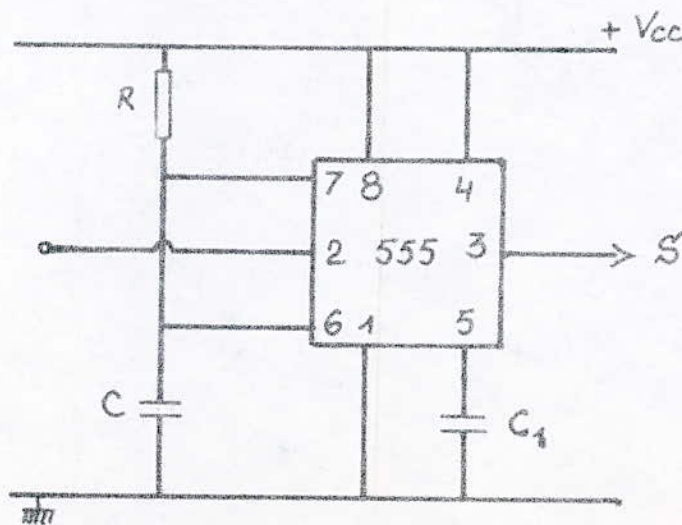
X	X̄
0	1
1	0

Sa réalisation a été faite à l'aide d'un CD4011.

Monostables :

Ils ont été réalisés avec un NE 555.

schéma du montage :



$$T = 1,1 RC = \tau = \frac{2}{3} \cdot \frac{T_H}{2} = \frac{T_H}{3} = \frac{1}{150} \text{ s.}$$

T_H : période de l'horloge (50 Hz)

$$\Rightarrow RC = \frac{1}{165} \text{ s.}$$

Si $C = 4,7 \mu\text{F} \Rightarrow R = 1,29 \text{ K}\Omega$

choix des composants :

$C = 4,7 \mu\text{F}$

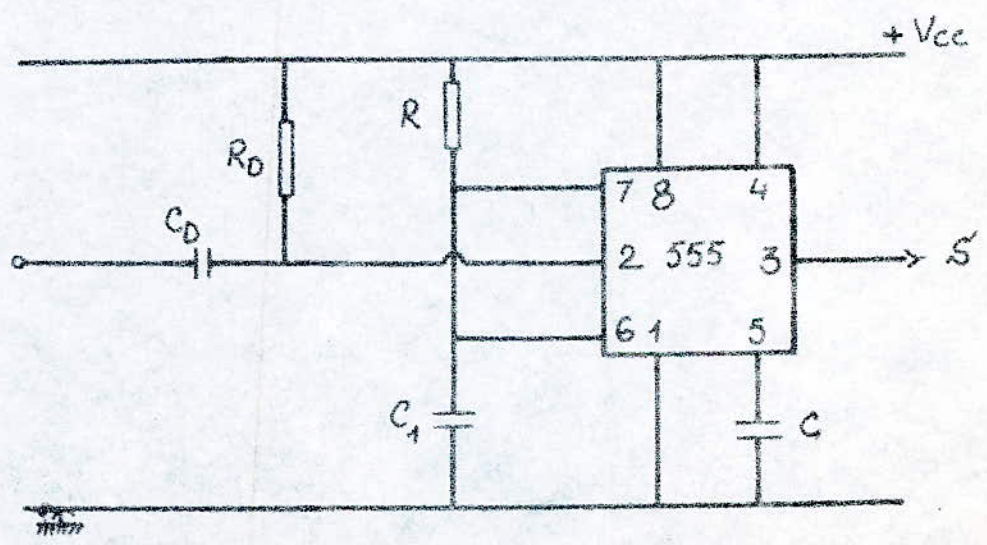
$R = \text{ajustable de } 2,2 \text{ K}\Omega.$

$C_1 = 10 \text{ nF}$

Dérivateurs

Pour fonctionner en monostable le C.I. NE555 doit être déclenché par des impulsions négatives sur la borne 2. Quelques fois, le monostable du schéma précédent s'enclenche de lui même sur les fronts d'impulsions positifs.

Pour remédier à ceci un circuit dérivateur est ajouté à l'entrée 2 comme l'indique la figure suivante :



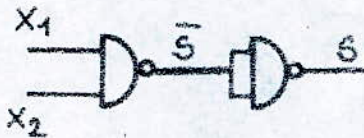
choix des composants :

$$C_D = 0,1 \text{ nF}$$

$R_D = 470 \text{ K}\Omega$ variable pour ajuster les fronts d'impulsions.

Multiplication des signaux

La multiplication des signaux du monostable avec celui de l'horloge de haute fréquence est effectuée à l'aide de portes NAND comme indiqué ci-dessous



X_1	X_2	S
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

La réalisation a été faite à l'aide d'un CD4011.

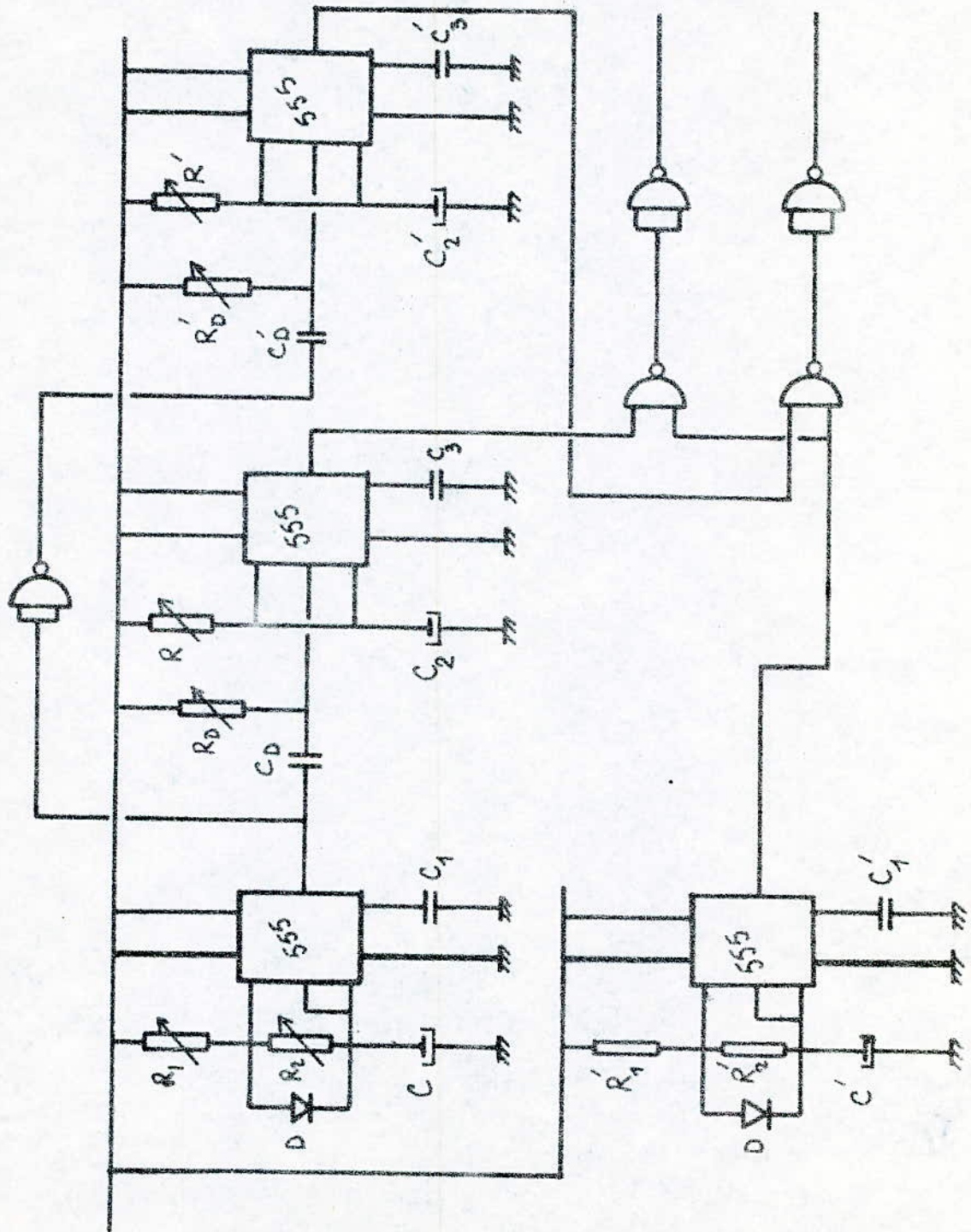
En reliant les différents étages cités précédemment on obtient le schéma de la figure 6

La figure 7 représente le circuit imprimé de cette dernière

3- Amplificateur de courant

Les signaux issus de la commande électronique, ne peuvent pas amorcer les Thyristors. D'où la nécessité d'une amplification en courant.

fig-6- Commande electronique



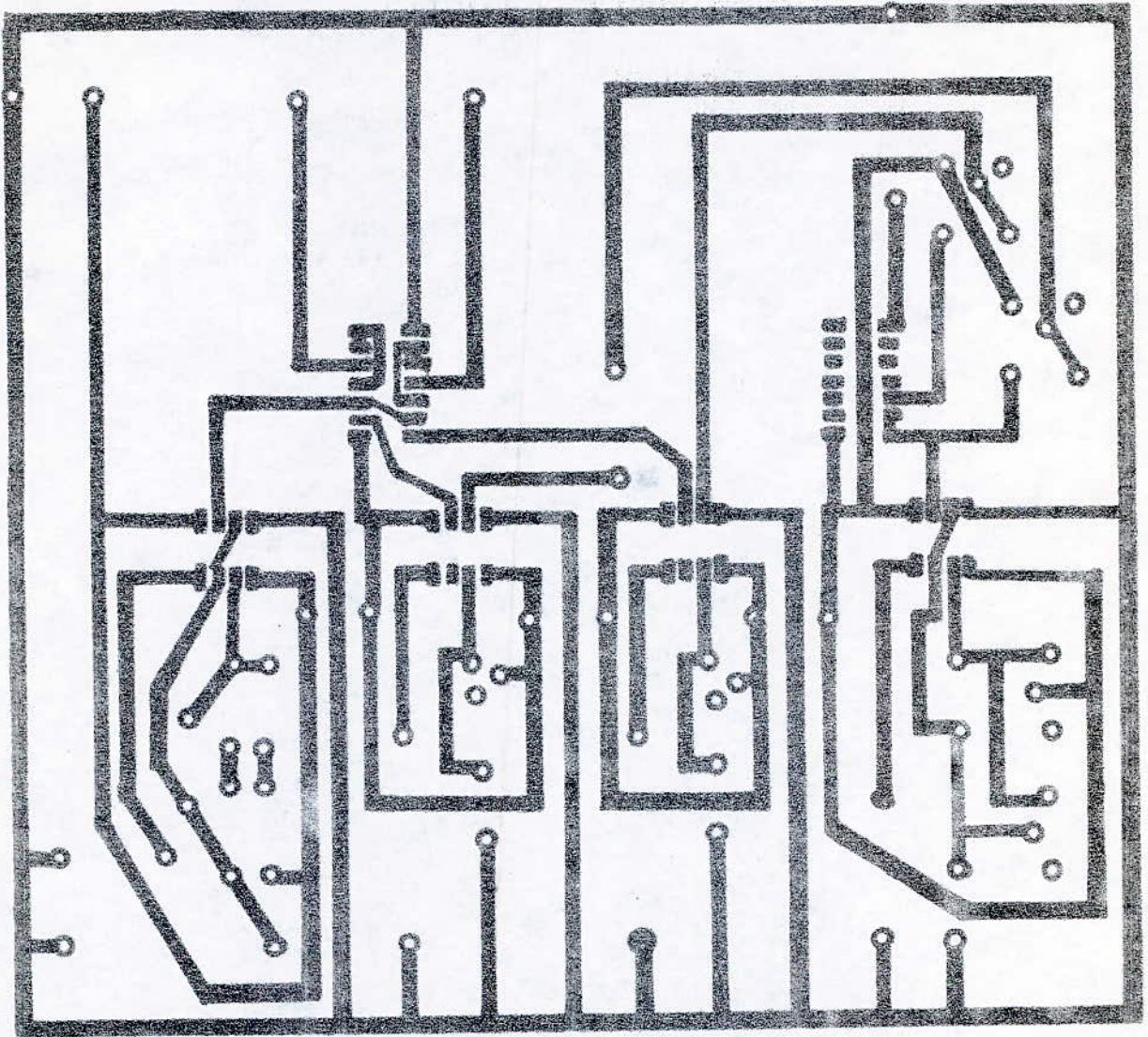
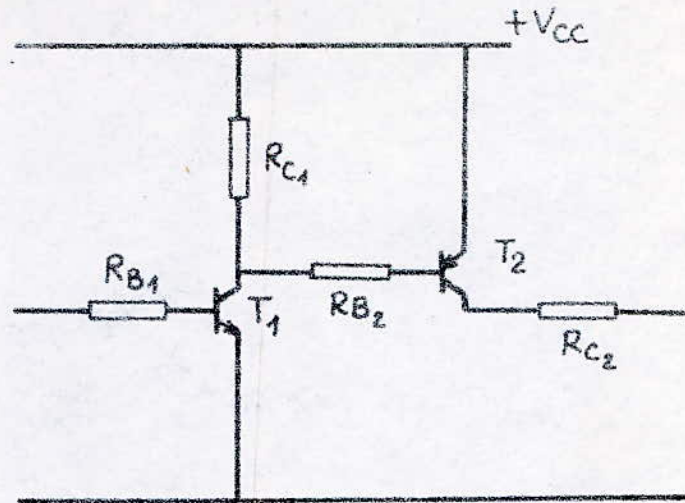


figure 7 - Circuit imprime
(commande electronique)

Schema de principe



Calcul des composants :

Les transistors fonctionnent en régime de commutation.

Pour le transistor T_2 on a :

$$12 = V_{CE2} + R_{C2} I_{C2} + V_{gk} \approx R_{C2} I_{C2} + 5$$

$$\Rightarrow R_{C2} I_{C2} = 12 - 5 = 7 \text{ V}$$

on veut un courant de 50 mA à la sortie :

$$\text{d'où } R_{C2} = \frac{7}{50} = 0,14 \text{ k}\Omega \quad \text{on prend } R_{C2} = 150 \Omega$$

$$\text{on a } P = \frac{1}{2} R_{C2} I_{C2}^2 = \frac{1}{2} 150 \cdot (50 \cdot 10^{-3})^2 = 0,375 \text{ W}$$

on prend une résistance de 1 W pour surdimensionner.

$$\text{on a } I_{C2} = 50 \text{ mA} \Rightarrow I_{B2} > I_{B2 \min} = \frac{I_{C2}}{\beta_{2 \min}} = \frac{50}{100} = 0,5 \text{ mA}$$

$$\Rightarrow R_{B2} < \frac{12 - V_{CE \text{ sat}}}{I_{B2 \min}} = 24 \text{ k}\Omega$$

$$\text{on a pris } R_{B2} = 6,8 \text{ k}\Omega \Rightarrow I_{B2} = 1,76 \text{ mA}$$

$$\text{on a } I_{C1} = I_{B2} + I'_{C1}$$

$$\text{On a } 12V = V_{CEsat} + R_{C_1} I_{C_1}' \approx R_{C_1} I_{C_1}'$$

$$\text{Pour } R_{C_1} = 10 K\Omega \Rightarrow I_{C_1}' = 1,2 \text{ mA}$$

$$\text{d'où } I_{C_1} = 1,76 + 1,2 = 2,96 \text{ mA}$$

$$I_{B_1} > I_{B_{1min}} = \frac{I_{C_1}}{\beta_{1min}} = \frac{2,96}{100} \approx 29 \mu A$$

$$\Rightarrow R_{B_1} < \frac{12}{29} = 413 \text{ k}\Omega$$

$$\text{on a pris } R_{B_1} = 30 \text{ k}\Omega$$

Le schéma général de l'amplificateur de courant est donné par la figure 8 . .

Remarques:

- Les transformateurs d'impulsions sont ajoutés pour l'isolation galvanique de la commande électronique du circuit de puissance .
- L'intensité de gâchette I_G , accuse une valeur fortement négative pendant l'amarçage du thyristor, en quelque sorte, le dipôle gâchette - cathode devient un générateur; d'où la nécessité d'une protection du système de déclenchement par une diode (1N4004) .
- La diode (1N4004) est une diode de roue libre
- Le circuit R-C en parallèle est utilisé pour l'écrêtage des signaux de commande .

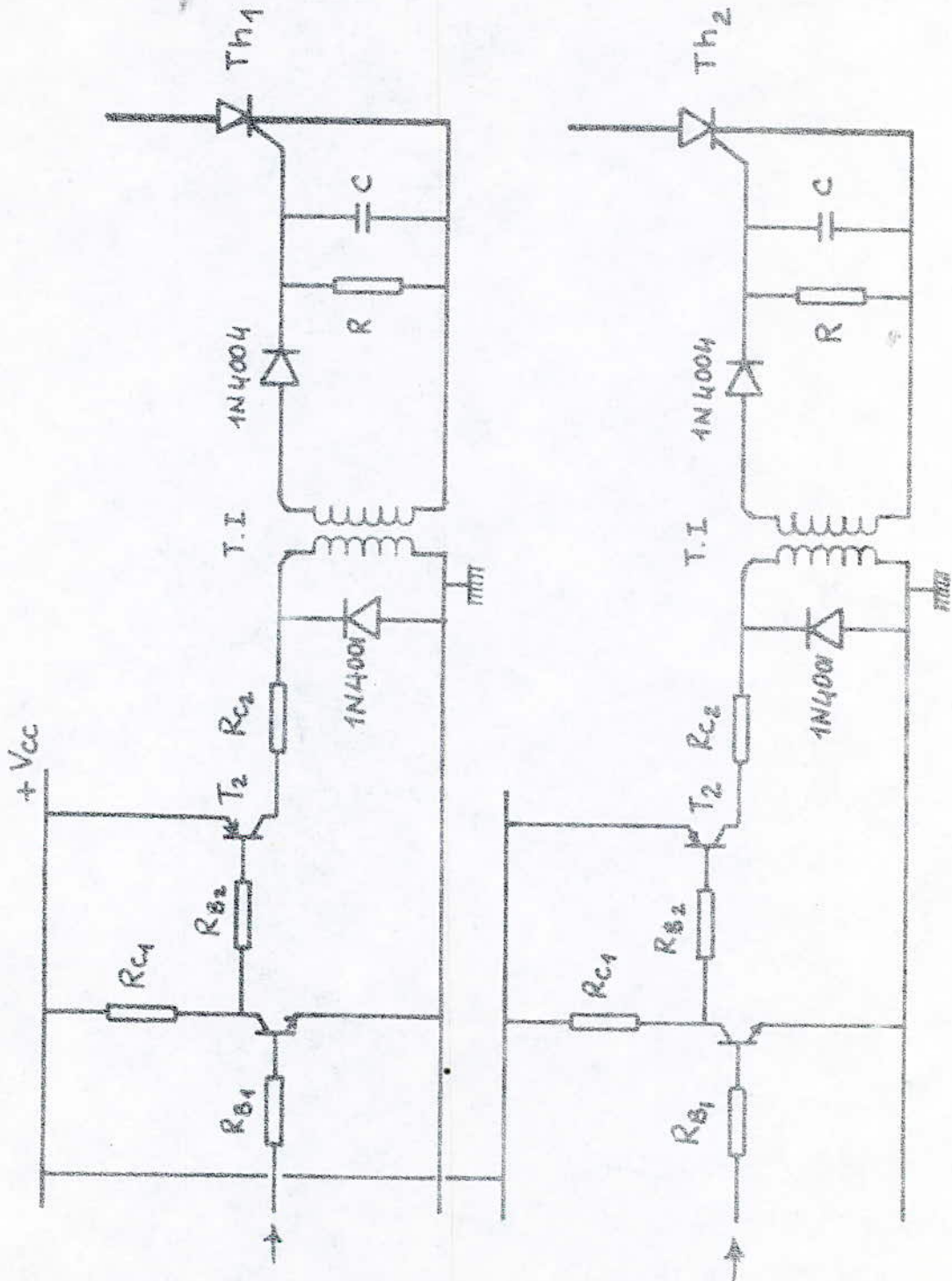
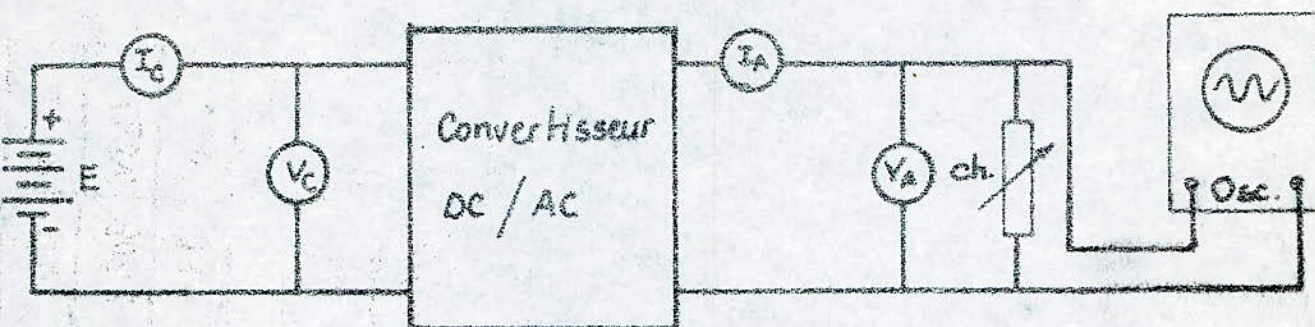


fig-8- Amplificateur de courant

La figure 9 représente le circuit imprimé de l'étage amplificateur.

4. Tests pratiques

Le schéma utilisé pour les tests est le suivant :



Résultats

R	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6
V_C (V)	48	48	47	46	45	44
I_C (A)	6,4	6,2	13,2	15,2	17,2	19,4
P_C (W)	307,2	489,6	620,4	699,2	774	853,6
V_A (V)	230	210	200	184	176	166
I_A (A)	1	1,9	2,65	3,35	3,9	4,5
P_A (VA)	230	399	530	616,4	678,6	747
η	0,748	0,815	0,854	0,881	0,876	0,875

Les courbes $\eta = f(I_A)$ et $V_A = f(I_A)$ sont représentées sur la figure 10.

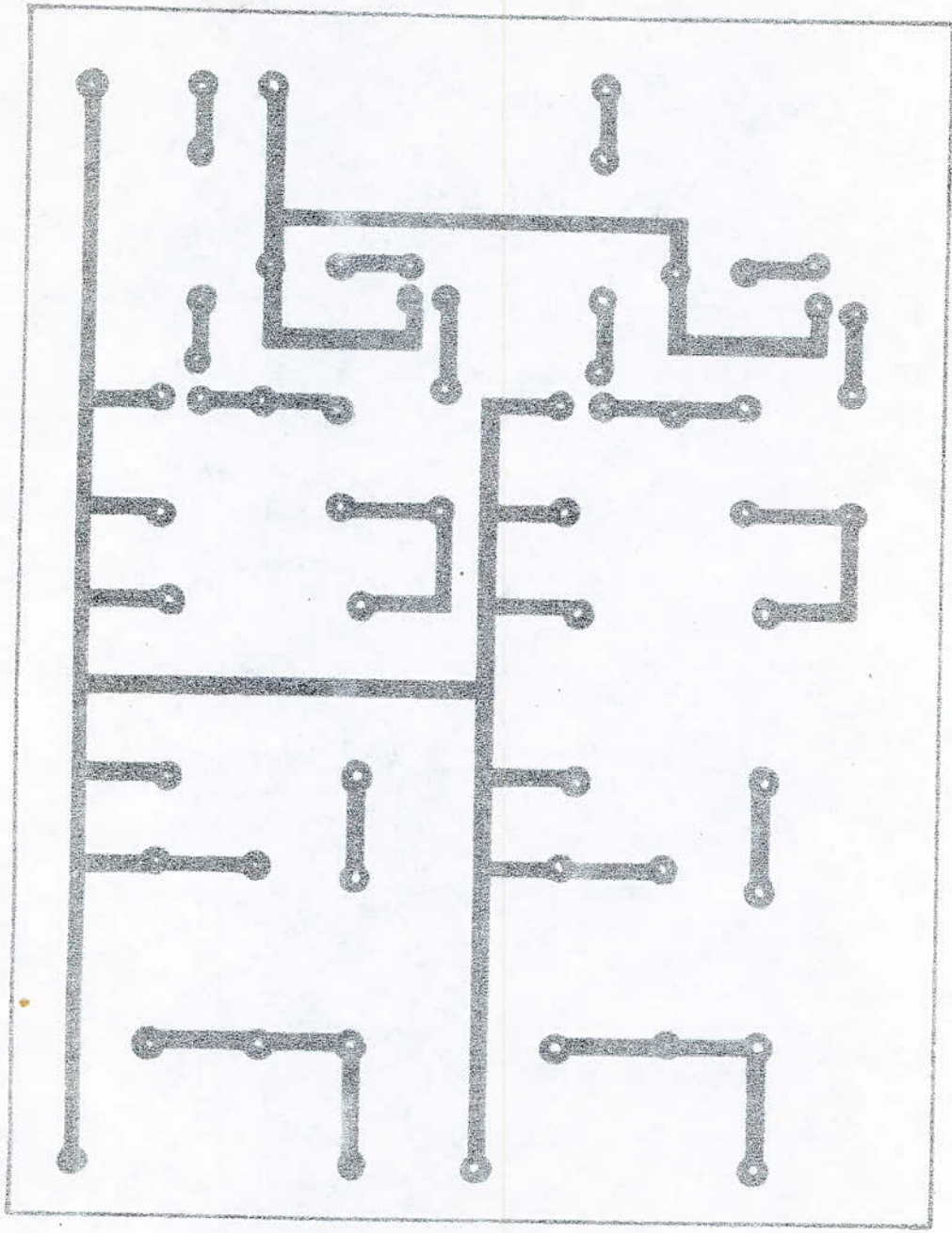


fig-9- Circuit imprime
Amplificateur de courant

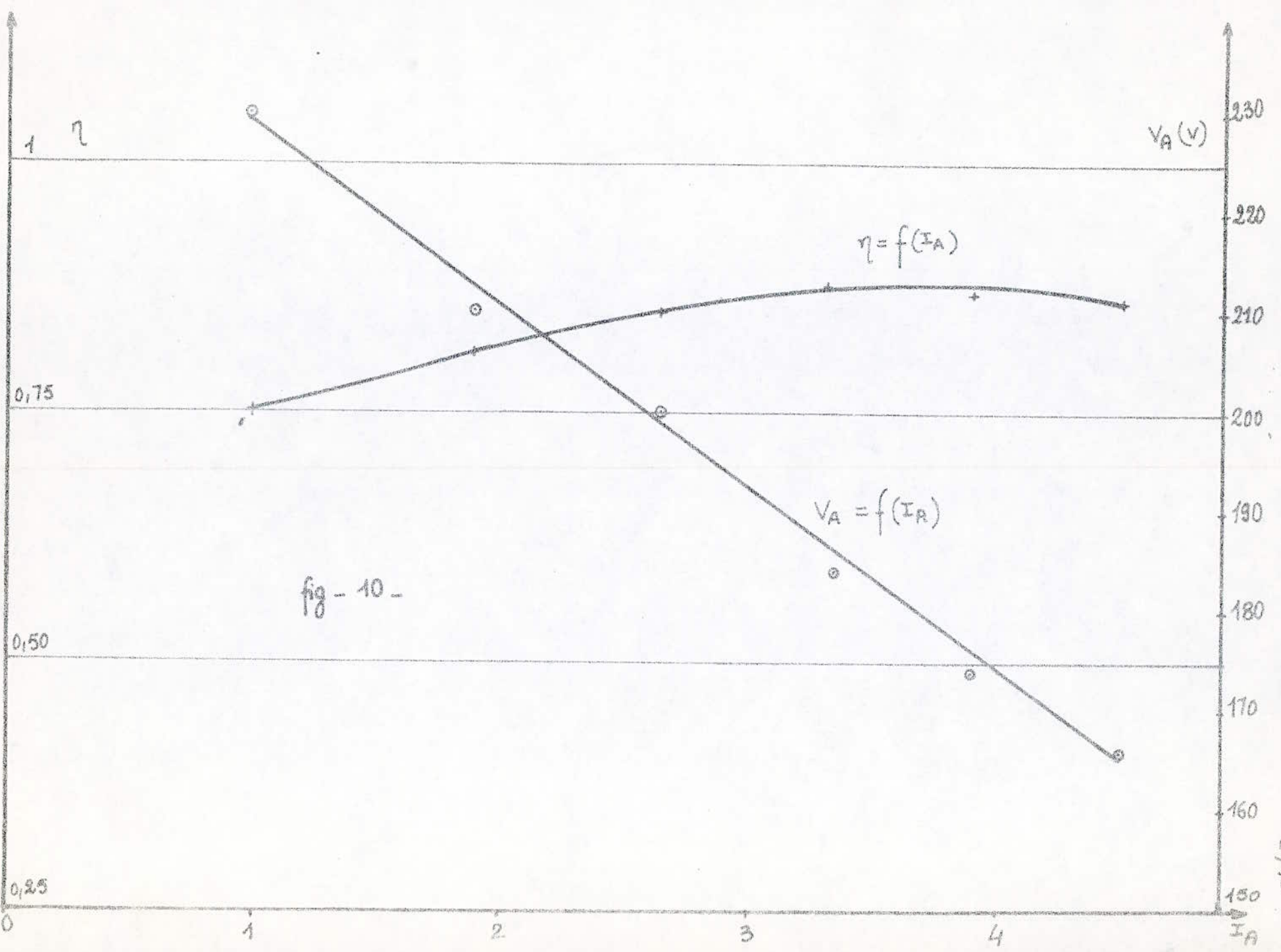


fig - 10 -

Interpretation :

L'interpretation des courbes obtenues, montre qu'un tel montage travaille à une fréquence stable que l'on maîtrise aisément, est insensible à une charge résistive, mais sensible aux charges réactives, et régule fort mal en tension.

IV. Dimensionnement de la centrale Solaire

Arrivés au terme de notre étude, on a pensé qu'il serait avantageux de donner un procédé de dimensionnement d'une centrale électro-solaire prévue pour un usage domestique. Pour dimensionner une centrale électro-solaire, on doit tenir compte de certains critères cités ci-dessous :

- La consommation journalière
- l'autonomie exigée de la centrale en cas de non ensoleillement
- le lieu géographique et le climat dont dépend l'intensité du rayonnement solaire.

Calcul du nombre de panneaux solaires

L'expression du flux d'énergie E recueillie par une surface plane est donnée par :

$$E = E_0 [\cos(L - \theta) \cos \delta \cos H + \sin(L - \theta) \sin \delta]$$

L : latitude ; H = longitude ; δ : déclinaison solaire ;

θ : inclinaison du panneau solaire.

D'après cette expression, le flux direct d'énergie solaire dépend de δ , L , θ , H .

δ , L et H étant fixes pour un lieu et une période donnée, seul θ varie avec la verticale du lieu.

A partir de la relation précédente et pour différents angles d'inclinaison, on dresse le tableau de valeurs représentées ci-dessous :

Mois	declinaison δ en degré	$E_{\theta=0}$ kWhm ² /j	$E_{\theta=L}$ kWhm ² /j	$E_{\theta=60}$ kWhm ² /j	$E_{\theta=90}$ kWhm ² /j
janvier	-20,8	2,82	4,95	5,29	4,48
février	-12,7	3,42	5,16	5,21	4,04
Mars	-1,9	4,12	5,29	4,94	3,32
avril	9,9	4,71	5,21	4,44	2,41
Mai	18,9	5,03	5,01	3,94	1,63
Juin	23,1	5,14	4,87	3,67	1,27
Juillet	21,3	5,10	4,93	3,79	1,43
Aout	13,7	4,86	5,14	4,24	2,09
septembre	3	4,39	5,29	4,76	2,96
octobre	-8,8	3,69	5,23	5,13	3,80
Novembre	-18,4	3,00	5,02	5,28	4,36
decembre	-23	2,65	4,87	5,29	4,59

Puissance moyenne journalière convertie

L'énergie totale annuelle reçue par unité de surface est :

$$W_{\text{tot}} = \int_0^{365} E dt$$

L'expression analytique de la courbe $\theta = L$ est :

$$E = E_{\text{min}} + \frac{E_{\text{max}} - E_{\text{min}}}{2} = \frac{E_{\text{max}} + E_{\text{min}}}{2}$$

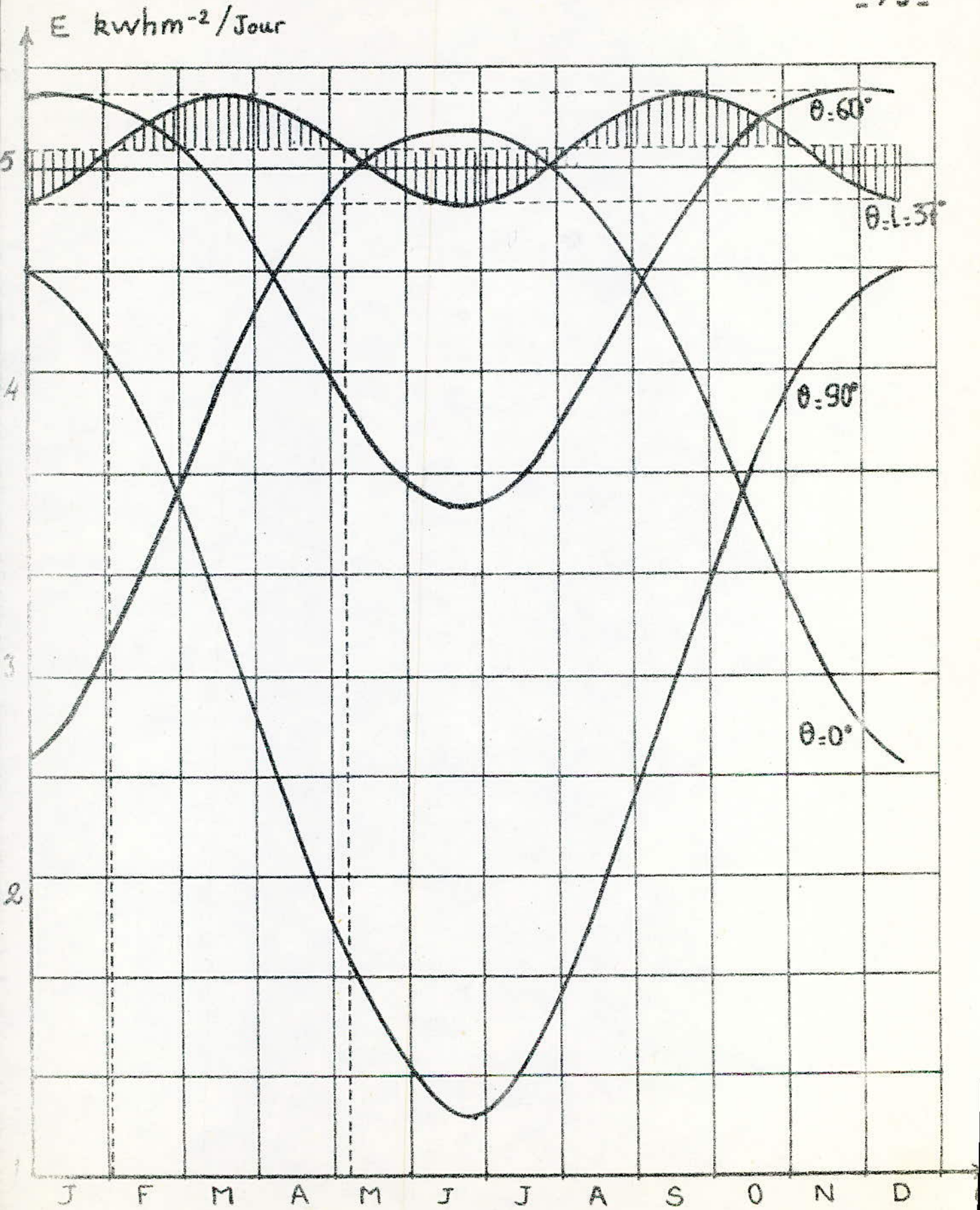


Fig. 44. Variations saisonnières de l'énergie reçue à Algeciras pour diverses θ

d'où : $w_{tot} = 365 \cdot \frac{E_{max} + E_{min}}{2}$ énergie totale annuelle reçue

L'énergie journalière reçue est : $w_m = \frac{w_{tot}}{365} = \frac{E_{max} + E_{min}}{2}$

Déterminons la puissance moyenne journalière P_m reçue par unité de surface.

$$P_m/m^2 = \frac{w_m}{\Delta T} = \frac{E_{max} + E_{min}}{2 \Delta T}$$

ou ΔT = durée d'ensoleillement moyen auquel est soumis un panneau faisant un angle $\theta = 31^\circ$ pendant un jour.

Pour Alger et ses environs : $\Delta T = 10$ heures.

Le panneau de surface S recevra donc une puissance moyenne journalière égale à $P_{m/m} = P_m/m^2 \cdot S$

étant donné que le rendement du panneau est η_p donc la puissance moyenne journalière convertie sera :

$$P_{mconv} = \eta_p \cdot P_{m/j} = \eta_p \frac{E_{max} + E_{min}}{2 \Delta T} \cdot S$$

Puissance moyenne journalière consommée

L'énergie totale journalière consommée s'écrit :

$$w_u = \int_0^{24} E dt = \int_0^{24} E_{min} dt + \int_6^9 (E_{M_1} - E_{min}) \sin \frac{\pi}{3} t dt + \\ + \int_{18}^{24} (E_{M_2} - E_{min}) \sin \frac{\pi}{6} t dt$$

en résolvant l'intégrale on trouve : $w_u = 18,2 E_{min} + 1,9 E_{M_1} + 3,8 E_{M_2}$

A partir de la courbe de la fig 12 on releve :

$$E_{\min} = 0,05 \text{ kWh} ; E_{M_1} = 0,5 \text{ kWh} ; E_{M_2} = 1,5 \text{ kWh}$$

$$\Rightarrow W_u = 7,5 \text{ kWh/j}$$

$$P_u = \frac{W_u}{24} = \frac{7,5}{24} = 0,3 \text{ kWh}$$

Determination du nombre de Panneaux :

Comme la puissance convertie par le panneau est stockée dans des accumulateurs. L'expression de la puissance est fonction du rendement de ces accumulateurs :

$$P_a = \eta_a P_{\text{conv}} = \eta_a \eta_p \frac{E_{\max} + E_{\min}}{2\Delta T} \cdot S$$

cette puissance doit être au moins égale à la puissance demandée par l'utilisateur soit :

$$P_u \leq P_a ; \text{ dans le cas extreme : } P_u = \eta_a \eta_p \frac{E_{\max} + E_{\min}}{2\Delta T} \cdot S$$

$$\Rightarrow S = \frac{P_u}{\frac{E_{\max} + E_{\min}}{2\Delta T}} \cdot \frac{1}{\eta_a \eta_p}$$

$$\text{si : } P_u = 0,3 \text{ kW} \quad E_{\max} = 5,29 \text{ kWh m}^{-2}/\text{j}$$

$$\eta_a = 85\% \quad E_{\min} = 4,87 \text{ kWh m}^{-2}/\text{j}$$

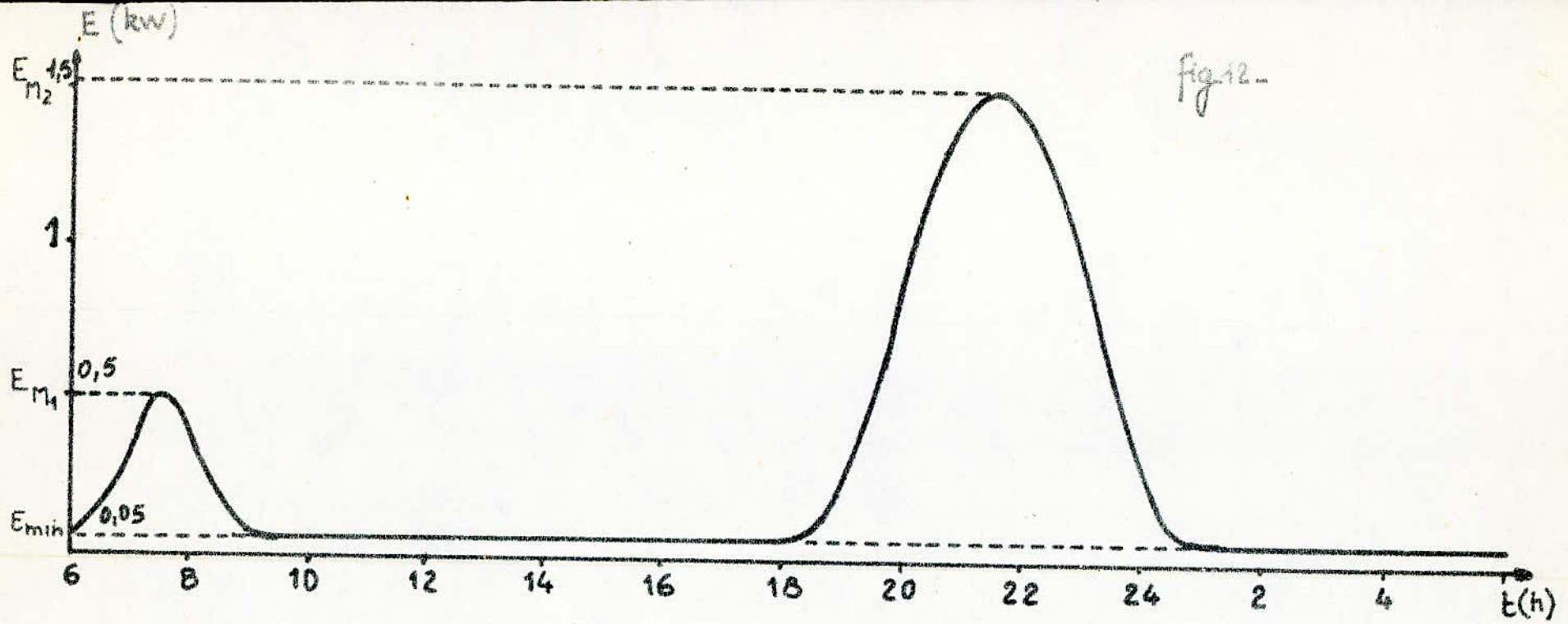
$$\eta_p = 8,5\% \quad \Delta T = 10 \text{ h}$$

$$\text{on a } S = 8,14 \text{ m}^2$$

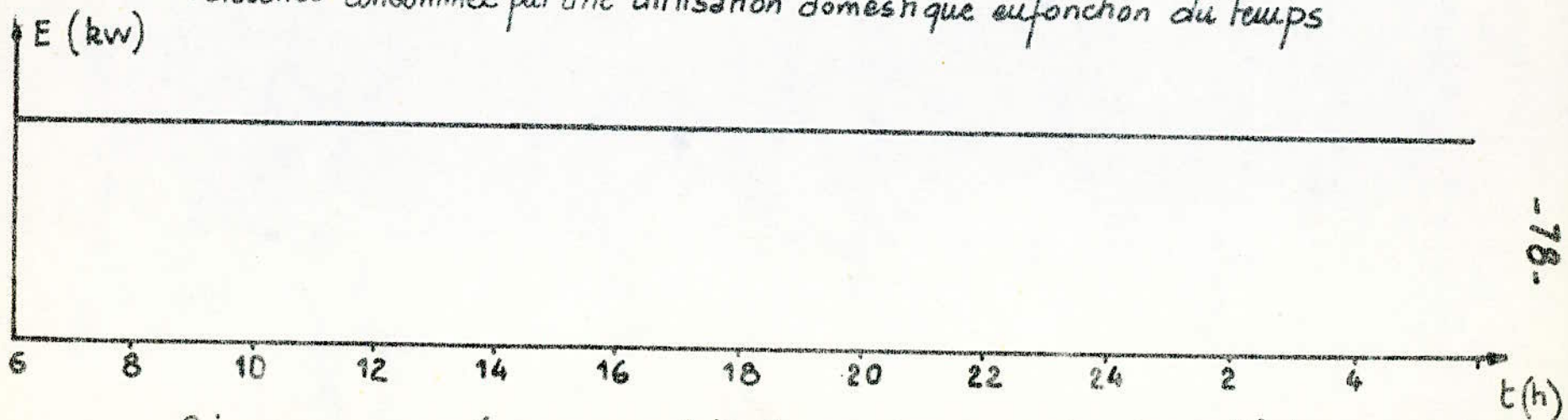
$$\text{d'ou } N = \frac{S}{S_0}$$

N: nombre de panneaux

S_0 : surface d'un panneau



Puissance consommée par une utilisation domestique en fonction du temps



Puissance consommée par une utilisation professionnelle (ex: dispositif de sécurité)

Pour les modules ARCO 162000 ; $S_0 = 0,3675 \text{ m}^2$

$$N = \frac{8,14}{0,3675} = 22,15 \text{ p} \text{ donc } N = 23 \text{ panneaux ARCO 162000.}$$

Pour les modules Photowatt BPX 47400 ; $S_0 = 0,378 \text{ m}^2$

$$N = \frac{8,14}{0,378} = 21,53 \text{ p} \Rightarrow N = 22 \text{ panneaux BPX 47400}$$

Calcul de la Capacité de l'accumulateur :

Le rôle des accumulateurs est de cumuler l'énergie en excès et de fournir l'énergie manquante (car l'énergie arrivant au niveau du sol subit des fluctuations mensuelles).

Si on admet que ya compensation des variations saisonniere et si les batteries ne comportent pas de pertes par auto-decharge, l'excès d'énergie au printemps (ou automne) aura pour

$$\text{expression } \Delta W = \eta_a \eta_p S \int_0^{365} \frac{E_{\max} - E_{\min}}{2} \sin \frac{4\pi}{365} t dt.$$

on trouve :

$$\Delta W = 29 \eta_a \eta_p S (E_{\max} - E_{\min})$$

on doit avoir une autonomie de E_0 .

$$E_0 = \eta_a \eta_p E'_{0 \text{ moy}}$$

$E'_{0 \text{ moy}}$: est tel que l'accumulateur, puisse fournir de l'énergie, pendant 48 heures de non ensoleillement, à l'utilisation

$$E'_{0 \text{ moy}} = 48 P_u$$

$$\text{d'où : } \Delta W_{\text{tot}} = \Delta W + E_0 = 29 \eta_a \eta_p S (E_{\max} - E_{\min}) + 48 \eta_a \eta_p P_u.$$

$$\Delta W = \eta_a \eta_p \left[29 S (E_{max} - E_{min}) + 48 P_u \right]$$

$$S = 22 \times 0,378 = 8,316 \text{ m}^2$$

$$E_{max} = 5,29 \text{ kWh m}^{-2} / \text{j}$$

$$E_{min} = 4,87 \text{ kWh m}^{-2} / \text{j}$$

$$P_u = 0,3 \text{ kW}$$

$$\eta_a = 85\%$$

$$\eta_p = 8,5\%$$

$$\text{d'où : } \Delta W_{tot} = 0,85 \cdot 0,085 \left(29 \cdot 8,316 \cdot (5,29 - 4,87) + 48 \cdot 0,3 \right) \text{ kWh}$$

$$\Delta W_{tot} = 8,36 \text{ kWh}$$

$$\text{d'où } C_{tot} = \frac{\Delta W_{tot}}{U} = 174 \text{ Ah}$$

U : tension nominale de l'accumulateur = 48 V

on prend une sécurité de 20% : on aura $C = \frac{C_{tot}}{0,8} = 217,5 \text{ Ah}$

$$C = 220 \text{ Ah}$$

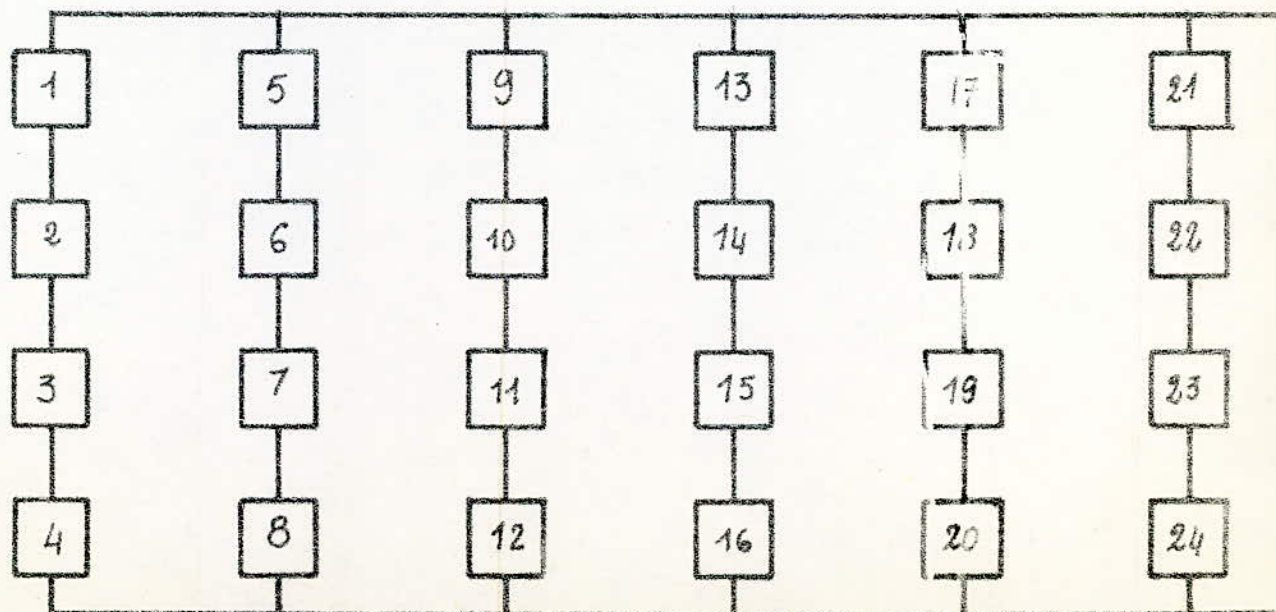
Choix de l'association des panneaux :

$$U = 48 \text{ V} ; N = 22 \text{ panneaux}$$

Comme notre utilisation nécessite une puissance moyenne de 300 W

$$\text{donc } I = \frac{300}{48} = 6,25 \text{ A}$$

Chaque module BPX47400 délivre une tension de 20V, un courant de 2A ; donc on aura la configuration suivante :



Conclusion

Le champ d'application de l'énergie solaire ne cesse de s'agrandir et les réalisations sont de jour en jour plus performantes.

Cependant, les convertisseurs DC/AC de grande puissance ne sont pas encore très disponibles, du fait que les recherches ne se sont pas concentrées dans cette voie.

L'onduleur autonome qu'on a proposé, malgré sa faible puissance, peut jouer le rôle d'un groupe de secours en cas de coupure ou d'absence du réseau, ou de générateur d'énergie électrique alternative à partir de batteries solaires dans les sites isolés.

Malgré les difficultés qu'en a rencontré, on a mené à terme notre étude.

Elle nous a permis ainsi une certaine familiarisation avec l'électronique de puissance.

Bibliographie

- G. Seguiet
 - L'électronique de puissance
- R. RENUCCI
 - Les thyristors
- M. BARRABE . J.L. CHEVALIER
 - Energies nouvelles , Energies pour la vie .
- W. PALZ
 - L'électricité Solaire
- These
 - Etude de quelques Systemes photovoltaïques
- J. Vaillant
 - utilisations et prometteuses de l'énergie solaire

