



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique



جامعة وهران 2 محمد بن أحمد  
Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed

معهد الصيانة والأمن الصناعي  
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

## Departement de Maintenance en Instrumentaion

### MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Génie industrielle  
Spécialité: Mesure-Analyse-Qualité

### Thème

**Etude et mise au point d'un régulateur de tension 12V  
de forte puissance pour les systèmes photovoltaïques**

Présenté et soutenu publiquement par :

**CHAKER ABDERRAHMEN**

**AMALOU ABDELKADER**

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
DJELGHOUM FARIDA	MAA	IMSI	Président
ZEBIRATE SORAYA	Pr	IMSI	Encadreur
BENABED KHADIDJA	MAA	IMSI	Examineur

Juin 2016

# Dédicace

*A mes très chers Parents*

*Aucun mot, aucune dédicace ne peut exprimer mon respect, ma considération et l'amour éternel pour les sacrifices que vous avez consentis pour mon instruction et mon bien être,*

*Votre générosité et votre bonté ont toujours été un exemple pour nous tous*

*Trouvez en ce travail le fruit de votre dévouement, de votre patience et l'expression de ma gratitude et mon Profond amour*

*Je t'aime ma mère , Je t'aime mon père*

*Et sachez que je vous suis reconnaissant*

*A mes très chers frères*

*A mes très chères sœurs*

*Vous m'avez toujours soutenu durant tout mes études, je vous souhaite une vie pleine de joie de bonheur et de réussite*

*A toute ma chère grande famille*

*A mes professeurs et mes enseignants*

*A mes chers amis*

*A tout ceux qui m'aiment*

*A tout ceux que j'aime*

*A tout ceux qui m'ont aidé de près ou de loin*

*Je dédie ce travail avec hommage*

*Abderrahmen CHAKER*

*Abdelkader AMALOU*

# *Remerciements*

*Mes premières pensées et remerciements vont à mes parents, sans qui je n'aurais pas pu accomplir mes projets personnels, plus particulièrement ce mémoire. Leur support et leur soutien ont été sans failles. Je leur dédie pleinement ce mémoire avec un grand Merci*

*Je remercie particulièrement Monsieur N. benabadji professeur à l'université sciences et technologie d'Oran de m'avoir fait l'honneur de me co-encadré pour ce thème de mémoire, Je le remercie pour sa confiance, sa disponibilité ainsi que sa relecture très attentive des deux parties simulation et réalisation.*

*Toute ma gratitude à Madame S. Zebirate, professeur à l'université d'Oran 2 Mohamed ben Ahmed, pour l'honneur qu'elle me fait d'encadrer ce mémoire, sa disponibilité, ses conseils, et sa tolérance, je tiens aussi à lui exprimer ma sincère reconnaissance pour l'aide précieuse qu'elle m'a apporté et mon profond respect à son égard.*

*J'adresse tous mes remerciements à l'ensemble des membres du jury. Je remercie*

*Je remercie aussi mes collègues d'IMSI pour leur support scientifique et le temps consacré à discuter sur le thème de notre mémoire, toute ma sympathie pour l'ambiance sympathique de travail.*

*Une pensée particulière à tous ceux qui de près ou de loin m'ont donné un jour ce petit rayon de soleil synonyme d'amour et de lumière par sa chaleur et son éclat.*

# **ETUDE ET MISE AU POINT D'UN REGULATEUR DE TENSION 12V DE FORTE PUISSANCE POUR SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES.**

## ***Résumé***

Dans un système photovoltaïque, la mise en parallèle de panneaux solaires 12V délivre une tension optimale de 17V, qui peut atteindre 21V à vide. Cette étude est dédiée à la conception suivi d'une réalisation d'un prototype de régulateur de tension 12V, de forte puissance (minimum 100W, facilement extensible à 400W) prévu pour alimenter des dispositifs basse tension (12V) à marge étroite, ne pouvant pas être reliés directement à un panneau solaire 12V, sans risque d'être endommagés. L'étudiant prenant en charge cette étude doit centrer ses recherches pour élaborer une synthèse de schémas conventionnels consacrés à ce domaine, en mettant l'accent sur le rendement (aussi élevé que possible) et l'optimisation du montage à réaliser (dimension, poids, densité des composants et coût).

***Mots clés:*** Système Photovoltaïque, Alimentation Electronique, Régulateur de Tension.

## **STUDY AND DEVELOPMENT OF A HIGH POWER VOLTAGE REGULATOR 12V FOR PHOTOVOLTAIC SYSTEMS.**

## **Abstract**

In a photovoltaic system, the parallel 12 V solar panels deliver maximum voltage 17V, 21V which can reach empty. This study is dedicated to the design followed by production of a 12V voltage regulator prototype, high power (100W minimum, easily expandable to 400W) for powering low voltage devices (12V) narrow margin, unable connected directly to a 12V solar panel, without the risk of being damaged. The student support this study should focus its research to develop a synthesis of conventional schemes devoted to this area, focusing on performance (the highest possible) and optimization of the assembly to create (size, weight, component density and cost).

***Keywords:*** Photovoltaic System, Electronic Supply, Voltage Regulator.

# GLOSSAIRE

<b>IR</b>	Infra Rouge
<b>UV</b>	Ultra Violet
<b>PV</b>	Photovoltaïque
<b>DZ</b>	Diode ziner
<b>V<sub>E</sub></b>	Tension entrée
<b>V<sub>Emin</sub></b>	Tension entrée minimum
<b>VS</b>	Tension de sortie
<b>R1</b>	Résistance 1
<b>R2</b>	Résistance 2
<b>I<sub>Z</sub></b>	Courant ziner fournit par R1
<b>I<sub>S</sub></b>	Courant de sortie
<b>I<sub>b</sub></b>	Courant de base de transistor
<b>ΔVS</b>	Variation de tension de sortie
<b>ΔVBE</b>	Variation de tension d'entrée
<b>R<sub>max</sub></b>	Résistance maximum
<b>LDO</b>	Low Drop Out
<b>PRM</b>	Puissance maximale dans la résistance
<b>PTM</b>	Puissance maximale dans la transistor
<b>PZM</b>	Puissance maximale dans la diode ziner
<b>B</b>	Gain de transistor
<b>VBE</b>	Tension entre base emitter
<b>VZ</b>	Tension de référence de diode ziner
<b>IKA</b>	Courant Anode-Cathode
<b>VKA</b>	Tension Anode-Cathode

<b>VD [V]</b>	Tension de diffusion sur une jonction,
<b>K</b>	Constante de Boltzmann = $1,380662 \cdot 10^{-23} \text{J.K}^{-1}$
<b>[°K]</b>	Température absolue du cristal,
<b>q</b>	Charge élémentaire = $1,602 \cdot 10^{-19} \text{C}$ ,
<b>ND [cm<sup>-3</sup>]</b>	Concentration des donneurs,
<b>NA [cm<sup>-3</sup>]</b>	Concentration des trous,
<b>ni [cm<sup>-3</sup>]</b>	Concentration intrinsèque
<b>Autonome</b>	Installation indépendante du réseau, en général dotée d'un stockage (batteries).
<b>Cellule solaire</b>	Eléments photovoltaïques actifs mis en série dans un module solaire.
<b>Pd</b>	puissance dissipée par effet Joule [W]
<b>Tj</b>	température de jonction du composant [°C]
<b>Ta</b>	température ambiante de l'air [°C]
<b>Rth</b>	résistance thermique [°C/W]
<b>REF</b>	référence

# Sommaire

Introduction générale.....	1
<b>Chapitre I : Généralités sur l'Energie Photovoltaïque .....</b>	<b>3</b>
I.1 Introduction .....	3
I.2.1. Le système terre-soleil.....	4
I.2.2. Trajectoire de la terre.....	5
I.2.3. Plan de l'écliptique Déclinaison $\delta$ .....	5
I.3.1. Lieu géographique latitude et longitude.....	6
I.3.2. Angle horaire.....	6
I.4. Temps solaire – temps légal.....	6
I.5. Energie du soleil.....	7
I.6. Production de l'énergie électrique .....	7
I.6.1 Le rayonnement solaire.....	7
I.6.2 Le générateur photovoltaïque.....	9
I.7 Principe photovoltaïque.....	9
I.7.1 Jonction PN.....	10
I.7.2. Production d'électricité.....	11
I.8. Cellule solaire.....	12
I.9. Différents types de cellules photovoltaïques.....	12
I.10. Fonctionnement des cellules photovoltaïques.....	15
I.11. Conception d'un système photovoltaïque.....	15
I.12. Modules photovoltaïques.....	17

I.12.2. Constitution d'un module.....	17
I.13. Différents types de systèmes photovoltaïques.....	19
I.13.1. Alimentations électriques faibles puissances.....	19
I.13.2. Installations électriques photovoltaïques autonomes.....	19
I.13.3. Installations ou centrale électriques photovoltaïques hybride.....	20
I.13.4. Installations ou centrales électriques photovoltaïques raccordées au réseau.....	20
I.14. Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque.....	20
I.15 Régulateur de tension .....	22
Conclusion.....	24
<b>Chapitre II : Régulateur de tension.....</b>	<b>25</b>
II.1 Introduction .....	25
II.2 Rôle de régulateur à panneau solaire.....	26
II.3 Les différents types de régulateur.....	26
II.3.1 Le régulateur à découpage .....	26
II.3.2 Le régulateur intégré .....	26
II.3.3 Le régulateur à diode zener.....	26
II.3.4 Régulateur série .....	27
II.4. Description du régulateur TL431.....	27
II.5. Régulateur de tension de type LDO.....	28
II.5.1. Caractéristiques des composants.....	29
II.6. Modélisation mathématique.....	29
II.6.1 Stabilisateur série à diode zener et transistor.....	29
II.6.2. Choix des composants .....	30



II.6.3.Coefficients de stabilisation.....	32
II.6.4. Augmentation de la puissance .....	35
II.6.5. Avantages et inconvénients.....	36
II.6.6. Régulateur parallèle.....	37
II.6.7. Montage du TL431 en référence de tension.....	38
II.6.8. TL431 utilisé en comparateur à seuil 2.50V.....	42
II.6.9. Régulation de tension.....	43
II.7. Avantages et inconvénients du régulateur.....	44
II.8. Conclusion .....	44
<b>Chapitre III : Conception et réalisation d'un régulateur de tension .....</b>	<b>45</b>
III.1 Introduction .....	45
III.2.Description du montage .....	46
III.2.1.Etage de régulation de la tension.....	47
III.2.2.Etage de puissance.....	49
III.2.3.Etage de limitation du courant de sortie maximum autorisé .....	52
III.2.4.Les LED témoins de signalisation.....	53
III.2.5.Calcul du radiateur thermique .....	55
III.3.Comparaison entre les résultats théorique et pratique.....	57
III.4.Tableau des composants électronique.....	58
III.5.Conclusion .....	61
Conclusion générale et perspectives .....	62
Références bibliographiques .....	64
Glossaire.....	66
Annexe.....	68

## Table des figures

I.1	Part d`approvisionnement en énergie primaire total en 2006 en France.....	4
I.2	Plan de l`écliptique: l`orbite terrestre et les saisons.....	5
I.3	Trajectoires apparentes du soleil vues par un observateur terrestre .....	7
I.4	Ionisation d`un semi-conducteur (silicium.....	9
I.5	Générateur photovoltaïque raccordée au réseau .....	10
I.6	Cellule amorphe .....	12
I.7	Cellule monocristalline .....	13
I.8	cellule poly-cristalline .....	14
I.9	Principe de Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....	15
I.10	Liaison directe d'un générateur photovoltaïque à une charge.....	15
I.11	Schéma synoptique décrivant le système photovoltaïque le plus général .....	16
I.12	association de des cellules .....	17
I.13	Module photovoltaïque .....	17
I.14	Construction d`un module photovoltaïque .....	18
I.15	Schéma typique d`une installation photovoltaïque autonome.....	20
I.16	Installation ou centrale électrique photovoltaïque raccorde au réseau.....	21
II.1	Régulateur relie avec panneau solaire .....	26
II.2	Un régulateur à diode zener .....	28
II.3	Caractéristique tension courant du TL431.....	29
II.4	Régulateur de tension forte puissance LDO 12V-10A.....	29
II.5	Stabilisateur série à diode zener et transistor.....	29
II.6	Résistance supplémentaire permettant de maintenir en permanence la conduction detransistor .....	30
II.7	Schéma équivalent pour les variations de $v_e$ .....	32
II.8	Schéma pour le calcul de $K$ .....	32
II.9	Schéma pour le calcul de $r_s$ .....	33
II.10	Transformation de schéma pour le calcul de $r_s$ .....	33
II.11	Montage de Darlington pour obtenir un courant plus élevé.....	35
II.12	Equivalent entre un montage Darlington et un transistor.....	35
II.13	Modèles pour les variations d`un montage Darlington .....	36

II.14	Schéma fonctionnel d'un régulateur parallèle réglable .....	37
II.15	Symbole du régulateur parallèle réglable.....	38
II.16	Brochage de régulation parallèle TL431.....	38
II.17	Régulateur TL431 monté en référence de tension 2.50V.....	38
II.18	Comparaison entre les caractéristiques d'une diode zener et celles d'un régulateur parallèle.....	39
II.19	Montage de base du régulateur parallèle.....	40
II.20	Régulateur parallèle pour forts courant.....	40
II.21	Régulateur à transistor série .....	41
II.22	Augmentation du courant avec montage Darlington .....	41
II.23	Combinaison d'un régulateur série et d'un régulateur parallèle.....	42
II.24	Régulateur à transistor série.....	42
II.25	Utilisation TL431 comme comparateur.....	43
III.1	Aperçu du dispositif réalisé.....	46
III.2	Synoptique du montage réalisé.....	46
III.3	Structure interne de la diode zener ajustable TL431.....	47
III.4	Structure interne de la diode zener ajustable TL431.....	47
III.5	Zone de régulation de la diode zener ajustable TL431.....	48
III.6	type d'utilisation de la diode zener ajustable TL431.....	49
III.7	Schéma type d'un régulateur de tension à TL431 et ballast de puissance.....	50
III.8	Schéma type d'un régulateur de tension LDO.....	51
III.9	Solution (régulation + ballast LDO) choisie dans montage.....	51
III.10	Circuit de limitation du courant de sortie maximum.....	52
III.11	Schéma complet de notre régulateur de tension de puissance 12V – 10A.....	53
III.12	Typon du circuit imprimé correspondant.....	54
III.13	ANSI PCB Trace Width Calculator online.....	54
III.14	Quelques types de radiateurs thermiques pour transistors TO3.....	57
III.15	Schéma de montage de régulateur .....	59
III.16	Schéma de régulateur sur plaque d'essai.....	60
III.17	Signal de sortie 12V .....	60
III.18	Schéma de régulateur à l'intérieur.....	61

# INTRODUCTION GENERALE

Les sources d'énergie conventionnelles, obtenues de notre environnement, tendent à échapper avec une rapidité relative due à ses utilisations irrationnelles par l'humanité. Cette origine incontrôlée des énergies naturelles, mène certainement à un accord avec notre système écologique à l'instabilité. La diminution des sources de pétrole, gaz naturel et sources naturelle de charbon mènent à faire un effort de trouver des nouvelles sources d'énergie pour permettre une réduction dans l'utilisation des sources naturelles de combustible, c'est le but souhaité des pays industrialisés du monde.

Dans ce contexte l'énergie solaire apparaît comme une source importante telle que la quantité d'énergie solaire qui arrive sur la surface de la terre dans un jour est dix fois plus que l'énergie consommée à travers l'effet photovoltaïque l'énergie contenue dans la lumière solaire peut être convertie directement à une énergie électrique. Cette méthode de conversion d'énergie présente quelques avantages parmi lesquelles : la simplicité : en construction modulaire, flexibilité d'utilisation, temps court de l'installation et de fonctionnement, régularité élevée et basse maintenance. Dans un autre côté, les systèmes photovoltaïques représentent une source d'énergie électrique silencieuse, sûre, non polluée et renouvelable fortement appropriée pour l'intégration dans les régions urbaines.

Les trois genres de systèmes photovoltaïques que l'on rencontre généralement sont les systèmes autonomes, hybrides et connectés à un réseau. Les deux premiers sont indépendants du service public de distribution d'électricité; on les retrouve souvent dans les régions éloignées.

Bien que fondamental dans la chaîne que représente un système, le module photovoltaïque à lui seul ne peut pas grand chose : pour répondre à un besoin défini, il faut en fait l'associer étroitement à un système complet correspondant à une application bien spécifique.

Un système photovoltaïque sera donc constitué du générateur précédemment décrit, généralement associé à l'un ou plusieurs des éléments suivants:

- le panneau solaire, dont le rôle est de délivrer l'énergie à la charge, ainsi qu'à la batterie
- une gestion électronique (stockage, mise en forme du courant, transfert de l'énergie),
- un stockage palliant la nature aléatoire de la source solaire,

- un convertisseur DC/AC
- une charge en courant continu basse tension ou en courant alternatif standard.

Les systèmes à couplage direct sans batterie (fonctionnement dit aussi “au fil du soleil”). Les appareils d’utilisation sont branchés soit directement sur le générateur solaire, soit, éventuellement, par l’intermédiaire d’un convertisseur continu - continu (adaptateur d’impédance).

Le choix de tel ou tel système se fera en fonction de différents critères simplicité, application, environnement, etc.

L’étude de systèmes photovoltaïques se ramène à l’étude de l’adaptation de la régulation. On recherchera à optimiser le système pour avoir le meilleur rendement d’adaptation du système

Pour les systèmes sans batterie, il y a possibilité d’utilisation direct de cet énergie, c’est pourquoi on a proposé dans ce projet un régulateur de tension forte puissance 170w. Ainsi, l’objectif du présent travail est de développer un régulateur à base de transistor. Cette étude est dédiée à la conception suivi d’une réalisation d’un prototype de régulateur de tension 12V, de forte puissance (minimum 100W, facilement extensible à 400W) prévu pour alimenter des dispositifs basse tension (12V) à marge étroite, ne pouvant pas être reliés directement à un panneau solaire 12V, sans risque d’être endommagés. L’étudiant prenant en charge cette étude doit centrer ses recherches pour élaborer une synthèse de schémas conventionnels consacrés à ce domaine, en mettant l’accent sur le rendement (aussi élevé que possible) et l’optimisation du montage à réaliser (dimension, poids, densité des composants et coût).

Le mémoire est subdivisé en trois chapitres :

1. Le premier chapitre expose une généralité sur les systèmes photovoltaïques, le principe de fonctionnement, et leurs différents types de systèmes PV.
2. Le deuxième chapitre concerne la description du régulateur de tension forte puissance 12V-10 A, ainsi que leur modélisation mathématique
3. Le troisième chapitre traite la partie réalisation de ce régulateur à base de transistors BDX66 et TL431, avec les résultats expérimentales, tout en exposant une comparaison avec les résultats théoriques.
4. Il est normalement prévu qu’une partie de simulation sur Proteus de ce montage de régulateur soit présentée, mais l’absence du transistor BDX66 dans la boîte à outils du matériel de Proteus rend impossible la simulation.
5. En fin une conclusion générale résume le travail réalisé et les perspectives futures.

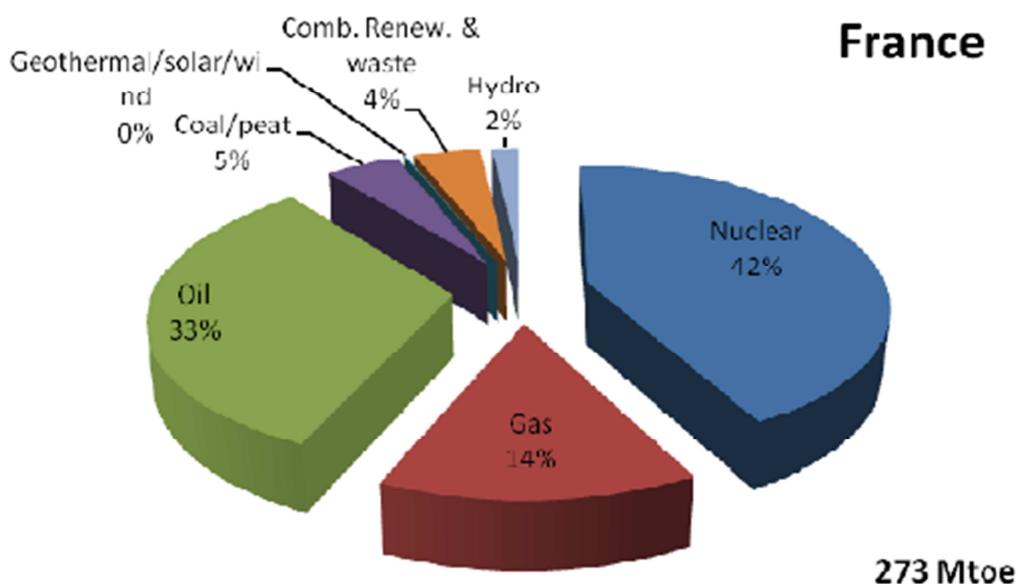
# CHAPITRE I

## *Généralités sur l'Energie Photovoltaïque*

### **I.1 introduction**

Au rythme de la consommation actuelle des ressources énergétiques les gisements d'énergies fossiles (charbon, pétrole et gaz) et fissiles (uranium), même me selon les scénarios les plus extrêmes, ne représentent plus que quelques dizaines d'années ou au mieux un peu plus d'un siècle pour le cas du charbon. La situation est d'autant plus alarmante que la demande énergétique va en grandissant. Le photovoltaïque, ayant comme source le soleil (énergie quasi inépuisable à l'échelle humaine), se positionne comme une solution à l'épuisement des ressources d'énergies fossiles. Malheureusement, bien que la production d'énergie renouvelable soit en forte expansion ces dernières années, plus de 80% de la production d'énergie en France provient encore des énergies fossiles et fissiles [1]. D'après la figure 1.1., sur les 273 TEP (tonne-équivalent pétrole) produits en 2006, les énergies renouvelables (géothermique, solaire et éoliens) ne fournissent que 0,1%, chiffre

qui peut sembler dérisoire mais en continuelle évolution (+30% par an d'après les chiffres de EDF). En effet, au-delà du caractère « propre » des énergies renouvelables, ces dernières présentent l'avantage de pouvoir être produites par de petits systèmes isolés appelés system de production de centralisée.



**Figure I.1.** Part d'approvisionnement en énergie primaire total en 2006 en France (source Agence Internationale de l'Energie).

Dans le cas du photovoltaïque, suivant la proximité d'un réseau électrique ou non [2], [3] et afin d'assurer la continuité de la fourniture d'énergie électrique, il sera parfois nécessaire d'ajouter un système de stockage.

Dans ce chapitre, avant de détailler la production de l'énergie solaire photovoltaïque, il nous semble opportun de décrire le principe photovoltaïque permettant de transformer la lumière en électricité ainsi que les différents paramètres pouvant influencer son fonctionnement. Nous procéderons aussi à une étude approfondie des différents moyens de stockage d'énergie et en dernière partie, une étude détaillée sera consacrée aux deux moyens de stockage choisis pour notre étude.

## I.2. Géométrie solaire

### I.2.1. Le système terre-soleil

Le soleil est une sphère de matière gazeuse, composée principalement d'hydrogène et d'hélium, dont le diamètre atteint environ 1.4million de km.

### I.2.2. Trajectoire de la terre

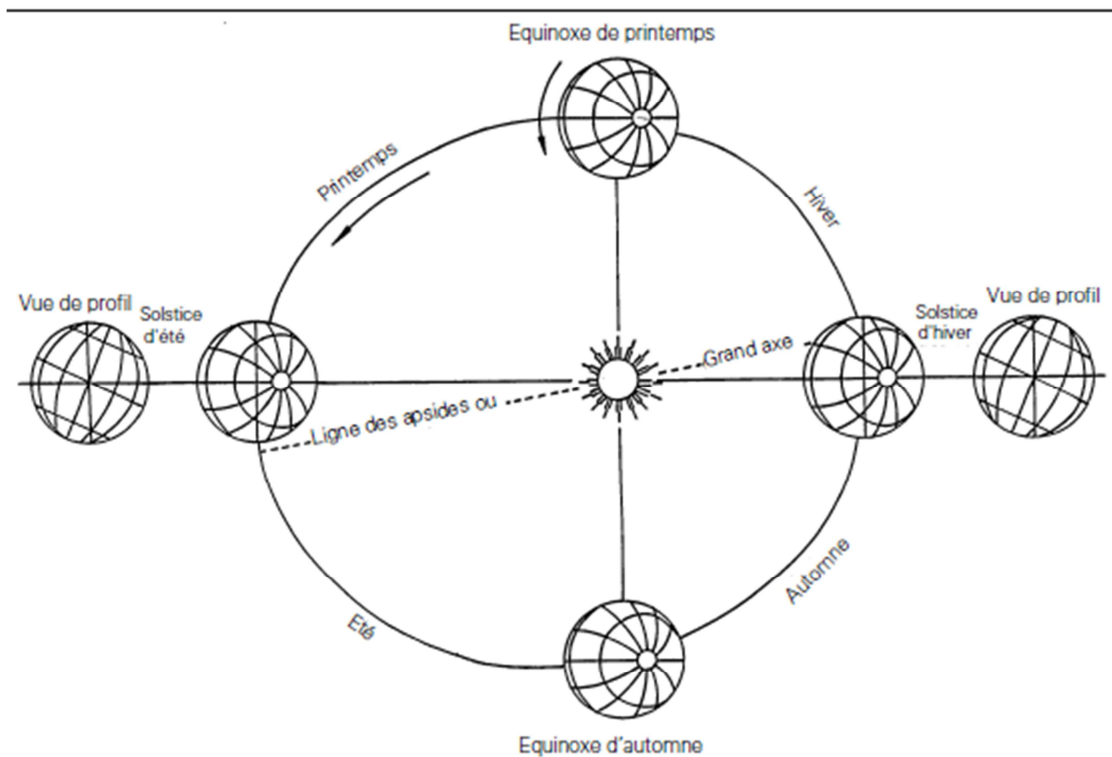
La terre décrit autour du soleil une trajectoire légèrement elliptique dont le soleil occupe l'un des foyers (figure 1.2). Sa distance moyenne est de 149.6 millions de km, avec une variation de  $\pm 1.7\%$ . La terre traverse le grand axe de l'ellipse le 2 janvier (position la plus proche) et le 2 juillet (la plus éloignée du soleil). Depuis la terre, le diamètre apparent du soleil est vu sous un angle de  $0.5^\circ$ .

### I.2.3. Plan de l'écliptique Déclinaison $\delta$

L'axe de rotation de la terre sur elle-même est incliné de  $23^\circ 27'$  par rapport au plan de l'écliptique (plan de l'orbite terrestre). On appelle déclinaison l'angle formé par l'axe terre-soleil avec le plan de l'équateur à un moment donné de l'année. La déclinaison  $d$  vaut donc  $+ 23^\circ 27'$  au solstice d'été,  $- 23^\circ 27'$  au solstice d'hiver, et est nulle aux équinoxes. Dans l'approximation d'une trajectoire circulaire, la déclinaison s'écrit, pour chaque jour de l'année :

$\sin \delta = 0.4 \cdot \sin t$ , où  $t$  désigne la coordonnée angulaire de la terre en prenant l'équinoxe

De printemps pour origine.



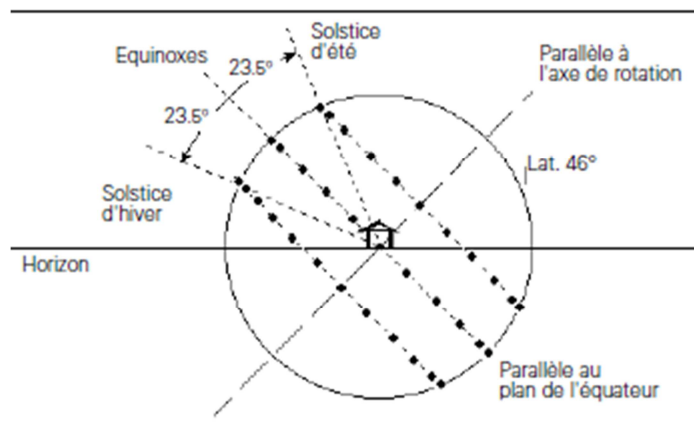
**Figure I.2.** Plan de l'écliptique: l'orbite terrestre et les saisons



### I.3. Trajectoire du soleil

#### I.3.1. Lieu géographique latitude et longitude

Toute application solaire nécessite la connaissance du mouvement apparent du soleil pour un point donné de la surface terrestre, caractérisé par sa latitude (positive pour l'hémisphère Nord) et sa longitude (définie par rapport au méridien de Greenwich, positivement vers l'est).



**Figure I.3.** Trajectoires apparentes du soleil vues par un observateur terrestre: pour un jour donné.

Le soleil décrit un cercle centré sur l'axe de rotation de la terre, déplacé à un angle  $d$  par rapport au plan parallèle à l'équateur.

Pour un observateur terrestre, en considérant la déclinaison comme constante sur une journée, le soleil décrit un cercle autour de l'axe de rotation de la terre (figure 1.3). Ce cercle est parallèle au plan de l'équateur, et sa hauteur apparente sur ce plan est donnée par la déclinaison.

#### I.3.2. Angle horaire

Au cours de la journée, l'instant où le soleil passe par le méridien du lieu de l'observateur – c'est-à-dire où il est au sud dans notre hémisphère – est le midi «vrai». Pour un instant quelconque, l'angle horaire AH est l'angle, projeté sur le plan de l'équateur, entre le soleil et le midi vrai ; il vaut  $15^\circ$  par heure ( $360^\circ / 24h$ ).

### I.4. Temps solaire – temps légal

#### Temps solaire vrai (TSV)

La durée du jour est définie par le passage du soleil à la verticale d'un méridien donné, correspondant à un tour de la terre sur elle-même, augmenté de l'arc décrit autour du soleil durant la

journée. Cependant, l'écart entre deux passages n'est pas strictement constant au cours de l'année, pour les deux raisons suivantes :

- L'orbite de la terre est elliptique, et l'arc parcouru diffère selon la loi des aires de Kepler. Cette contribution suit un comportement sinusoïdal d'amplitude  $\pm 7.8$  minutes;
- L'obliquité de l'axe de rotation induit une seconde correction, ayant l'allure d'une sinusoïde avec une période de 6 mois, et une amplitude de  $\pm 10$  minute.

## I.5. Energie du soleil

### *Energie renouvelable*

L'énergie qui nous vient du soleil représente la quasi-totalité de l'énergie disponible sur terre. Outre l'apport direct sous forme de lumière et chaleur, elle est à l'origine de la biomasse (photosynthèse):

- Du cycle de l'eau, des vents, des courants océaniques et, sous forme stockée, de nos réserves de gaz, pétrole et charbon. Les seules ressources énergétiques non solaires sont la chaleur de la terre (géothermie, moins de  $1 \text{ W/m}^2$ ), les marées et l'énergie nucléaire (fission et peut-être fusion).
- Nos réserves d'uranium sont très faibles (quelques dizaines d'années). Les énergies fossiles ne sont pas inépuisables, mais surtout leur utilisation mène à une libération de  $\text{CO}_2$  qui modifie l'équilibre
- Global du bilan thermique de la planète par l'effet de serre. Si bien qu'à long terme, la seule solution viable pour l'homme, en attendant les réacteurs à fusion nucléaire (encore hypothétiques), est de se restreindre aux énergies renouvelables: solaire, hydraulique, vent, biomasse, marées et énergie thermique des mers.

## I.6. Production de l'énergie électrique photovoltaïque

### 1.6.1. Le rayonnement solaire

Le rayonnement émis par le soleil comporte des ondes électromagnétiques dont une partie, appelée le rayonnement solaire, ne cesse de parvenir à la limite supérieure de l'atmosphère terrestre. En raison de la valeur prise par la température superficielle du soleil environ  $5800^\circ\text{K}$ , l'énergie de rayonnement électromagnétique transmise à la terre provient essentiellement de l'émission d'ondes lumineuses qui se situent dans le visible (entre  $0,4$  et  $0,7 \text{ } \mu\text{m}$  de longueur d'onde environ) et le proche infrarouge (entre  $0,7$  et  $4 \text{ } \mu\text{m}$  environ) ;

Cette énergie, moyennée sur une année et sur l'ensemble de la limite supérieure de l'atmosphère, correspond à un éclairage de quelque  $340 \text{ N.m}^{-2}$ . Mais sur cette quantité d'éclairage qu'apporte le soleil au système terre-atmosphère, environ  $100 \text{ N.m}^{-2}$  sont réfléchis vers l'espace: le reste est absorbé, pour un tiers par l'atmosphère et pour les deux tiers par la surface terrestre [4]. Tout d'abord, près du quart de cet éclairage incident est réfléchi dans l'espace par l'atmosphère : pareille réflexion est essentiellement le fait des nuages (environ  $65 \text{ N.m}^{-2}$ ), le reste étant dû aux autres constituants atmosphériques — gaz et aérosols — qui réfléchissent environ  $15 \text{ N.m}^{-2}$ . En outre, l'atmosphère et ses nuages prélèvent par absorption  $80 \text{ W.m}^{-2}$  environ sur l'éclairage solaire : restent donc approximativement  $180 \text{ W.m}^{-2}$  qui parviennent à la surface terrestre au terme d'une transmission dont à peu près les deux tiers se font directement, le reste s'effectuant par diffusion vers le bas ; c'est grâce à ce rayonnement diffus que l'on peut voir sans interruption pendant le jour, même quand les nuages cachent le soleil.

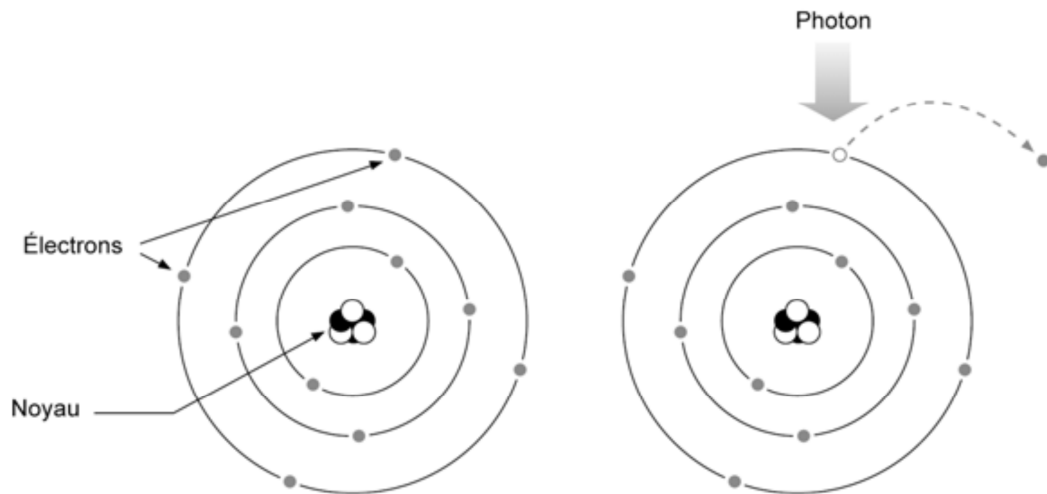
On assiste à un processus assez complexe d'interaction entre diffusion vers le bas et réflexion : la surface terrestre, possédant un albédo moyen élevé (l'albédo est la fraction d'un rayonnement incident diffusée ou réfléchi par un obstacle), devrait renvoyer dans l'atmosphère environ  $50 \text{ W.m}^{-2}$  sur les quelque  $180 \text{ W.m}^{-2}$  incidents ; mais en fait, la majeure partie de l'éclairage qu'elle réfléchit ainsi lui revient tôt ou tard par diffusion vers le bas depuis le milieu atmosphérique et s'ajoute partiellement aux  $130 \text{ N.m}^{-2}$  de rayonnement solaire non réfléchis à son contact. Bien qu'il n'existe pas dans la réalité deux instants distincts pour l'absorption par la surface terrestre, mais un phénomène continu d'absorption du rayonnement solaire, on peut résumer le processus précédent en disant que tout se passe comme si les  $50 \text{ W.m}^{-2}$  réfléchis par cette surface se répartissaient entre  $20 \text{ W.m}^{-2}$  définitivement renvoyés vers l'espace interplanétaire après diffusion vers le haut à travers l'atmosphère et  $30 \text{ W.m}^{-2}$  retournant à la surface terrestre après diffusion différée vers le bas. Ces  $30 \text{ N.m}^{-2}$  s'ajoutent aux  $130 \text{ N.m}^{-2}$  initialement non réfléchis pour constituer approximativement les  $160 \text{ N.m}^{-2}$  — pratiquement la moitié du rayonnement solaire — qu'absorbe la surface terrestre. En ramenant toutes les couches de l'atmosphère dans des conditions normales ( $P= 1013 \text{ mbar}$  et  $t= 25^\circ\text{C}$ ), on a défini une atmosphère standard d'épaisseur verticale moyenne de  $7,8 \text{ km}$  prise pour référence unité et formée de couches planes et stratifiées composées par les divers gaz comme l'azote (couche de  $6150 \text{ m}$ ), l'oxygène ( $1650 \text{ m}$ ), l'argon ( $74 \text{ m}$ ), le gaz carbonique ( $24 \text{ m}$ )... L'eau est représentée par une couche d'épaisseur variable de quelques dizaines de mètres pour la vapeur et de quelques centimètres pour le liquide.

## I.6.2. Le générateur photovoltaïque

La cellule photovoltaïque ou encore photopile est l'élément constitutif des modules photovoltaïques. Un panneau photovoltaïque est constitué de plusieurs modules, ces derniers étant constitués de plusieurs cellules en série afin d'obtenir une tension souhaitée. Le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque consiste en une conversion d'énergie lumineuse (solaire) en énergie électrique : c'est l'effet photovoltaïque, une des propriétés électriques des semi-conducteurs [5].

## I.7. Principe photovoltaïque

Les systèmes photovoltaïques utilisent des cellules (photopiles) pour convertir la radiation solaire en électricité, quand la lumière atteint la cellule, cela crée un champ électrique à travers les couches, créant ainsi un flux électrique, plus la lumière est intense, plus le flux électrique est important. La photopile, est fabriquée à l'aide de matériaux semi-conducteurs Dans un semi-conducteur, les électrons contenus dans la matière ne peuvent circuler que si on leur apporte une énergie pour les libérer de leurs atomes. Quand la lumière pénètre dans Un semi-conducteur, ses photons apportent une énergie permettant aux électrons de se libérer et de se déplacer dans la matière, il y a donc courant électrique sous exposition à la lumière.

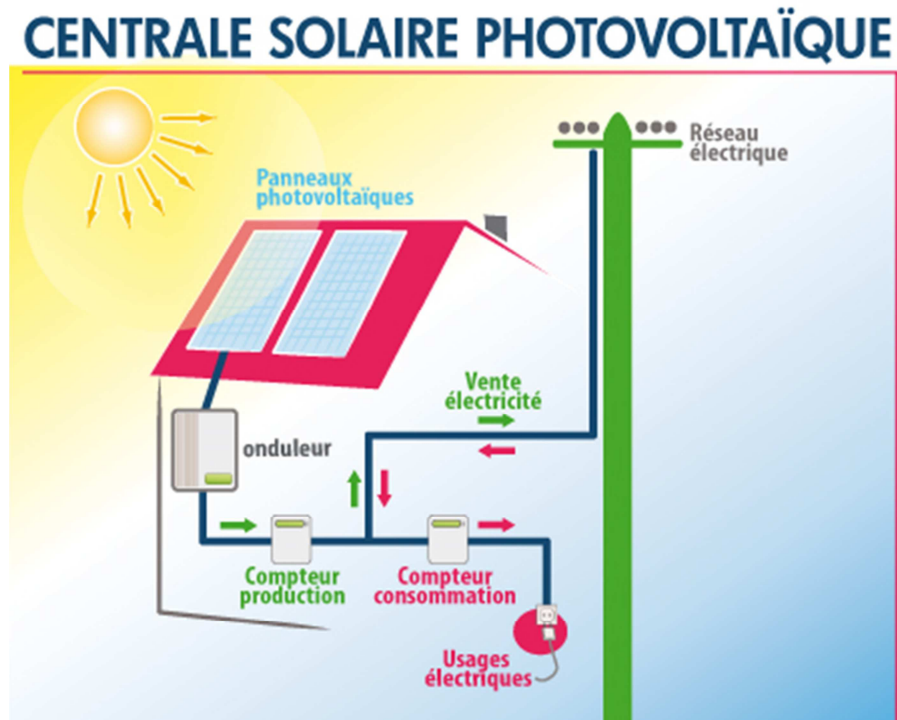


**Figure I.4.** Ionisation d'un semi-conducteur (silicium)

Le matériau semi-conducteur le plus communément utilisé dans les est le silicium(Si), un élément présent en grande quantité dans le sable. En tant que matière première, sa disponibilité est sans limite ; le silicium est le second matériau le plus abondant sur terre.

Pour fonctionner, un système photovoltaïque n'a donc pas besoin d'une lumière du soleil éclatante. Il génère aussi de l'électricité par temps nuageux.

Les éléments les plus importants d'un système photovoltaïque sont les cellules, éléments de base de l'unité qui collectent la lumière du soleil ; les modules, qui rassemblent un grand nombre de cellules au sein d'une unité et dans certains cas, les onduleurs, qui transforment l'électricité générée en électricité utilisable au quotidien.



**Figure 1.5.** Générateur photovoltaïque raccordée au réseau

### I.7.1. Jonction PN

Une jonction P-N est créée par la mise en contact d'un semi-conducteur dope N (Donneurs d'électron) et d'un semi-conducteur dope P (compose de trous). L'interface entre ces deux régions s'appelle une jonction. Pour réaliser des cellules photovoltaïques, il existe trois configurations de jonctions :

- Une jonction PN (homo-jonction, i.e. : les deux régions sont constituées d'un même matériau semi-conducteur, du silicium dans la majorité des cas)
- Une hétérojonction (jonction entre deux semi-conducteurs différents)
- Une jonction métal-semi-conducteur.

Dans ces trois configurations, les phénomènes physiques intervenant dans le fonctionnement des cellules photovoltaïques sont similaires [6].

Les électrons de la jonction se déplacent vers la région P et les trous vers la région N. Il ne reste que des atomes ionisés fixes. Cette zone (dite de déplétion) de porteurs libres est appelée « zone de charge d'espace » créant un champ électrique. En dehors, le champ électrique est nul.

Dans une homo-jonction à l'équilibre thermodynamique, à la frontière des deux régions, il s'est formé pendant le processus de déplétion, une barrière de potentiel ( $V_D$ ) (tension de diffusion).  $N_D N_A n_i^2$ .

$$V_D = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_D N_A}{n_i^2}\right) \quad (1.1)$$

- $V_D$  [V] Tension de diffusion sur une jonction,
- $k=1,380662 \cdot 10^{-23}$  J.K<sup>-1</sup> Constante de Boltzmann,
- $T$  [°K] Température absolue du cristal,
- $q = 1,602 \cdot 10^{-19}$  C Charge élémentaire,
- $N_D$  [cm<sup>-3</sup>] Concentration des donneurs,
- $N_A$  [cm<sup>-3</sup>] Concentration des trous,
- $n_i$  [cm<sup>-3</sup>] Concentration intrinsèque,

avec,

$$V_T = kT/q = 26 \text{ mV à la température ambiante.}$$

Les cellules solaires photovoltaïques sont souvent des jonctions dissymétriques, c'est-à-dire qu'un dopage est plus fort que l'autre. Dans ce cas, la zone de charge d'espace se trouve pratiquement dans la région la plus faiblement dopée.

### I.7.2. Production d'électricité

La cellule solaire est le lieu où la conversion d'énergie lumineuse en énergie électrique se produit. La puissance électrique résultant de cette conversion dépend du flux et de la répartition spectrale de l'énergie spectrale. [9]

Dans une cellule photovoltaïque basée sur une jonction PN une excitation lumineuse crée, aux alentours de la jonction, des paires électron-trou qui se déplacent sous l'influence du champ électrique de la jonction.

Le matériau semi-conducteur le plus communément utilisé dans les cellules photovoltaïques est le silicium (Si), un élément présent en grande quantité dans Le sable. En tant que matière première, sa disponibilité est sans limite ; le silicium est le second matériau le plus abondant sur Terre.

### **I.8. Cellule solaire**

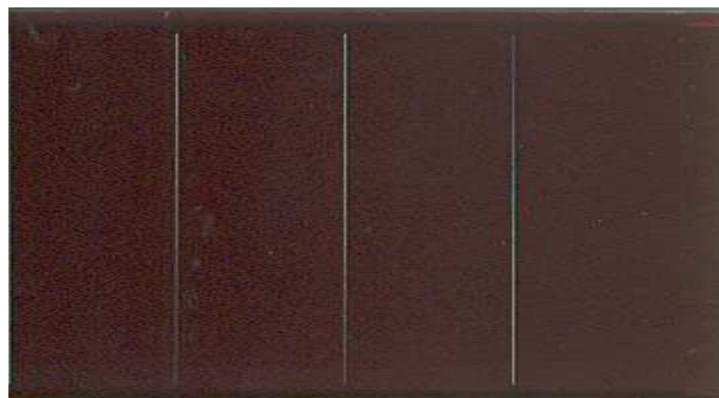
La cellule solaire au silicium est une diode de grandes dimensions avec des caractéristiques de fabrication et d'aspect bien particulières. Lorsqu'on s'intéresse à capter la lumière avec un cristal de silicium, on s'aperçoit que le silicium réfléchit 30 % de la lumière reçue [2] dans les longueurs d'onde utiles à la surface de la terre. Ce phénomène est dû à l'indice de réfraction élevé du silicium, passant de 2 dans le proche IR à 7 dans l'UV. Ceci impose l'ajout d'une couche anti-reflets à la surface du silicium si l'on veut améliorer quelque peu le rendement. Une autre propriété à étudier est de déterminer à quelle profondeur dans le cristal il faut fabriquer la jonction pour optimiser le rendement.

### **I.9. Différents Types de Cellules Photovoltaïques**

Les cellules photovoltaïques sont des composantes optoélectroniques qui Transforment directement la lumière solaire en électricité par un processus appelé « effet photovoltaïque », qui a été découverte par E. Becquerel en 1839. Elles sont réalisées à l'aide de matériaux semi-conducteurs, c'est à dire ayant des propriétés intermédiaires entre les conducteurs et les isolants. [10] Ces composantes se diffèrent selon leur fabrication et rendement, comme :

#### **I.9.1. Cellule en silicium amorphe (rendement : 6 à 10%)**

Ce silicium lors de sa transformation, produit un gaz, qui est projeté sur une feuille de verre. La cellule est grise très foncé. C'est la cellule des calculatrices et des montres dites « solaires »



**Figure I.6.** Cellule amorphe

### ***1.9.1.1. Avantages***

- Fonctionne avec un éclairage faible ou diffus (même par temps couvert, y
- Compris sous éclairage artificiel de 20 à 3000 lux),
- Un peu moins chère que les autres techniques,
- Intégration sur supports souples ou rigides.

### ***1.9.1.2. Inconvénients***

- Rendement faible en plein soleil, de 5 % à 7 %,
- Nécessité de couvrir des surfaces plus importantes que lors de l'utilisation de Silicium cristallin (ratio WC/m<sup>2</sup> plus faible, environ 60 Wc/m<sup>2</sup>),
- Performances qui diminuent avec le temps dans les premiers temps d'exposition à la lumière naturelle (3-6 mois), pour se stabiliser ensuite (-10 à 20 % selon la structure de la jonction).

## **I.9.2 Cellule en silicium monocristallin (rendement : 13 à 17%)**

Lors du refroidissement (la dernière étape de sa fabrication), le silicium fondu se solidifie en ne formant qu'un seul cristal de grande dimension. On découpe ensuite le cristal en fines tranches qui donneront les cellules. Ces cellules sont en général d'un bleu uniforme. [7]



**Figure I.7** Cellule monocristalline



### ***1.9.2.1. Avantages***

- Bon rendement, de 14 % à 16 % (~150 Wc/m<sup>2</sup>) ;
- Nombre de fabricants élevé.
- 

### ***1.9.2.2. Inconvénients***

- coût élevé ;
- rendement plus faible sous un faible éclairement ou un éclairement diffus ;
- baisse du rendement quand la température augmente.

## **1.9.3. Cellule en silicium poly-cristallin (rendement : 11 à 15%)**

Pendant le refroidissement du silicium dans une lingotière, il se forme plusieurs cristaux. La cellule photovoltaïque est d'aspect bleuté, mais pas uniforme, on distingue des motifs créés par les différents cristaux.



**Figure 1.8.** cellule poly-cristalline

### ***1.9.3.1. Avantages***

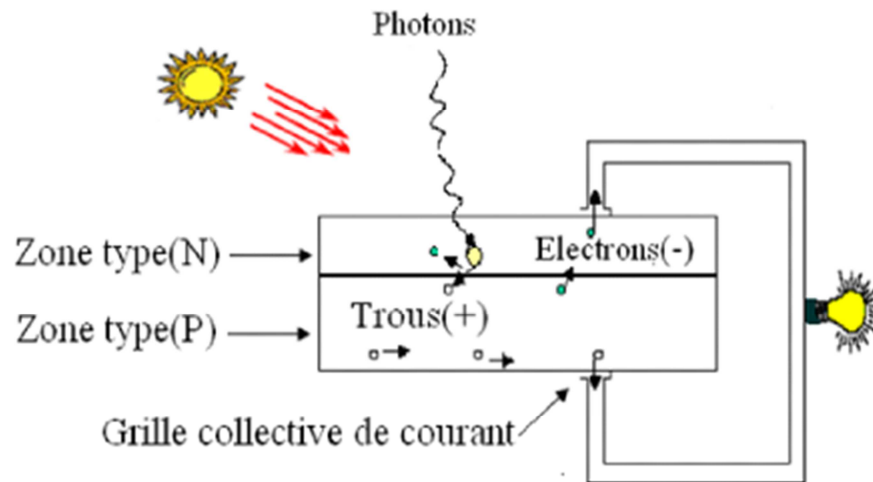
- Cellule carrée (à coins arrondis dans le cas du Si monocristallin) permettant un meilleur foisonnement dans un module,
- Bon rendement de conversion, environ 100 Wc/m<sup>2</sup>, mais cependant un peu moins bon que pour le monocristallin, Rendement de 9 à 11 %
- Lingot moins cher à produire que le monocristallin.

### ***1.9.3.2. Inconvénients***

- Rendement faible sous un faible éclairement ou soleil.

### I.10. Fonctionnement des cellules photovoltaïques

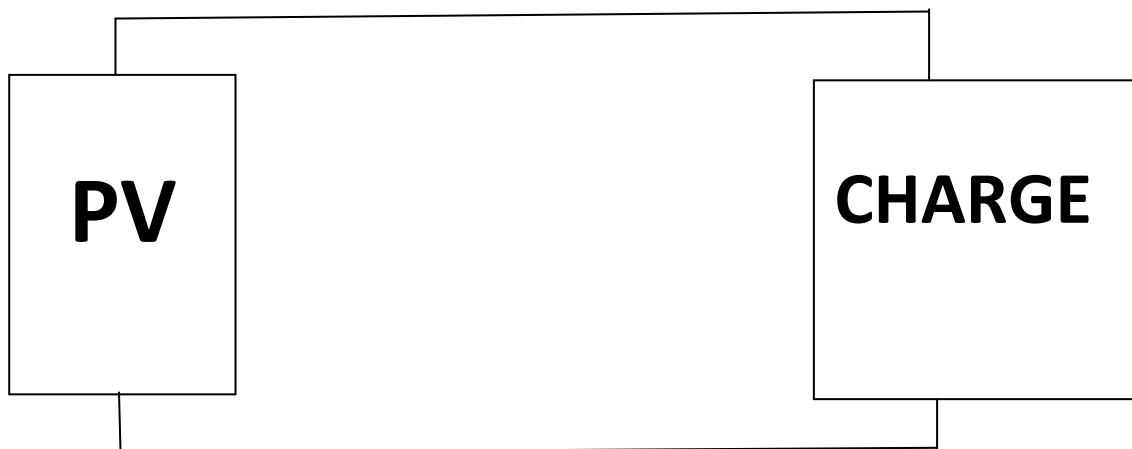
Une cellule photovoltaïque reste l'élément de base de tout générateur photovoltaïque quelle que soit la puissance considérable demandée. Pour prévoir ses performances, il est très important de connaître son modèle mathématique. Pour but de simulation et de conception, plusieurs chercheurs ont étudié la cellule photovoltaïque en employant différents modèles.



**Figure 1.9.** Principe de Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.

### I.11. Conception d'un système photovoltaïque

L'installation photovoltaïque la plus simple que l'on puisse concevoir se compose d'un champ photovoltaïque formé d'un ou plusieurs modules connectés en série ou en parallèle, et d'une charge qui utilise directement l'énergie produite figure (1.2) :



**Figure 1.10.** Liaison directe d'un générateur photovoltaïque à une charge.

Une telle installation a le mérite d'être simple mais elle ne fournit un effet utile que pendant les périodes ensoleillées. Elle ne convient que pour quelques applications, notamment dans les applications de pompage, car il est possible de remplir un réservoir d'eau pendant les périodes ensoleillées et de l'utiliser en dehors de ces périodes. [8]

Cette installation n'assure pas une utilisation optimale de l'énergie photovoltaïque, on doit veiller lors de la conception d'une installation à choisir les éléments tels qu'une adaptation raisonnable se réalise spontanément dans toutes les conditions d'utilisation (niveau d'ensoleillement, température ambiante, la demande de la charge...). On est donc amené à ajouter entre la source et la charge un circuit d'interface, généralement un convertisseur électronique de puissance où les pertes occasionnées par ce circuit seront compensées par une meilleure exploitation de l'énergie photovoltaïque.

Compte tenu des fluctuations permanentes des conditions de fonctionnement, il faut aussi prévoir un système de commande automatique, ainsi que divers capteurs : de courant, de température, etc....

En plus, pour assurer une meilleure autonomie au système, il faut ajouter un élément de stockage d'énergie.

Généralement, un système photovoltaïque comprend les différents éléments indiqués par-là La Figure 1 représente symboliquement les divers éléments du système le plus général. Dans la pratique, bien sûr, les systèmes utilisent les éléments appropriés au type de charge et aux conditions locales.

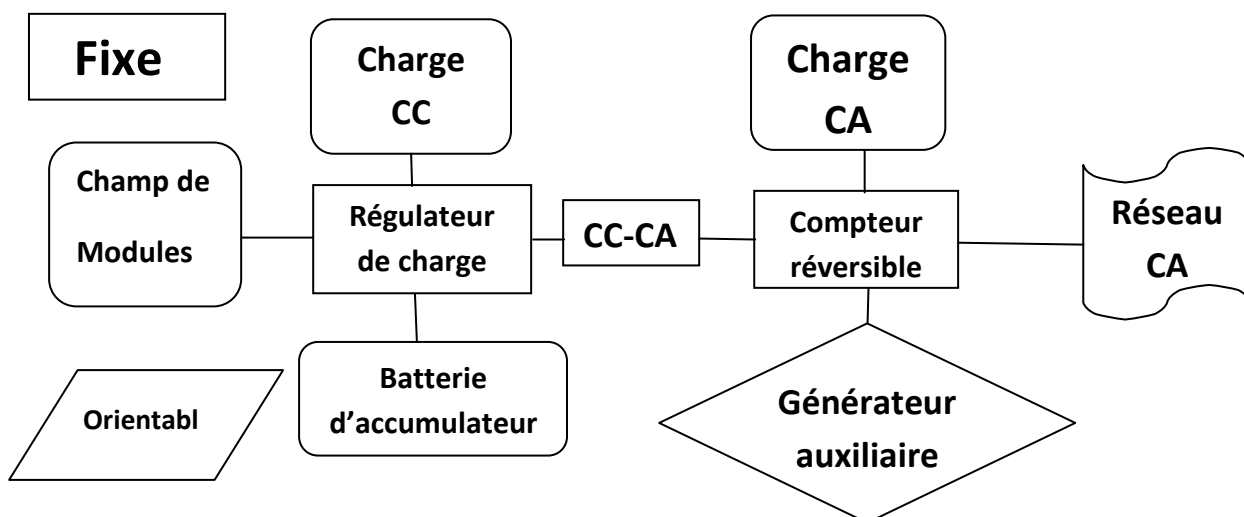
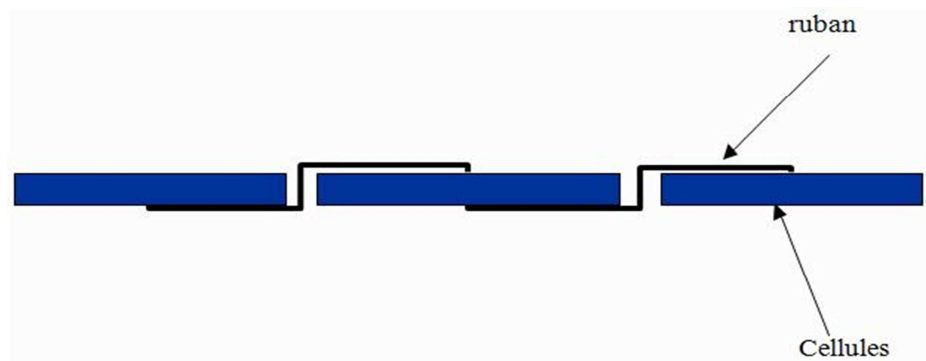


Figure 1.11. Schéma synoptique décrivant le système photovoltaïque le plus général.

## I.12. Module photovoltaïque

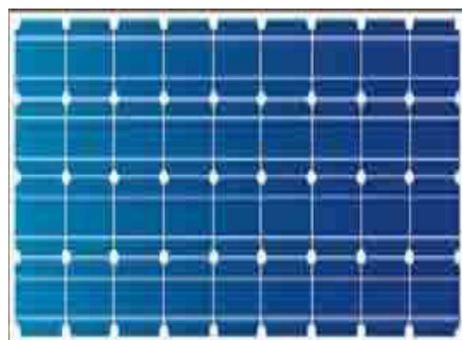
### I.12.1 Association des cellules

Afin d'obtenir des modules de puissances élevées, les cellules sont associées en série ou en série / parallèle. Pour cela les connexions des pôles négatives situées sur les faces avant des cellules sont connectées aux pôles positifs situés sur les faces arrière des cellules suivantes. [7]



**Figure 1.12.** association de des cellules

Le module photovoltaïque transforme l'énergie solaire en énergie électrique. Il joue donc le rôle de générateur dans le système photovoltaïque. L'énergie produite par un module photovoltaïque dépend du niveau de l'énergie solaire. Ainsi, durant la journée, l'énergie produite va varier en fonction de la variation de l'énergie solaire. Le module photovoltaïque est obtenu après association des cellules avec les éléments constitutifs ci-après :



**Figure 1.13.** Module photovoltaïque

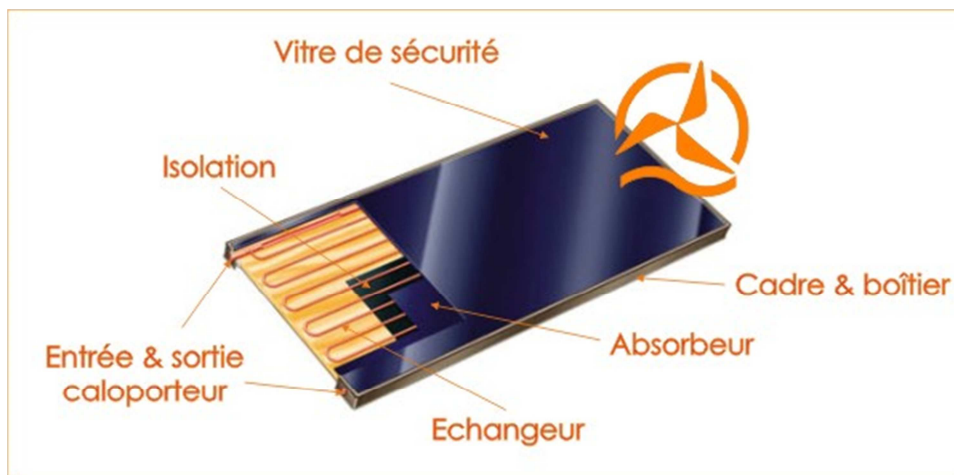
### I.12.2. Constitution d'un module

Un module est constitué des cellules associées en série/parallèle encapsulées et protégées par :

### a. En Face avant du module

La face avant du module doit être en verre ayant les caractéristiques suivantes :

- Bonne transparence
- Résistance à l'impact et à l'abrasion (grêle, jet de pierres, vent de sable, nettoyage au chiffon).
- Etanchéité à l'humidité.



**Figure 1.14.** Construction d'un module photovoltaïque

### b. Enrobage des cellules ayant les caractéristiques suivantes

- Transparence (à l'avant)
- Souplesse pour « enrober » les cellules et connexions.
- Adéquation aux indices optiques du verre et des cellules.

Le matériau généralement utilisé est de l'Acétate d'éthylène-vinyle (EVA).

### c. En Face arrière, un matériau ayant les caractéristiques suivantes

- Protection mécanique contre le poinçonnement et les chocs (risque de mise à nu et de bris des cellules).
- Etanchéité à l'humidité.
- Bonne évacuation de la chaleur.
- La face arrière est généralement réalisée soit en verre (modules dits « bi-verre ») soit en composite tesla/alu/tesla (plus fragile).

### d. Un Boîtier de connexion qui permet

- le repérage des sorties (+, -, éventuellement point milieu),
- la connexion et le passage des câbles de liaison,

- le logement des diodes de protection,
- l'étanchéité à l'humidité.

#### *e. Un joint périphérique*

Il évite les pénétrations d'humidité entre la face avant et la face arrière.

#### *f. Un cadre*

- Il permet le montage et la fixation mécanique, tout en participant si nécessaire à la rigidité du module. Il doit résister à la corrosion (inox, aluminium...) et la visserie doit être choisie afin d'éviter des problèmes de corrosion.
- Le cadre est généralement en aluminium ou en aluminium anodisé avec une visserie en matériau inoxydable.

### **I.13. Différents types de systèmes photovoltaïques**

#### **I.13.1. Alimentations électriques faibles puissances**

Il s'agit des alimentations électriques faibles telles que les calculettes ou les chargeurs de piles. Des modules photovoltaïques (PV) peuvent faire fonctionner n'importe quel appareil alimenté par des piles.

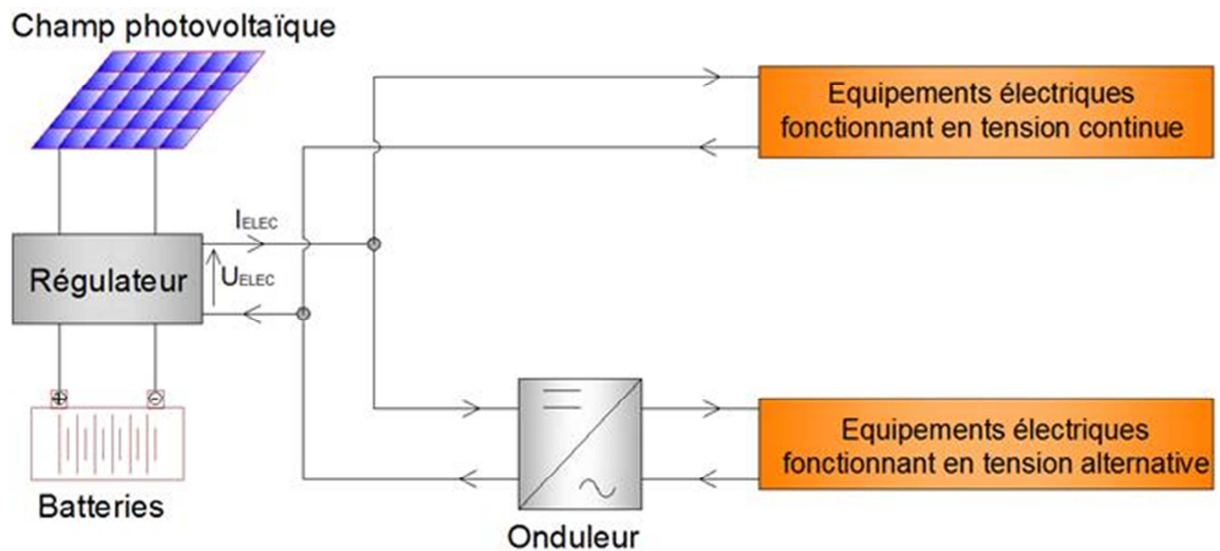
#### **I.13.2. Installations électriques photovoltaïques autonomes**

En site isolé, le champ photovoltaïque (figure 1.15) peut fournir directement l'énergie électrique nécessaire pour faire fonctionner les récepteurs (éclairage et équipement domestique). Un système de régulation et une batterie d'accumulateurs permettent de stocker l'énergie électrique qui sera ensuite utilisée en l'absence du Soleil. Les batteries sont utilisées pour stocker l'énergie électrique sous une forme chimique. Elles restituent l'énergie électrique au besoin selon ses caractéristiques. Le régulateur de charge a pour fonction principale de protéger la batterie contre les surcharges et les décharges profondes. Il est un élément essentiel pour la durée de vie de la batterie. En site isolé, on peut aussi utiliser des récepteurs fonctionnant en courant alternatif. Dans ce cas, l'installation comprendra un onduleur. On peut citer quelques exemples de systèmes autonomes, comme les balises en mer, les lampadaires urbains, le pompage solaire et les maisons en sites isolés.

La majorité des populations à l'écart des réseaux électriques vit dans des zones rurales, où l'implantation de tels réseaux est difficile, pour des raisons d'accès ou de moyens. Les systèmes photovoltaïques constituent alors une option intéressante, ils donnent aux populations un accès à l'électricité avec un coût, une maintenance et des difficultés de mise en œuvre réduits. [11]

### I.13.3. Installations ou centrales électriques photovoltaïques hybride

Il s'agit de systèmes qui regroupent des sources d'énergie de nature différentes telle une installation éolienne, un générateur diesel ou une centrale de cogénération en plus du générateur photovoltaïque. Ce type d'installation est utilisé lorsque le générateur photovoltaïque seul ne couvre pas toute l'énergie requise.



**Figure 1.15.** Schéma typique d'une installation photovoltaïque autonome.

### I.13.4. Installations ou centrales électriques photovoltaïques raccordées au réseau

Un générateur photovoltaïque connecté au réseau n'a pas besoin de stockage d'énergie et élimine donc le maillon le plus problématique (et le plus cher) d'une installation autonome.

C'est en fait le réseau dans son ensemble qui sert de réservoir d'énergie. Deux compteurs d'énergie sont nécessaires : un compteur comptabilise l'énergie achetée au fournisseur d'énergie et un autre compteur mesure l'énergie renvoyée sur le réseau électrique lorsque la production dépasse la consommation. [11]

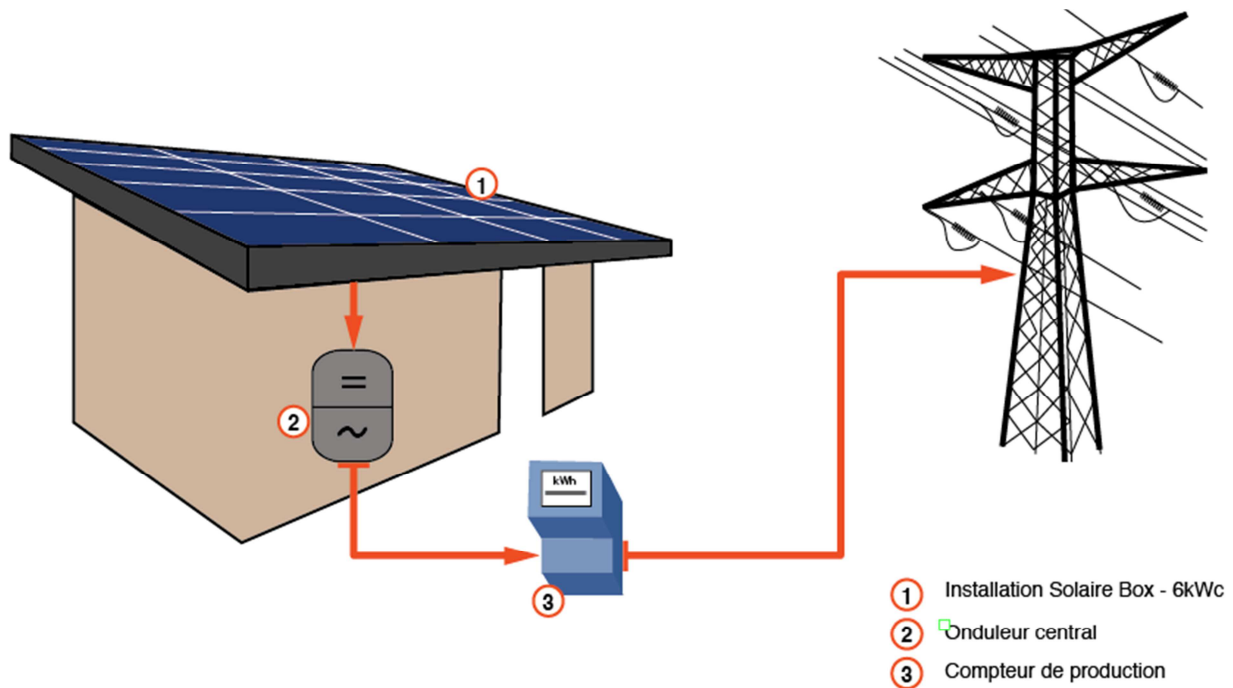
Un troisième compteur est ajouté dans le cas où l'énergie produite est injectée en intégralité dans le réseau (Compteur de non consommation) figure I.16.

## I.14. Avantages et Inconvénients de l'Énergie Photovoltaïque

### I.14.1. Avantages

- La technologie photovoltaïque se caractérise par une haute fiabilité, c'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.

- Le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable aux divers besoins énergétiques, on peut dimensionner les systèmes photovoltaïques pour des applications de puissances allant du milliwatt au Kilowatt.
- Le fonctionnement d'une installation photovoltaïque ne demande ni combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé, ce qui rend le coût de fonctionnement très faibles.
- Son potentiel illimité. 5% de la surface des déserts suffiraient pour alimenter la planète entière.
- La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit est fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu.



**Figure I.16.** installation ou centrale électrique photovoltaïque raccorde au réseau

### I.14.2. Inconvénients

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert un coût élevé.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible.
- Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût de l'installation photovoltaïque est accru. Toutefois, la fiabilité



et les performances du système restent équivalentes pour autant que la batterie et les composants de régulation associés soient judicieusement choisis.

- La puissance est réduite lorsque les conditions climatiques sont défavorables (nuages).
- Même si l'électricité produite par une installation photovoltaïque est sans pollution, la fabrication, l'installation et l'élimination des panneaux ont un impact sur l'environnement.

## I.15. Régulateur de tension

Le régulateur de tension est un système permettant de rendre ou de maintenir une tension stable. Il est utilisé pour des circuits de montage électronique qui nécessitent une tension, qui ne varie pas. Un régulateur de tension se compose généralement d'un ensemble d'éléments, comme les résistances, les diodes ainsi que des transistors. On peut trouver aussi, le régulateur du type intégré

### I.15.1. Les différents modèles de régulateurs

Il existe pour l'essentiel deux grandes familles de régulateurs de tension :

- A tension de sortie  $V_{out}$  **fixe**
- A tension de sortie  $V_{out}$  **variable**.

Au passage, notons qu'un régulateur variable tel que le LM317 peut très bien faire office de régulateur fixe (on remplace alors le potentiomètre associé par une simple résistance).

Dans chacune de ces familles, on trouve des modèles "faible courant" et des modèles plus puissants, capables de débiter de 1 A à 2 A, voire davantage. On trouve également des régulateurs fournissant des tensions **positives** ou **négatives** (pour l'alimentation symétrique d'un AOP, par exemple).

## I.16. Les principaux modèles de régulateur disponibles

On trouve sur le marché quantité de modèles de régulateurs, dont certains sont très "pointus" ou destinés à des applications spécifiques. Dans la pratique, l'amateur se tournera en priorité vers des régulateurs "tous usages", à la fois performants, fiables et peu chers.

### I.16.1. Régulateurs fixes

#### *Séries 78XX et 78LXX*

Ces **régulateurs fixes positifs** sont sans doute les plus utilisés. Ils disposent tous d'une limitation interne du courant et d'une protection thermique. Seule contrainte: la tension d'entrée

minimale  $V_{in\ min}$  doit être égale ou supérieure à  $(V_{out} + 2\ V)$ . Ces modèles bénéficient d'une tolérance à 5% (suffixe C). Leur prix se situe aux environs de 0,55 euro pièce.

$V_{in\ max}$	30 V (40 V pour 7824)
$V_{out}$	XX = 05, 06, 08, 09, 10, 12, 15, 18, 24 V
$I_{out}$	1 A (2 A en pointe); 100 mA pour 78LXX

Par mesure de précaution, on équipera les régulateurs fixes d'un radiateur à visser sur le boîtier, dans le trou prévu à cet effet, dès lors que  $V_{in}$  sera nettement supérieur à  $V_{out}$  et/ou que le courant de sortie sera susceptible de dépasser la moitié de sa valeur maximale. On pourra choisir, sans s'embarasser de calculs, un modèle de radiateur de résistance thermique  $R_{th}$  égale à  $37\ ^\circ C/W$  (prix indicatif : 0,25 euro). En cas de doute Sur la puissance maximale dissipée, choisir la taille au-dessus ( $R_{th}\ 15^\circ C/W$ ).

### I.16.2. Régulateurs négatifs

#### Séries 79XX et 79LXX

Mêmes caractéristiques que ci-dessus ( $XX = 05, 12, 15, 24\ V$ ), mais ils 'agit de **régulateurs fixes négatifs**, pour alimentations symétriques. Prix Indicatif : 0,70 euro pièce.

### I.16.3. Régulateurs variables

Ils ne sont pas beaucoup plus difficiles à mettre en œuvre que les régulateurs fixes et rien d'ailleurs n'empêche de les utiliser comme régulateurs fixes. En revanche, ils sont un peu plus chers L'un de plus célèbres régulateurs variables est sans doute le LM317, dont il existe plusieurs variantes, identifiables par leur suffixe (K, H, T, etc....). Le moins cher de la famille (environ 0,70 euro à l'unité)

Le **LM317T**, est conditionné en boîtier TO-220. Il ne nécessite que deux Composants périphériques : une résistance et un potentiomètre. C'est grâce à ce dernier, on s'en doute bien, que l'on fera varier la tension de sortie.

## Conclusion

L'application des systèmes photovoltaïques n'est pas limitée aux systèmes isolés, mais peut être utilisée localement au niveau domestique, donc une optimisation d'utilisation d'énergie est indispensable.

Afin d'assurer une alimentation des dispositifs à basse tension (12V) à marge étroite, ne pouvant pas être reliés directement à un panneau solaire 12V sans risque d'être endommagés, il est nécessaire de concevoir un régulateur de tension 12V de forte puissance. D'où l'objectif du deuxième chapitre.

# CHAPITRE II

## *Régulateur de Tension*

### **II.1. Introduction**

Chaque système solaire Photovoltaïque (PV) hors réseau doit se doter d'un régulateur de charge afin de gérer la charge des accumulateurs. Les régulateurs offrent plusieurs autres fonctions dans la gestion et l'installation d'un système PV avec accumulateurs.

Nous verrons dans le présent mémoire les principales parties d'un régulateur de tension de sortie 12V et intensité 10 A maximum qui est relié avec un panneau solaire de 17V à 21V et une puissance de 170W.

Un régulateur de tension permet de produire une tension constante fixe 12V, pour un courant de sortie ou pour une charge. Lors de sa sortie, la tension est fixe. Elle peut être également réajustée. Elle peut être négative ou positive. Un schéma de régulateur de tension permet de mieux en mieux comprendre le système. Le régulateur est un élément muni de 3 bornes.

## II.2. Rôle de régulateur associé à panneau solaire

Assurer l'alimentation des dispositifs basse tension (12V) ex: (lampe) à marge étroite, ne pouvant pas être reliés directement à un panneau solaire 12V sans risque d'être endommagés.

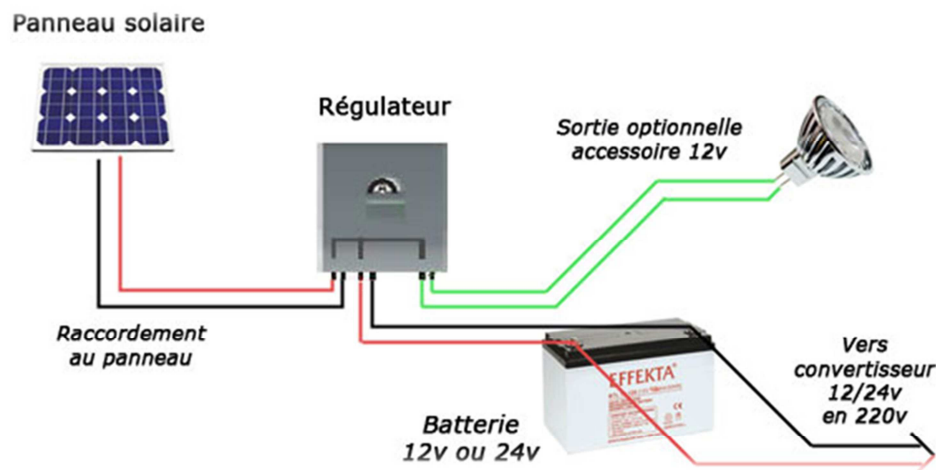


Figure II.1. Régulateur relié avec un panneau solaire.

## II.3. Différents types de régulateurs

### II.3.1. Régulateur à découpage

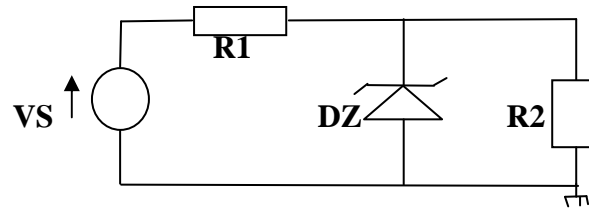
Le régulateur à découpage, offre un rendement supérieur et moins de pertes. Il est beaucoup plus utilisé par les professionnels et beaucoup moins, par les particuliers. Pour réaliser une alimentation avec ce type de régulateur, c'est assez complexe.

### II.3.2. Régulateur intégré

Il maintient constante, la tension de sortie. Les résultats obtenus sont meilleurs, avec la fonction régulation qu'avec la fonction stabilisation, bien que cette dernière soit parfois suffisante. Le régulateur intégré offre la possibilité d'obtenir la fonction régulation avec un seul élément, que la tension de sortie soit positive ou négative. Ces circuits sont protégés, en cas de surchauffe et en cas de courts circuits, grâce à la limitation de courant qui est automatique.

### II.3.3. Régulateur à diode Zener

La figure montre un exemple de régulateur à diode Zener (il s'agit plutôt d'un montage stabilisateur).



**Figure II.2.** Un régulateur Zener simple

La tension inverse de seuil, dite « tension Zener » (résultant de l'effet Zener) de la diode, permet de stabiliser la tension de sortie. La résistance  $R_1$  fournit le courant Zener  $I_Z$  ainsi que le courant de sortie  $I_{R2}$ , où  $R_2$  représente la charge. Lorsque la charge a une consommation  $I_{R2}$  constante,  $R_1$  peut être calculée de la façon suivante :

$$R_1 = \frac{V_S - V_Z}{I_Z + I_{R2}} \quad (\text{II.1})$$

### II.2.3. Un régulateur série

Dans ce cas, un transistor est directement relié à la référence de tension (diode Zener). C'est le transistor Q qui fournit le courant de sortie  $I_{R2}$  et « absorbe » les variations de  $V_S$ . La résistance  $R_1$  fournit quant à elle le courant Zener  $I_Z$ . [13]

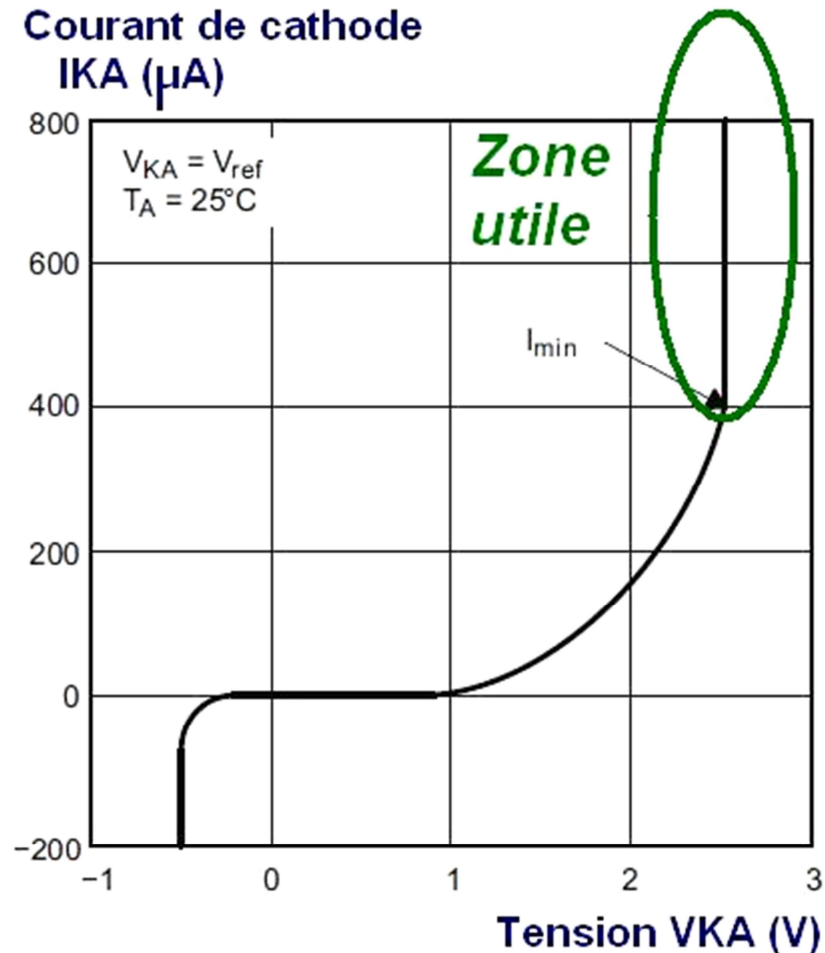
Ce type de montage offre de meilleures performances qu'un régulateur à diode Zener simple car le courant de base du transistor ne charge presque pas la diode Zener, limitant ainsi les variations de la tension Zener dues aux variations de charge. La tension de sortie sera inférieure de 0,65 V à la tension de référence en raison de la tension Base-Émetteur  $V_{BE}$  du transistor.

Bien que ce type de montage possède un bon pouvoir régulateur, il est toujours sensible aux variations de charge et ne permet pas de régler correctement la tension de sortie. Ces problèmes peuvent être résolus en incorporant une boucle de contre-réaction au montage afin d'assurer un asservissement de la tension de sortie. Ce type de régulateur est qualifié de série car le transistor Q est en série avec la charge  $R_2$ .

### II.4. Description du régulateur TL431 (de Texas instruments)

Le TL431 est un régulateur parallèle à 3 pattes dont la stabilité en température lui permet des applications embarquées et militaires. La tension de sortie peut être ajustée entre  $V_{ref}$  (2.50V) et 36V, avec seulement 2 résistances externes. L'impédance de sortie typique est de 0.2 Ohm. Le TL431 est un remplacement avantageux de la diode zener pour les alimentations stabilisées et à découpage.

Dès 0.4 mA typique, la tension est stabilisée à 2.50 V. Par sécurité, on fixera à 1mA minimum le courant pour garantir la tension de référence 2.50 V. [14]



**Figure II.3.** Caractéristique tension courant du TL431.

## II.5. Régulateurs de tension de type LDO

Parmi la catégorie des régulateurs linéaires, nous nous intéresserons dans cette étude uniquement aux régulateurs linéaires de type LDO (Low Drop Out), ce sont des régulateurs de tension qui permettent d'obtenir une tension régulée  $V_s$  très proche de leur tension d'alimentation  $V_E$  figure II.4 (montage de réalisation).

### II.5.1. Caractéristiques des composants

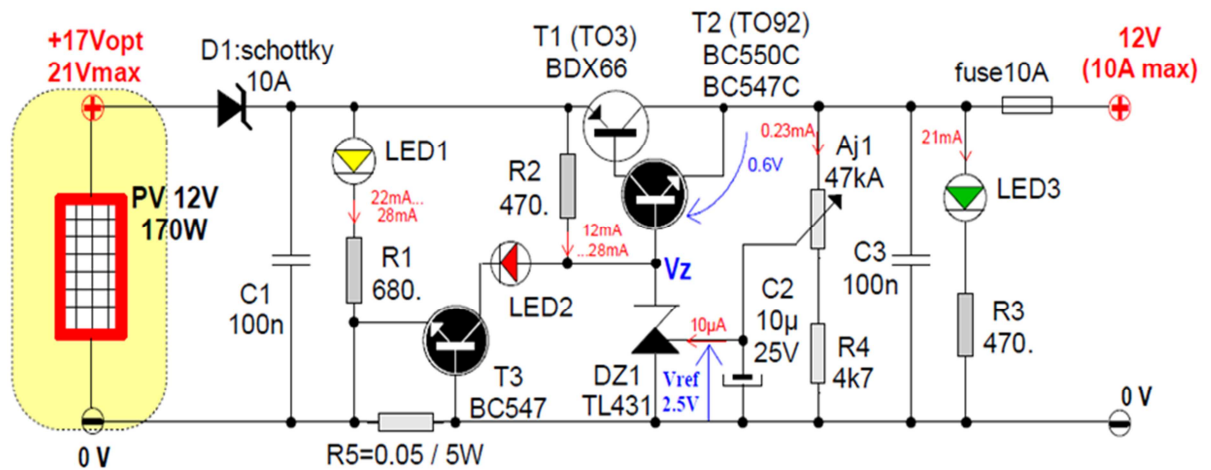
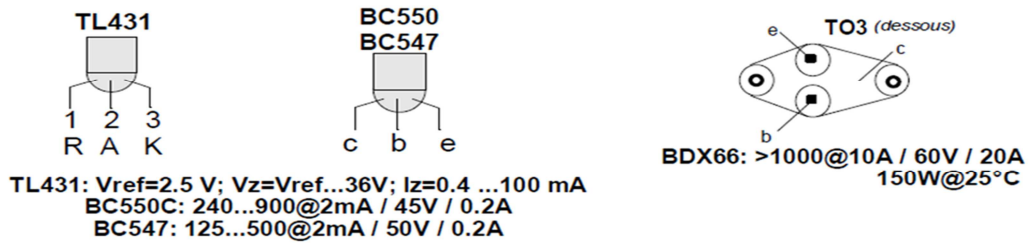


Figure II.4. Régulateur de tension à puissance maximale type LDO “12V-10A”.

### II.6. Modélisation mathématique

#### II.6.1. Stabilisateur série à diode et transistor

##### Principe de fonctionnement

Afin d'obtenir un rendement qui ne soit pas trop mauvais aux faibles charges, on emploie souvent les stabilisateurs série figure (II.5).

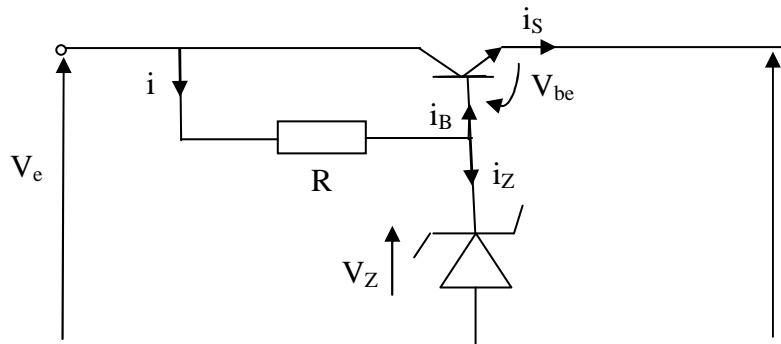


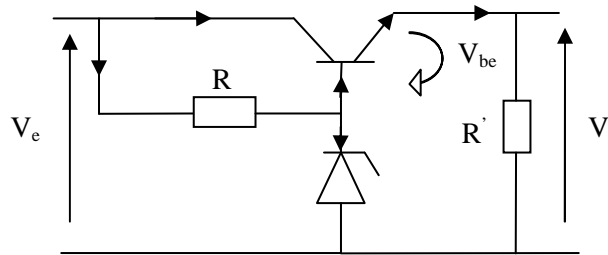
Figure II.5. Stabilisateur série à Diode Zener et transistor.



Le transistor est placé entre l'entrée et la sortie et il est parcouru par le même courant que la charge, sa base est portée à un potentiel fixé par la diode zener polarisée grâce à la résistance R, la tension de sortie

$$V_s = V_z - V_{be}. \quad (\text{II.2})$$

La tension  $V_{be}$  est de l'ordre de 0.6V à 0.7 V, une résistance  $R'$  peut être ajoutée en parallèle sur la sortie afin de maintenir une bonne conduction du transistor même en l'absence de charge figure (II.6).



**Figure II.6.**  $R'$  supplémentaire permettant de maintenir  
En permanence la conduction de transistor.

La valeur de cette résistance est telle que le courant dérive reste très faible devant le débit maximal de l'alimentation.

### II.6.2. Choix des composants

La tension de zener fixe le niveau de sortie souhaité:

$$V_z = V_s + V_{be} \quad (\text{II.3})$$

La résistance R doit permettre de toujours assurer une conduction correcte de la diode zener, le cas le plus défavorable correspond à la tension d'entrée minimale, et a un courant de base maximal car :

$$i_z = i - i_b \quad (\text{II.4})$$

On en déduit la valeur maximale autorisée pour R:

$$R \leq \frac{(V_{Emin} - V_z)}{(I_{zm} + i_{bmax})} \quad (\text{II.5})$$

Le courant de base maximal est obtenu le fonctionnement en charge à débit maximal et lorsque le transistor présente une amplification en courant  $\beta$  minimale [12]

$$I_{\beta \max} = \frac{i_{s \max}}{\beta_{\min} + 1} \quad (\text{II.6})$$

La puissance maximale dans la résistance correspond à la tension d'entrée maximale  $PR \leq PRM$  :

$$PR = \frac{(V_{E \max} - V_Z)^2}{R} \quad (\text{II.7})$$

De même, pour la diode zener, on a  $PZ \leq PZM$ :

$$PZ = \frac{V_Z (V_{E \max} - V_Z)}{R} \quad (\text{II.8})$$

Enfin, pour le transistor  $PT \leq PTM$  :

$$PT = (V_{E \max} - V_S) i_{S \max} \quad (\text{II.9})$$

En ce qui concerne la tension, le maximum est obtenu pour la plus grande valeur possible de la tension d'entrée. La tension de claquage entre collecteur et émetteur doit être telle que :

$$V_{(BR) \text{ CEO}} \geq V_{E \max} - V_S \quad (\text{II.10})$$

### Exemple

On souhaite réaliser un stabilisateur fournissant une tension de 5V, avec un courant débité pouvant varier entre 0 et 150mA, on dispose au départ d'une tension de 10V susceptible de subir des écarts inférieurs à 20%.

- On choisit une diode zener de 5.6, ce qui donne :

$$V_S = 5.6 - 0.6 = 5V$$

- Le transistor doit pouvoir dissiper :

$$PT = (15 - 5) 0.15 = 1.05W$$

- Un petit transistor comme le 2N1711, convient à condition de le munir d'un refroidisseur adéquat : ce composant supporte 0.8W sans dissipateur et 3w au dissipateur suffisant.

- la tension maximale en entrée est de 12V, ce qui conduit à une tension entre collecteur et émetteur qui ne dépasse pas 7V ou, le transistor choisi supporte 50V. On lit la notice du composant les valeurs extrêmes de  $\beta$  :

$$100 \leq \beta \leq 300$$

- Le maximum du courant de base vaut alors :

$$i_{\beta} = \frac{150}{100+1} = 1.49\text{mA}$$

- Il faut ensuite faire le choix de R :

$$R \leq \frac{(8-5.6)}{(4+1.49) \times 10^{-3}} = 437\Omega$$

- On prend par exemple  $R = 390\Omega$ , 5% la puissance de cette résistance est :

$$PR = \frac{(12-5.6)^2}{390} = 0.105\text{W}$$

- Une résistance 0.25W convient, La diode zener doit supporte :

$$PZ = \frac{5.6(12-5.6)}{390} = 0.092\text{W}$$

- Une puissance de 500mW, est suffisante. On choisit donc une diode zener bzx79c 5V6.

### II.6.3. Coefficients de stabilisation

Pour ce calcul, nous traçons le schéma équivalent pour variations de  $V_e$  figure (II.7)

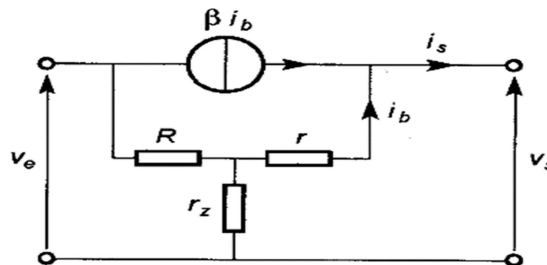


Figure II.7. Schéma équivalent pour les variations de  $V_e$ .

Le facteur de stabilisation est déterminé quand le circuit à vide figure (II.8)

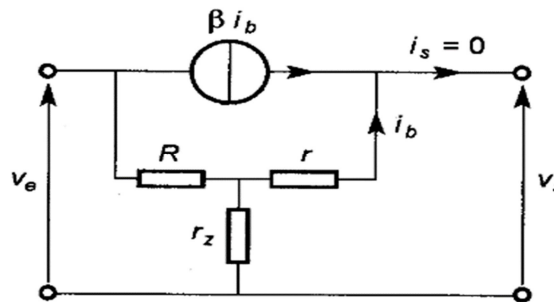


Figure II.8. Schéma pour le calcul de K.

Nous constatons immédiatement que :  $(\beta + 1) i_b = 0$

Le courant  $i_b$  est donc nul, et il n'y a aucune chute de tension aux bornes de  $r$ , le circuit est donc ramené à un simple diviseur résistif ce qui donne :

$$K = \frac{VS}{VE} = \frac{rz}{R+rz} \quad (\text{II.11})$$

Traçons le schéma pour le calcul de la résistance de sortie figure (II.9)

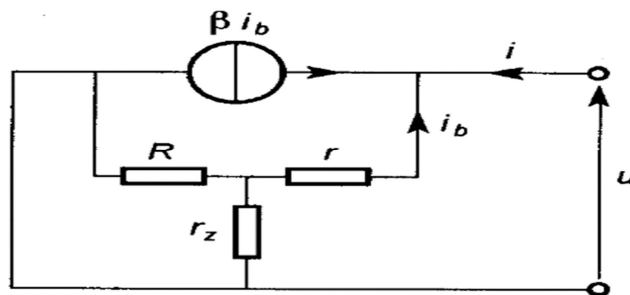


Figure II.9. Schéma pour le calcul de  $r_s$ .

Et transformons le ensuite figure (II.10) :

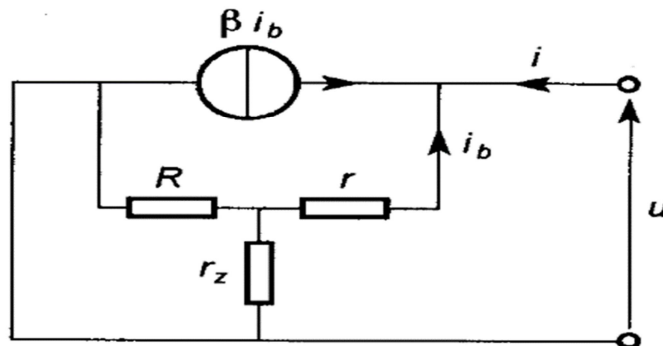


Figure II.10. Transformation de schéma pour le calcul de  $r_s$ .

Nous pouvons écrire :

$$i = (\beta + 1) i_b \quad (\text{II.12})$$

$$i_b = \frac{u}{r + \frac{R rz}{R + rz}} \quad (\text{II.13})$$

$$r_s = \frac{1}{(\beta+1)} \left( r + \frac{R r_z}{R+r_z} \right) \quad (\text{II.14})$$

Compte tenu des ordres de grandeur habituels, nous pouvons obtenir les formules simplifiées :

$$K \approx \frac{r_z}{R} \quad \text{et} \quad r_s \approx \frac{r}{\beta} \quad (\text{II.15})$$

La résistance de sortie s'exprime simplement en fonction de la pente  $g_m$  du transistor :

$$r_s \approx \frac{1}{g_m} \quad (\text{II.16})$$

où ce paramètre dépend du point de repos:

$$g_m = \frac{I_c}{U_t} \quad (\text{II.17})$$

Dans la formule (II.16),  $I_c$  est le courant continu de collecteur et  $U_t$  est le potentiel thermodynamique, qui vaut 26 mV à température ordinaire.

La formule devient finalement :

$$r_s \approx \frac{U_t}{I_c} \quad (\text{II.18})$$

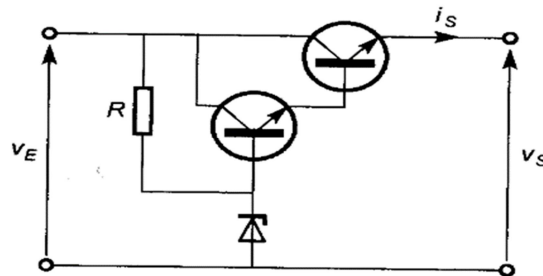
L'influence de température sur la tension de sortie provient à la fois de la diode zener et du transistor :

$$\Delta V_S = \Delta V_Z - \Delta V_{BE} \quad (\text{II.19})$$

Sauf pour les diodes zener de faible tension, le coefficient de température de  $V_Z$  est positif et donc les deux effets s'ajoutent.

### II.6.4. Augmentation de la puissance

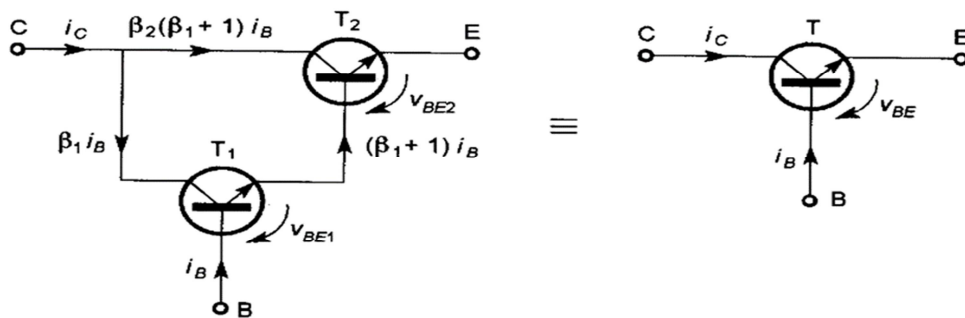
A une diode Zener donnée, le courant maximal de sortie que peut fournir le stabilisateur dépend du transistor, malheureusement les transistors de puissance ont un  $\beta$  faible, ce problème peut être résolu par l'emploi d'un montage Darlington à la place du transistor figure (II.11) :



**Figure II.11.** Montage Darlington pour obtenir un courant plus élevé.

Cette association de deux transistors permet d'obtenir un  $\beta$  élevé, si  $\beta_1$  et  $\beta_2$  sont les amplifications en courant des transistors T1 et T2 figure (II.12) On a :

$$\beta = \beta_1 \beta_2 + \beta_1 + \beta_2 \tag{II.20}$$



**Figure.II.12.**équivalent entre un montage Darlington et un transistor.

Comme  $\beta_1$  et  $\beta_2$  sont nettement supérieurs à 1 (sauf pour les transistors de très forte puissance) on peut écrire de manière approchée : [12]

$$\beta \approx \beta_1 \beta_2 \tag{II.21}$$

Par contre, le transistor équivalent à l'association à une tension de base-émetteur plus élevée, de l'ordre de 1.2 à 1.1V puisque :

$$V_{BE} = V_{BE1} + V_{BE2} \tag{II.22}$$

On peut aussi établir un modèle équivalent pour les variations figure (II.13)

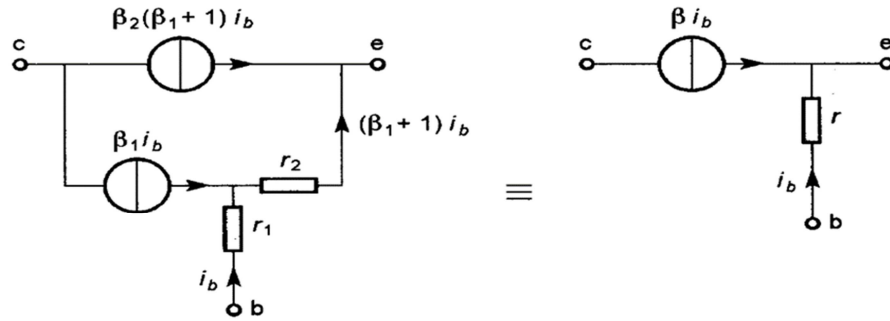


Figure II.13 Modèles pour les variations d'un montage Darlington.

On a, en faisant l'approximation de négliger 1 devant  $\beta_1$  et  $\beta_2$  :

$$r = r_1 + \beta_1 r_2 \tag{II.23}$$

Compte tenu de l'augmentation de  $\beta$ , on pourrait penser améliorer les performances de stabilisation du montage mais il n'en est rien, en effet, le facteur de stabilisation amont est toujours le même et la résistance de sortie s'écrit :

$$r_s \approx \frac{r_1 + \beta_1 r_2}{\beta_1 \beta_2} \tag{II.24}$$

Compte tenu des ordres de grandeur, on a :

$$r_s \approx \frac{r_2}{\beta_2} \tag{II.25}$$

Il s'agit donc la même expression que pour un transistor seul.

### II.6.5. Avantages et inconvénients

Les performances du stabilisateur série sont assez moyennes : le facteur de stabilisation amont a même expression que pour le montage à diode zener seul, la résistance de sortie est un peu

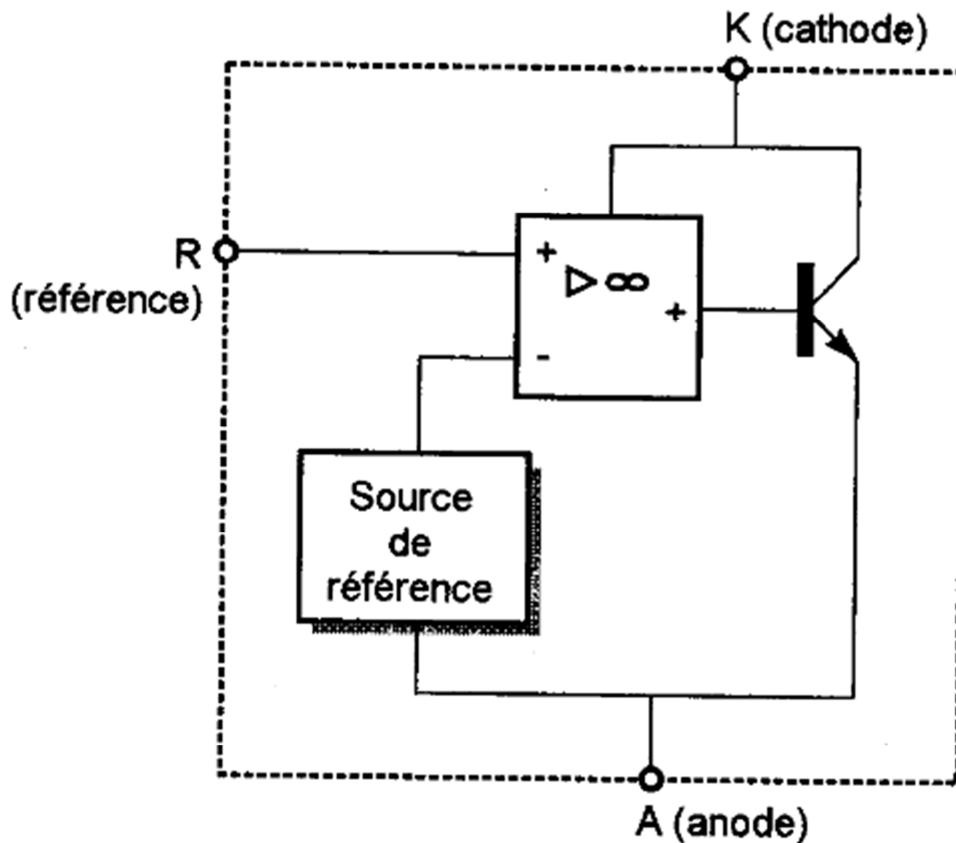
améliorée et le comportement en température est médiocre, de plus, en cas de court-circuit de la charge, le transistor sera détruit.

Il est donc nécessaire de prévoir une protection par limitation d'intensité. Malgré ces défauts, le stabilisateur série est souvent préféré au montage parallèle, car il permet d'obtenir des courant de sortie variables dans une plage étendue, tout en conservant un rendement raisonnable, on peut ainsi délivrer plusieurs ampères à la charge. [12]

En utilisant un montage Darlington, lorsqu'il est nécessaire de disposer de performances supérieurs, on fait appel à un montage régulateur.

### II.6.6. Régulateur parallèle

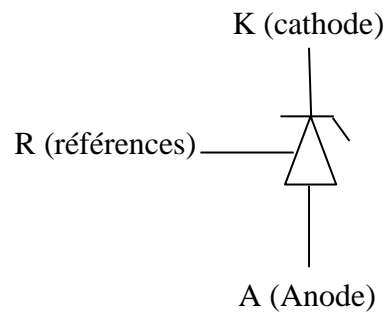
La plupart des régulateurs intégrés utilisés sont du type série, il existe cependant des modèles du type parallèle qui peuvent parfois être intéressants figure (II.14).



**Figure II.14.** Schéma fonctionnel d'un régulateur parallèle réglable.

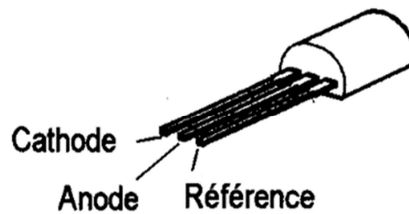
Comme ce régulateur se comporte en fait comme une diode zener dont on choisit la tension par une entrée de référence, on emploie en général symbole voisin figure (II.15). [12]





**Figure II.15.** Symbole du régulateur parallèle réglable.

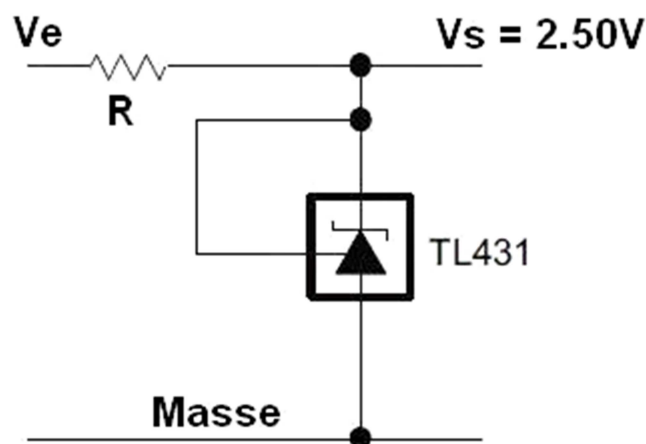
Il ne faut cependant pas oublier qu'il s'agit d'un circuit intégré, un exemple est le régulateur TL431 de Texas instruments, il est disponible dans un boîtier TO-92 figure (II.16).



**Figure II.16.** Brochage de régulateur parallèle TL431.

### II.6.7. Montage du TL431 en référence de tension (2.50V)

C'est le montage le plus simple qui fournit une tension de 2.50 V. La résistance R doit assurer un courant minimum de 1mA dans le TL431, même au plus fort courant de sortie. [12]



**Figure II.17.** Régulateur TL431 monté en référence de tension 2.50V.

Ce circuit peut être utilisé avec des tensions de 2.5 à 36 V et des intensités de 1 à 100 mA, ses performances sont nettement supérieures à celles d'une simple diode zener figure (II.17).

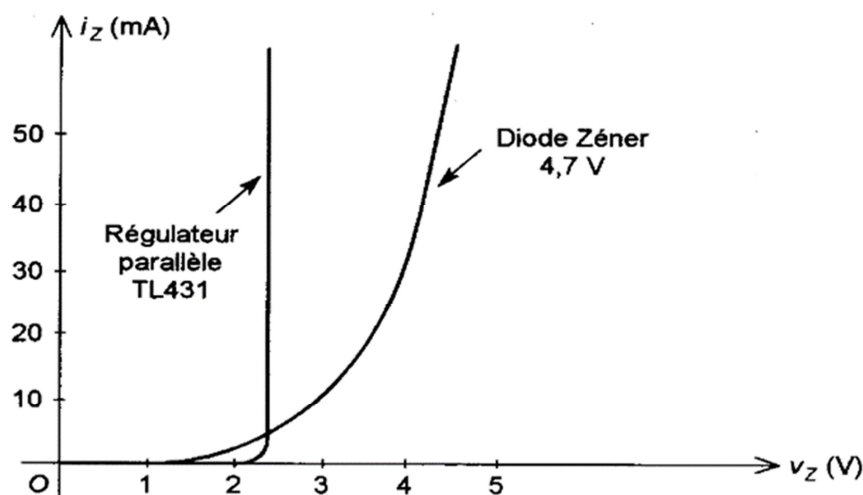
Le régulateur TL431 monté en référence de tension 2.50V Il s'utilise comme une diode zener 2.50V de précision. [12]

La résistance dynamique du circuit intégré est d'environ  $0.2\Omega$ , à comparer avec les quelques dizaines d'ohms de la diode.

Pour le schéma de base figure (2.18) à condition de fixer un courant de pont nettement supérieure au courant la borne R, on a :

$$V_s = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) V_r \quad (\text{II.26})$$

La valeur typique de V est 2.495V (dispersion de 2.440V à 2.550V) la résistance se choisit comme pour un stabilisateur à diode zener.



**Figure.II.18.** comparaison entre les caractéristiques d'une diode Zener et celles d'un régulateur parallèle.

### Exemple

On veut obtenir une tension de 18V pour une charge qui peut consommer jusqu'à 15 mA.

Le courant dans la borne de référence étant inférieur à  $4\mu\text{A}$ , on s'impose 1mA, dans le pont résistif, le résultat sera ainsi indépendant de la valeur exacte de l'intensité dans la référence :

- On choisit ainsi  $R_1$  :  $R_1 = \frac{V_r}{1}$  ,  $R_1 = \frac{2.5}{1} = 2.5 \text{ k}\Omega$

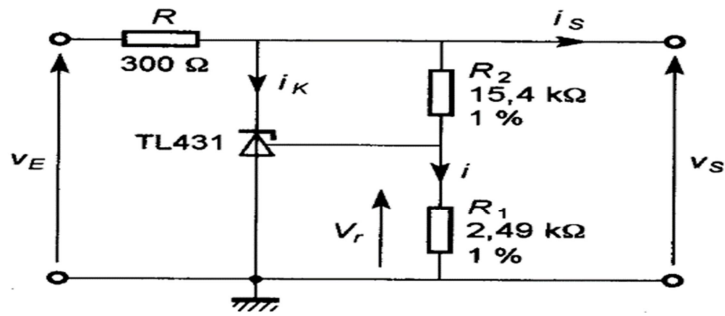


Figure II.19. Montage de base du régulateur parallèle.

Afin d'avoir une bonne précision sur la tension,

- On prend des résistances R2:  $R_2 = \left( \frac{V_S}{V_r} - 1 \right) R_1$ ,  $R_2 = \left( \frac{18}{2.5} - 1 \right) 2.5 = 15.4 \text{ k}\Omega$

On choisit donc la valeur 15.4 kΩ, 1%, pour R2, on s'impose une tension de 24v en entrée.

La résistance R soumise à la tension  $V_E - V_S$  doit permettre le passage du courant maximal de la charge et des courants dans le régulateur (1mA, minimum) et dans le diviseur résistif (1mA),

- Sa valeur maximale est donc :

$$R_{\max} = \frac{V_E - V_S}{i_s \max + i_{K\min} + i} , R_{\max} = \frac{24 - 18}{15 + 1 + 1} = 0.353 \text{ k}\Omega$$

On choisit par exemple  $R = 330\Omega$ , 5%, il est possible d'augmenter la puissance d'un régulateur parallèle en ajoutant un transistor supplémentaire figure (II.20).

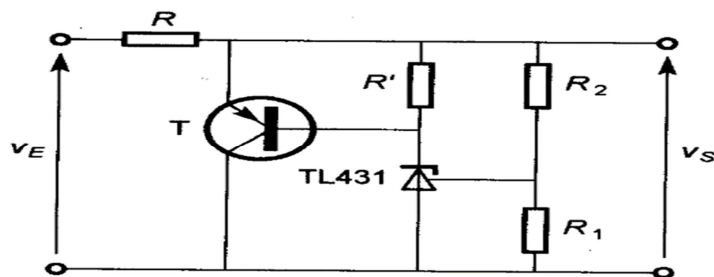
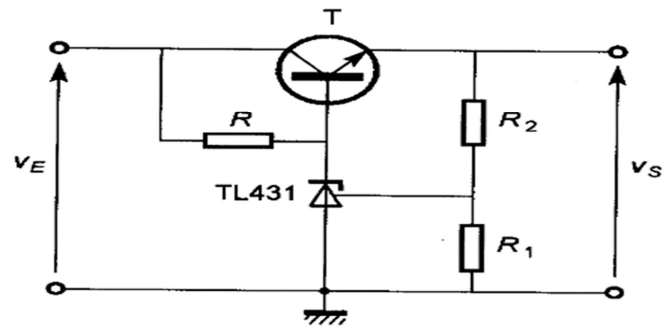


Figure II.20. Régulateur parallèle pour courants forts.

La relation qui définit la tension de sortie est la même que précédemment. On peut aussi remplacer la diode zener d'un stabilisateur série par un régulateur parallèle figure (II.21)

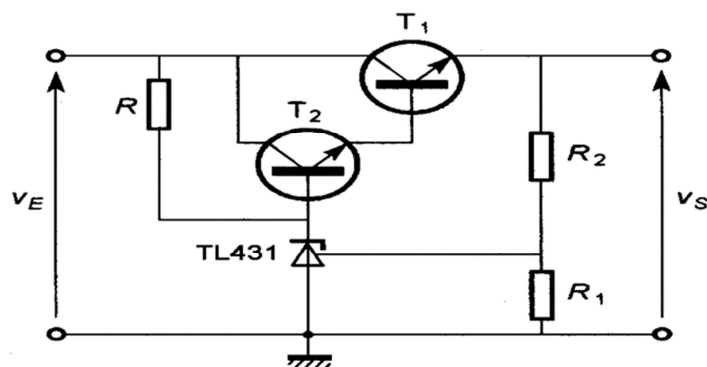


**Figure II.21.** Régulateur à transistor série.

L'expression de la tension de sortie ne change pas et la résistance  $R$  se calcule comme pour un stabilisateur à diode zener :

$$R_{\max} = \frac{V_E - (V_{BE} + V_S)}{i_B \max + i_{k\min}} \quad (\text{II.26})$$

Pour obtenir des courants élevés, on utilise un Darlington figure (II.22).



**Figure II.22.** Augmentation du courant avec un montage Darlington.

Enfin, on peut associer un régulateur de tension fixe et un régulateur parallèle pour obtenir une tension réglable figure (II.22) .

Si  $V_{SR}$  est la tension nominale du régulateur série et  $V_R$  la tension de référence du régulateur parallèle, la valeur minimale que l'on peut obtenir en sortie est :  $V_S \min = V_{SR} + V_R$

Si  $V_{SR}$  est la tension nominale du régulateur série et  $V_R$  la tension de référence du régulateur parallèle, la valeur minimale que l'on peut obtenir en sortie est :

$$V_S \min = V_{SR} + V_R \quad (\text{II.27})$$

### Exemple

On veut obtenir 10V avec un régulateur 7805, c'est possible puisque le minimum:

$$V_{smin} = 5 + 2.5 = 7.5V$$

On choisit  $R_1 = 2.49 \text{ k}\Omega$ , 1%, la tension d'entrée du régulateur doit être supérieure d'au moins 3v à la tension de sortie par exemple

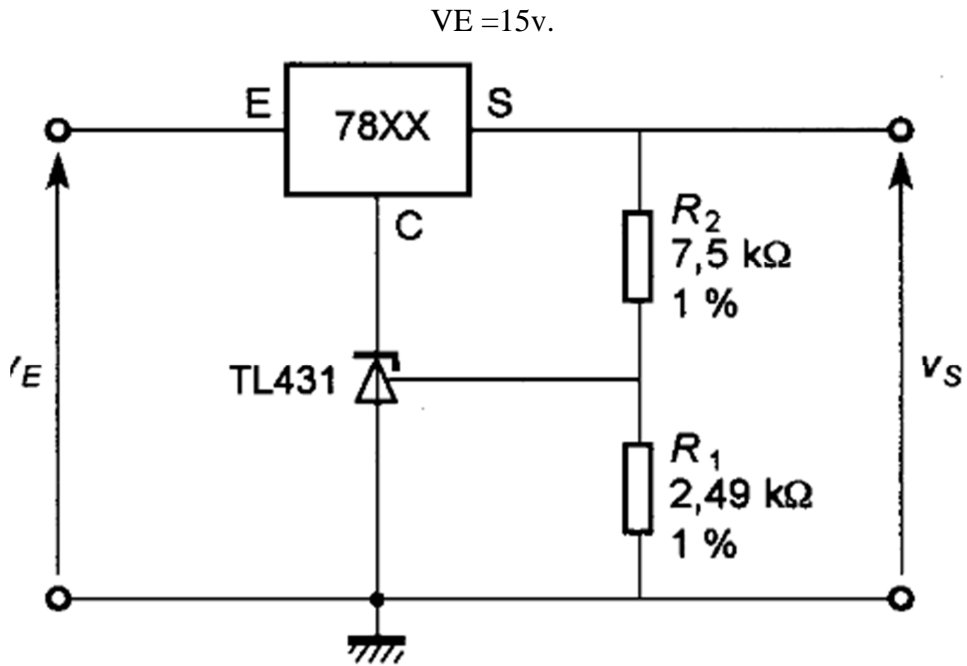


Figure II.23. Combinaison d'un régulateur série et d'un régulateur parallèle.

**II.6.8. TL431 utilisé en comparateur à seuil 2.50V**

Le TL431 peut aussi facilement être utilisé en comparateur. [14]

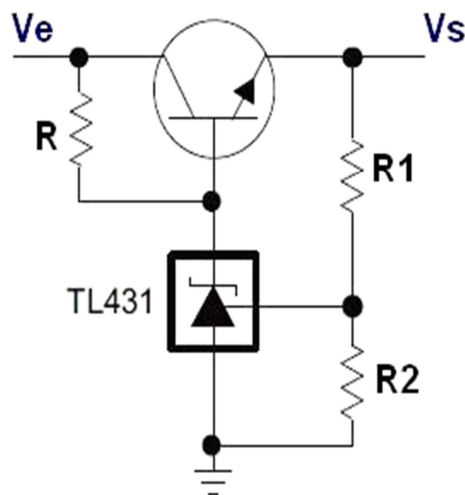
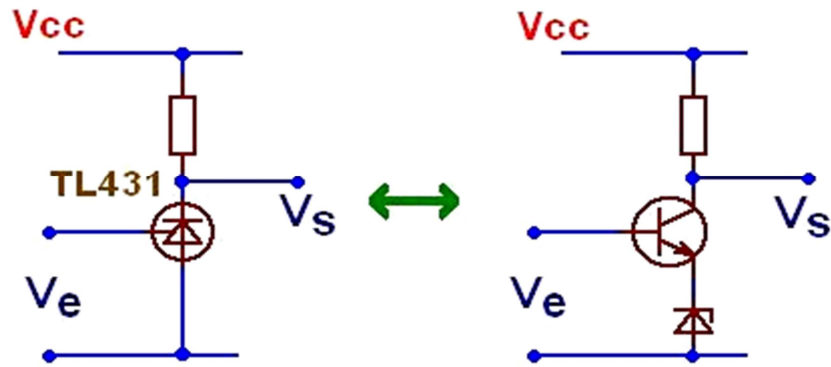


Figure II.24. Régulateur à transistor série.



**Figure II.25.** Utilisation TL431 comme comparateur

L'impédance d'entrée (côté  $V_e$ ) est élevée tant que  $V_e$  est inférieure à 2.50V. Ensuite, elle devient faible. Il est donc impératif d'ajouter en série une résistance (10 k - 1Méga typiques). Le TL431 se comporte comme un transistor NPN dont l'entrée en conduction se fait à 2.50V précisément. Lorsque le TL431 est conducteur,  $V_s$  s'établit autour de 1.9V (c'est une sorte de  $V_{ce\ sat}$ ).

### Remarque

Ce comparateur possède le seuil de 2.50V avec précision. Le montage peut ainsi remplacer une référence de tension + un comparateur classique (ampli op).

## II.6.9. Régulation de tension

La régulation de tension est assurée par le TL431. A partir du datasheet de ce composant:

$$V_{ref} = 2,5V$$

On a la formule mathématique à appliquer:

$$V_{out\ (MAX)} = 2.5 \times (1 + (R_6 + A_{j1})/R_4) = 14,8\ V$$

$$V_{out\ (MIN)} = 2.5 \times (1 + R_6/(A_{j1} + R_4)) = 12,5\ V$$

Si on change  $A_{j1}$  de 1,5kA à 2,2kA, on obtient:

$$V_{out\ (MAX)} = 2.5 \times (1 + (R_6 + A_{j1})/R_4) = 15,1\ V$$

$$V_{out\ (MIN)} = 2.5 \times (1 + R_6/(A_{j1} + R_4)) = 11,9\ V.$$

## **II.7. Avantages et inconvénients du régulateur**

### **II.7.1. Avantages**

- Coût moins élevé par rapport à un régulateur de tension à découpage.
- Disponibilité des composants (largement distribués).
- Pas de tension d'ondulation résiduelle à la sortie.
- Pas d'émission de rayonnement hf.

### **II.7.2. Inconvénients**

- Dimension du montage plus grande par rapport à un régulateur de tension à découpage, pour la même puissance mise en jeu.
- Dissipation thermique plus élevée, ce qui nous oblige à mettre un radiateur métallique.

## **II.8. Conclusion**

On a donné les différents types de régulateur de tension; Dans notre projet, on a choisi le régulateur série de type LDO (Low Drop Out). La modélisation mathématique du stabilisateur série à diode et transistor, a été dressée ainsi que le choix des composants de ce régulateur. On a montré l'importance du montage Darlington pour l'augmentation de la puissance. On a justifié cette étude par des exemples illustratifs et des calculs théoriques. Il reste à présent les mesures expérimentales de la réalisation pratique de ce régulateur qui seront exposées au troisième chapitre.

# **CHAPITRE III**

## ***Conception et réalisation d'un régulateur de tension LDO 12V – 10A***

### **III.1.INTRODUCTION**

Dans un système photovoltaïque, la mise en parallèle de panneaux solaires 12V délivre une tension optimale de 17V, qui peut atteindre 21V à vide. Le présent chapitre est dédiée à la conception suivi d'une réalisation d'un prototype de régulateur de tension 12V, de forte puissance (minimum 100W, facilement extensible à 400W) prévu pour alimenter des dispositifs basse tension (12V) à marge étroite, ne pouvant pas être reliés directement à un panneau solaire 12V, sans risque d'être endommagés. Cette étude fait suite à une recherche sur internet pour élaborer une synthèse de schémas conventionnels consacrés à ce type de dispositif, en mettant l'accent sur deux points importants : le coût global du montage (aussi bas que possible, tout en respectant les caractéristiques citées auparavant) et la facilité de reproduction du montage (disponibilité des composants).



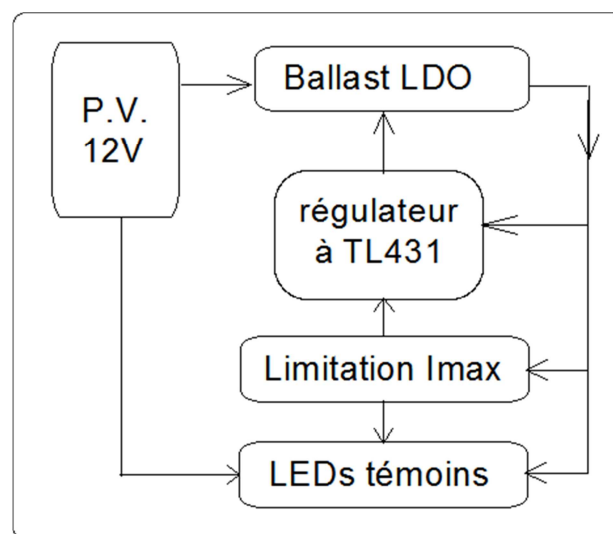


**Figure III.1.** Aperçu du dispositif réalisé.

### III.2- DESCRIPTION DU MONTAGE

Le synoptique suivant indique les principaux modules de ce montage :

- un étage de régulation de la tension (basé sur la diode zener ajustable TL431),
- un étage de puissance (dit ballast) monté en LDO,
- un étage de limitation du courant maximum autorisé,
- et enfin, des LED témoins de signalisation (tensions entré, sortie et courant max).



**Figure III.2.** Synoptique du montage réalisé.

### III.2.1. Etage de régulation de la tension

Ce montage est centré sur l'utilisation d'une diode zener ajustable qui a fait ses preuves de longue date : la TL431 [14], produite initialement par Texas instruments, puis, vu ses caractéristiques et performances exceptionnelles, a été reprise par la majorité des grands constructeurs de composants électroniques, tels que National Semi-conducteur, Siemens, Philips, etc... La figure suivante montre la structure interne de ce composant :

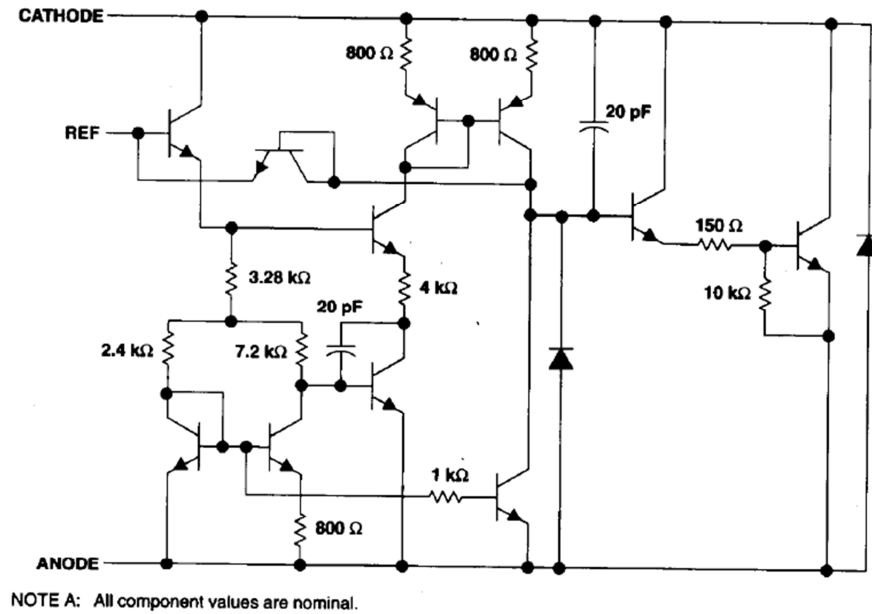


Figure III.3. Structure interne de la diode zener ajustable TL431.

Cette structure interne est plus facilement assimilable, si l'on préfère analyser son schéma fonctionnel représenté dans la figure suivante

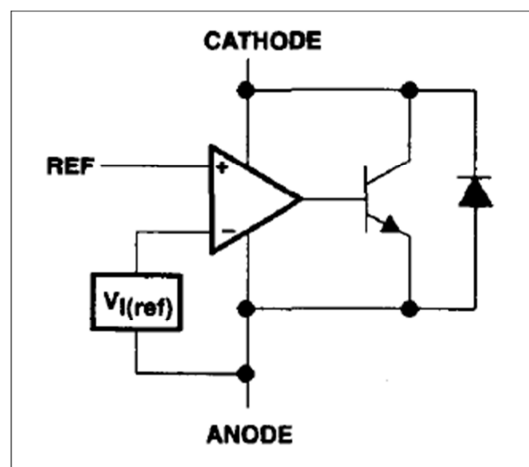
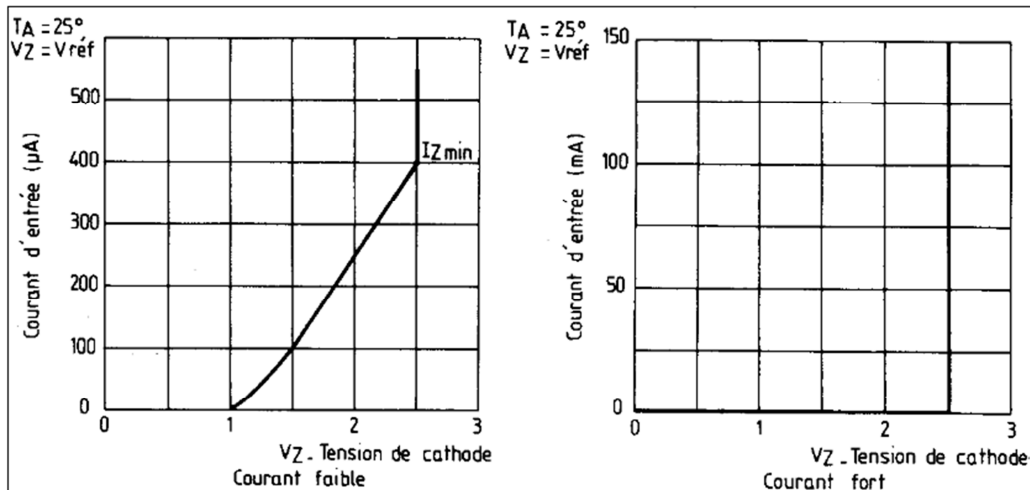


Figure III.4. Structure interne de la diode zener ajustable TL431.

On peut constater qu'il s'agit d'une diode contrôlée en tension à travers la broche REF. Cette entrée est caractérisée par une haute impédance et absorbe un courant typique de  $3 \mu\text{A}$  seulement.

Ainsi, en reliant directement cette entrée REF à la cathode du TL431, on peut créer un étalon de tension de référence ( $2.5\text{V}$ ) de grande stabilité thermique, par rapport à une diode zener ordinaire de  $2.5\text{V}$ .

Une autre caractéristique exceptionnelle de la TL431 est bien visible dans le graphe de la figure suivante, où l'on constate que la zone de régulation couvre une très large variation de courant  $I_z$  (courant inverse traversant cette diode, dit courant de polarisation) pouvant aller de  $0.5 \text{ mA}$  à  $120 \text{ mA}$ .



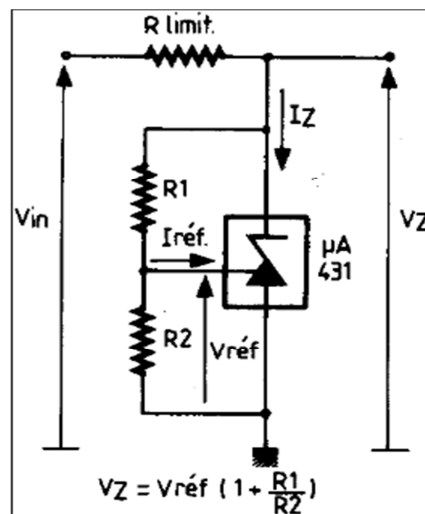
**Figure III.5** .Zone de régulation de la diode zener ajustable TL431.

Enfin, on peut aussi citer une autre caractéristique importante et qui marque bien la supériorité de la TL431 par rapports aux diodes zeners ordinaires :

-l'impédance dynamique de la TL431 par rapport à la fréquence.

Selon son datasheet [14], elle est seulement de 1.5 Ohm jusqu'à 65 kHz, puis double dans la décade suivante. Cette valeur très faible assure un bon comportement transitoire (la tension de sortie reste stable même en cas de fortes variations brusques de la charge).

La figure suivante montre un schéma type d'utilisation de cette diode zener, ajustable de 2.5V à 36V, par le biais d'un diviseur résistif classique

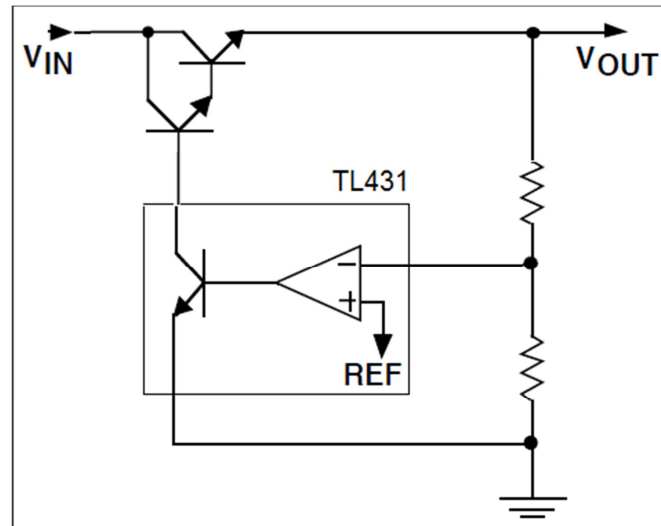


**Figure III.6.** Schéma type d'utilisation de la diode zener ajustable TL431.

### III.2.2. Etage de puissance

Le schéma type de la figure précédente est déjà utilisable pour concevoir un régulateur 12V en aval d'un panneau solaire 12V mais de petite puissance (<2W), car il ne permet pas de fournir un courant de sortie supérieur à la centaine de mA.

Pour gérer une puissance supérieure, on fait appel à un ou plusieurs transistors de puissance, montés en configuration darlington, pour assurer la fonction amplificateur de courant. La figure suivante un cas type d'un ballast composé de deux transistors NPN montés en darlington.



**Figure III.7.** Schéma type d'un régulateur de tension à TL431 et ballast de puissance.

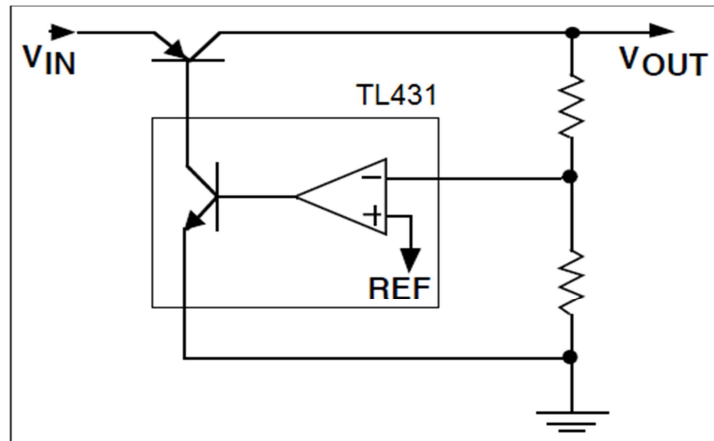
Dans ce cas de figure, la chute de tension entrée-sortie est de l'ordre de 3V. Nous avons voulu opérer une modification à ce schéma type pour lui apporter le qualificatif de LDO (*Low Drop Out*), afin d'améliorer le rendement, sans être forcé de recourir à une solution comme préconisée dans les convertisseurs DC-DC à découpage (plus chères, plus complexes et rayonnant des parasites EMI).

On trouve ce qualificatif pour des circuits régulateurs où la chute de tension entrée-sortie est inférieure à 2.5V [15].

Un nouveau qualificatif a fait jour depuis la prolifération des dispositifs portables durant cette dernière décennie : ULDO (*Ultra Low Drop Out*), où cette chute de tension entrée-sortie ne doit pas dépasser 1V !

La solution adoptée pour cela est d'utiliser un ballast à transistor de puissance bipolaire PNP, ou JFET canal N, ou MOSFET canal N.

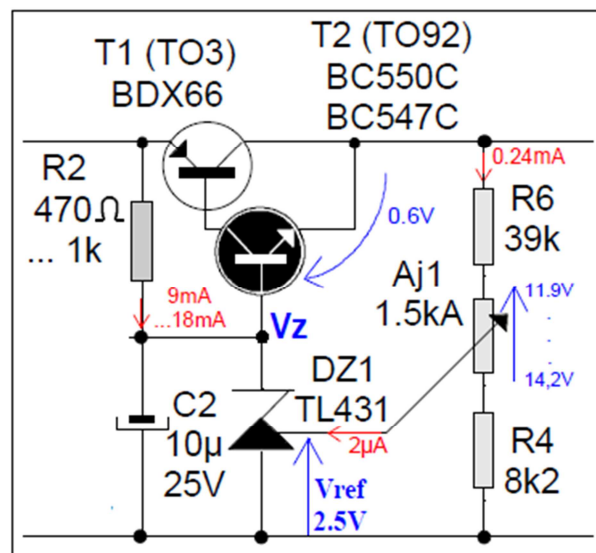
Nous avons opté pour un transistor darlington bipolaire PNP pour respecter notre deuxième critère énoncé plus haut : la disponibilité des composants. Cette solution est décrite avec plus de détails dans le document [16] cité en bibliographie.



**Figure III.8.** Schéma type d'un régulateur de tension LDO.

Dans notre montage, nous avons inséré un transistor intermédiaire (T2) entre la cathode de la diode zener ajustable TL431 et le transistor darlington de puissance T1.

Cette configuration typique en électronique de puissance est dénommée *Compound Darlington Pair (or Sziklai Pair)* [17].



**Figure III.9.** Solution (régulation + ballast LDO) choisie dans montage.

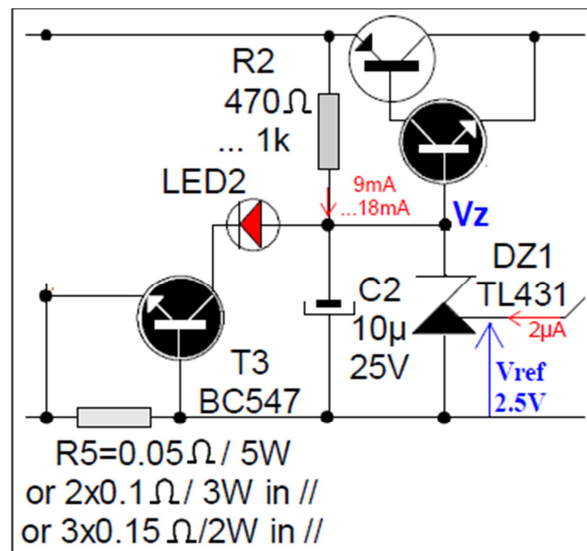
La résistance R2 permet de polariser la diode zener TL431 pour lui fournir un courant de quelques mA, tandis que le condensateur de filtrage C2 (optionnel) a été inséré pour augmenter la stabilité de la tension  $V_z$ . La valeur de cette tension  $V_z$  est déterminée par le diviseur résistif composé de R4, Aj1 et R6, et conformément à la relation indiquée en figure III.6

### III.2.3. Etage de limitation du courant de sortie maximum autorisé

Parmi les consignes de sécurité préconisées en électronique de puissance, il est fortement recommandé de prévoir un étage de limitation du courant de sortie maximum autorisé.

En effet, cette 1<sup>ère</sup> ligne de protection évite un claquage des transistors de puissance, et la fusion de certaines pistes cuivrées du circuit imprimé. Il s'agit d'un circuit relativement simple où l'on surveille la chute de tension engendrée aux bornes d'une résistance de très faible valeur ( $R5=0.05\ \Omega$ ), mise en série avec la charge, et qui commande la base d'un transistor NPN (T3).

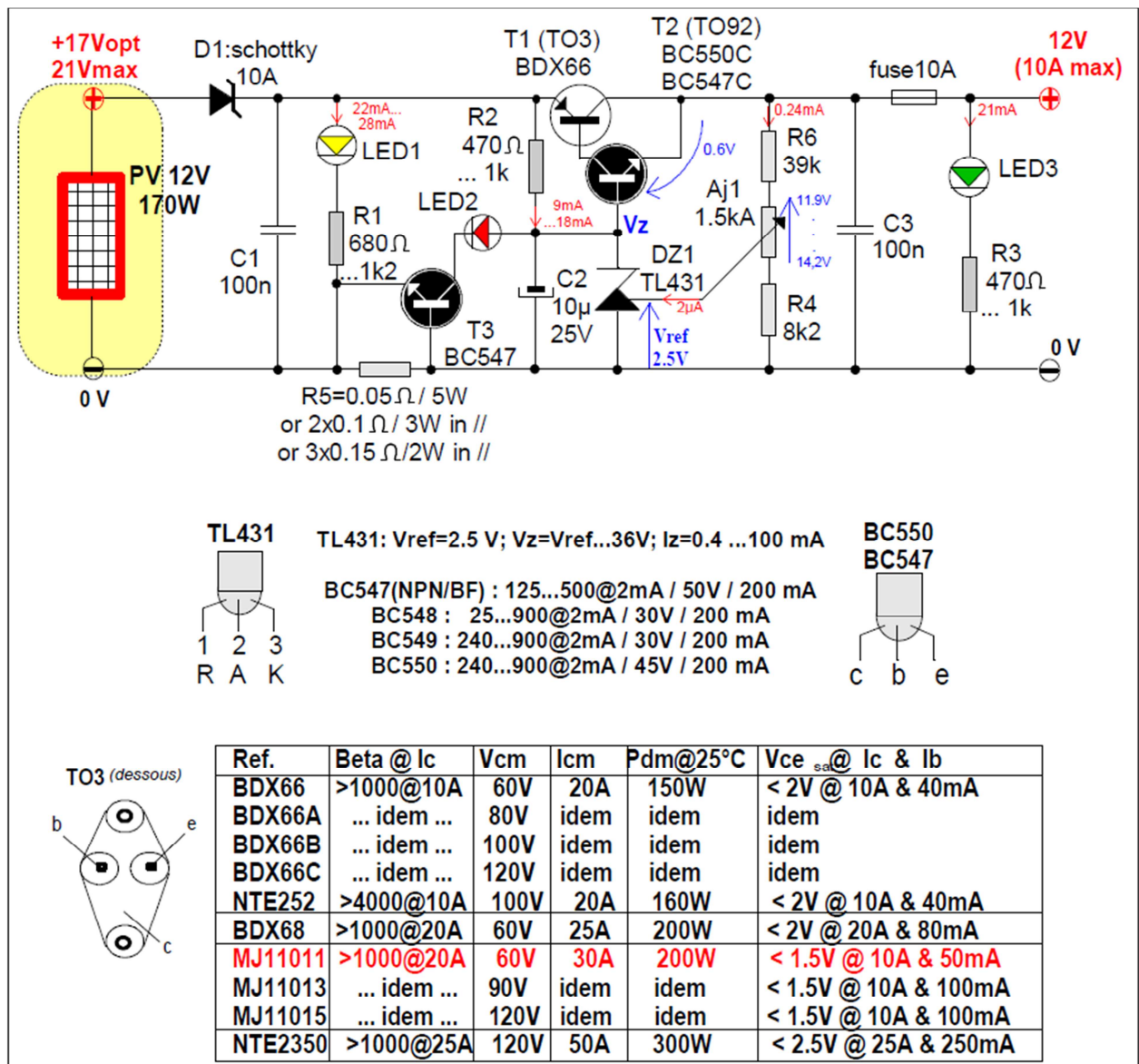
Ce dernier entre en action, dès que sa tension  $V_{be}$  dépasse 0.5V, et fait chuter la tension  $V_z$  de la diode zener TL431 à une valeur faible (autour de 1.6V due à la diode LED2 rouge), ce qui entraîne une baisse de la tension de sortie à 1V approximativement. A ce moment, la LED2 rouge signalerait cette surcharge éventuelle.



**Figure III.10.** Circuit de limitation du courant de sortie maximum.

### III.2.4. Les LED témoins de signalisation

Ce montage ne comporte pas d'afficheurs multi-digits 7-segments ou LCD pour indiquer la valeur des tensions ou courants mis en jeu, ceci afin de maintenir le coût global aussi réduit que possible. Néanmoins, un minimum en signalisation a été prévu pour indiquer l'état fonctionnel du dispositif à tout moment.



**Figure III.11.** Schéma complet de notre régulateur de tension de puissance 12V - 10A.

-Une LED1 jaune est insérée en entrée comme témoin visuel de la présence de la tension d'entrée (c'est-à-dire, panneau solaire opérationnel).



-Une LED2 rouge est prévue comme témoin visuel d'une surcharge éventuelle (courant de sortie limite atteint)

-Une LED3 verte est ajoutée aux bornes de sortie comme témoin visuel de la disponibilité de la tension de sortie.

Voici enfin le schéma complet de notre régulateur de tension de puissance 12V – 10A :

La figure suivante montre le typon du circuit imprimé correspondant. Noter que la résistance R5 est imprimée dans la plaque, en epoxy de préférence, suivant une règle décrite en détail dans les documents [18] [19] cité en bibliographie. Une application intéressante "ANSI PCB Trace Width Calculator" [20], permet un calcul online de la largeur de piste selon le courant admissible désiré.

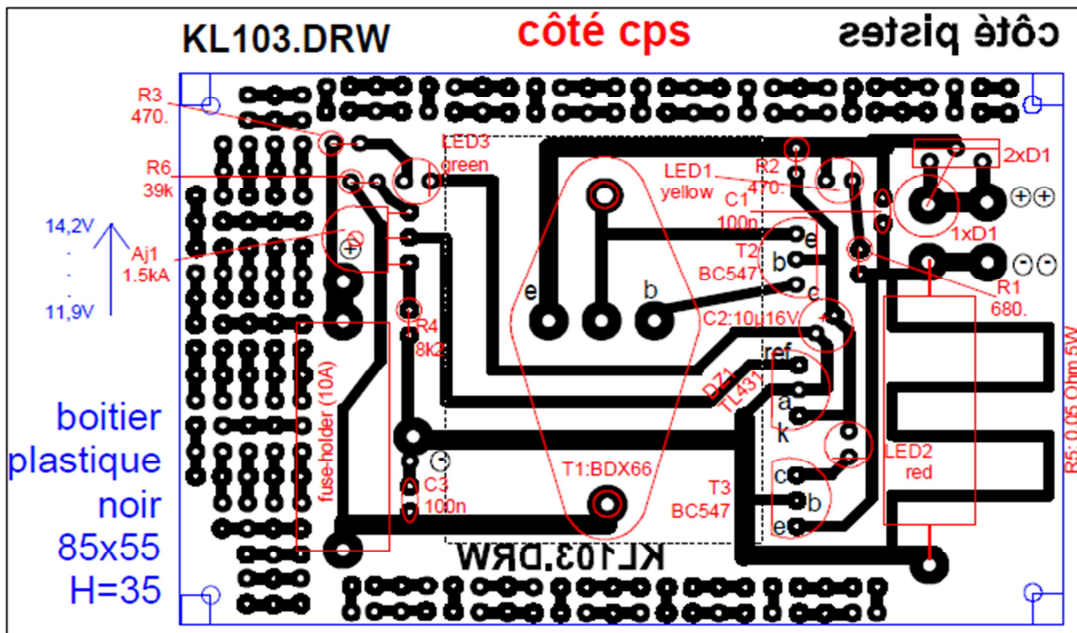


Figure III.12. Typon du circuit imprimé correspondant.

ANSI PCB TRACE WIDTH CALCULATOR							
Input Data			Results Data				
			Internal Traces			External Traces	
Field	Value	Units	Trace Data	Value	Units	Value	Units
Current (max. 35A)	4	Amps	Required Trace Width	5.29	mm	2.03	mm
Temperature Rise (max. 100°C)	10	°C	Cross-section Area	0.19	mm <sup>2</sup>	0.07	mm <sup>2</sup>
Cu thickness	35	µm	Resistance	0.01	Ω Ohms	0.03	Ω Ohms
Ambient Temperature	25	°C	Voltage Drop	0.04	Volts	0.1	Volts
Conductor Length	10	cm	Loss	0.16	Watts	0.41	Watts
Peak Voltage	12	Volts	Required Track Clearance	25.4	mil		

Figure III.13. ANSI PCB Trace Width Calculator online.

### III.2.5. Calcul du radiateur thermique

Le ballast LDO dégage une certaine quantité de chaleur due à la puissance mise en jeu. Le transistor darlington T1 chauffe, et au-delà d'un seuil, sa durée de vie peut être considérablement réduite.

Il faut nécessairement prévoir un dissipateur thermique. Il existe différentes formes pour les radiateurs thermiques consacrés au boîtier TO3 d'un transistor de puissance, comme le BDX66. Le type de radiateur à choisir dépend de la puissance perdue par effet Joule au niveau de ce transistor de puissance, et qui peut être calculée de la façon suivante :

$$P_d = (T_j - T_a) / R_{th} \quad (III.1)$$

Où :

- $P_d$  : puissance dissipée par effet Joule [W]

- $T_j$  : température de jonction du composant [°C]

- $T_a$  : température ambiante de l'air [°C]

- $R_{th}$  : résistance thermique [°C/W]

Pour le calcul du radiateur, trois résistances thermiques doivent être prises en compte [21] [22] :

- celle entre la jonction du composant et son boîtier. Sa valeur est précisée dans les fiches techniques des constructeurs (datasheet).
- celle entre le boîtier du composant et le radiateur. Elle dépend du boîtier du composant, et est généralement comprise entre quelques dixièmes de °C/W et quelques dizaines de °C/W. Cette valeur est elle aussi précisée dans les fiches techniques des constructeurs (mais malheureusement pas toujours).
- celle entre le radiateur et l'air ambiant. Cette valeur est donnée par le fabricant du radiateur, et est d'autant plus faible que le radiateur est de grandes dimensions.

Pour obtenir la résistance thermique totale (entre jonction du composant et air ambiant), il suffit d'additionner les trois résistances thermiques précitées. Il serait cependant maladroit de se contenter de cette simple addition, sans prendre en compte quelques petites marges de sécurité.

Il faut en effet éviter de faire travailler le composant de façon continue trop près de la limite autorisée, et tenir compte de certains cas de "surchauffe" naturels (équipement exposé au soleil) ou moins maitrisables (panne d'un ventilateur).

De même, il faut retenir que lorsqu'on parle de température ambiante, on fait allusion à l'air qui entoure le composant ou son radiateur, et que si ce dernier est dans un coffret fermé, sa température ambiante serait supérieure à la température ambiante de l'air.

### **Exemple de calcul**

Notre transistor de puissance BDX66 (boitier TO3) doit dissiper une puissance maximale de 50 W à température *ordinaire*. Cette valeur étant le produit du courant de sortie maximum autorisé ( $I_{max}=10A$ ) avec l'écart des tensions entrée ( $V_{in}=17V$ ) sortie ( $V_{out}=12V$ )

Première chose, il faut prendre une marge de sécurité. Nous baserons le calcul sur une puissance dissipée de 10% supérieure, soit 55 W. La température ordinaire sera évaluée à 60 °C (valeur couramment constatée), le composant et son radiateur seront enfermés dans un boitier.

Le fabricant indique pour le BDX66, une résistance jonction-boitier  $R_j$  de 1,5 °C/W, et une résistance  $R_c$  de 0,5 °C/W avec graisse silicone. Toujours selon le constructeur, la température maximale de jonction est de 200 °C. En appliquant la formule précédente, nous obtenons ceci :

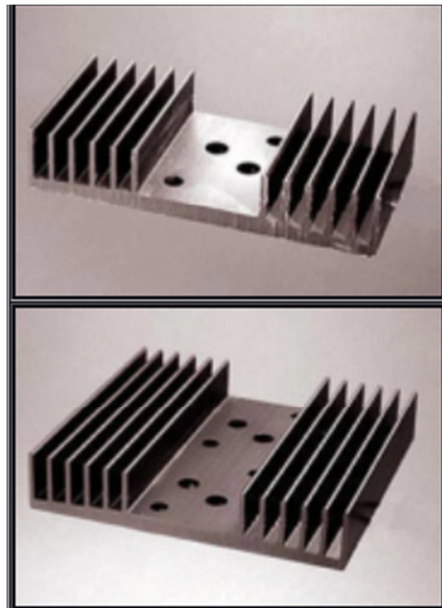
$$R_{th} = (T_j - T_a) / P_d \quad (III.2)$$

$$R_{th} = (200 - 60) / 55 = 2,54 \text{ °C/W} \quad (III.3)$$

Résistance thermique de 2,5 °C/W auquel il convient de retrancher la résistance jonction-boitier de 1,5 °C/W et la résistance boitier-radiateur de 0,5 °C/W. Au final, nous trouvons qu'il nous faut un radiateur de résistance thermique de 0,5 °C/W.

Un radiateur de résistance thermique inférieure conviendra aussi mais prendra plus de place. De même, pour éviter d'aboutir à un radiateur de dimension énorme,

il est conseillé d'opter pour des transistors de puissance mis en parallèle, avec mini-ventilateur qui déclenche automatiquement à partir d'un seuil de température ajustable.



**Figure III.14.** Quelques types de radiateurs thermiques pour transistors TO3.

(en haut : modèle ML25 simple,  $R_{th} = 2,4^{\circ}\text{C/W}$ )

(en bas : modèle ML25 double,  $R_{th} = 2,4^{\circ}\text{C/W}$ )

















### III.3.Comparaison entre les résultats théorique et pratique


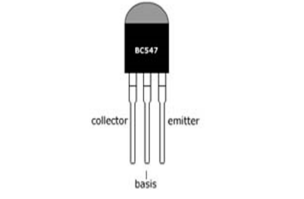

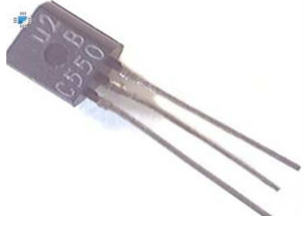
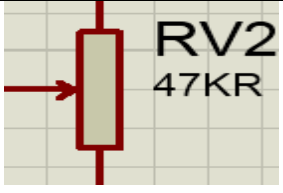

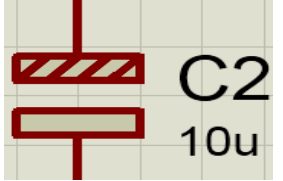

Ajustable (k $\Omega$ )	R6 (k $\Omega$ )	Tension (V)	Théorique	Pratique
1.5	-	$V_{out}$ (MAX)	14.8	14.7
1.5	39	$V_{out}$ (MIN)	12.5	12.7
2.2	-	$V_{out}$ (MAX)	15.1	14.9
2.2	39	$V_{out}$ (MIN)	11.9	12.2

#### Remarque

On a obtenu presque les mêmes résultats, d'où les calculs théoriques et la sortie de la régulateur expérimentalement sont égaux.

**III.4. Tableau des composants électronique**

Référence	Symbole	composant
Diode Schottky		
Condensateur céramique		
LED Yalow		
LED green		
Led		
Résistance		
Diode TL431		
Transistor BDX66		

<p>Transistor BC547</p>		
<p>Transistor BC550</p>		
<p>Potentiomètre linéaire</p>		
<p>Condensateur chimique</p>		

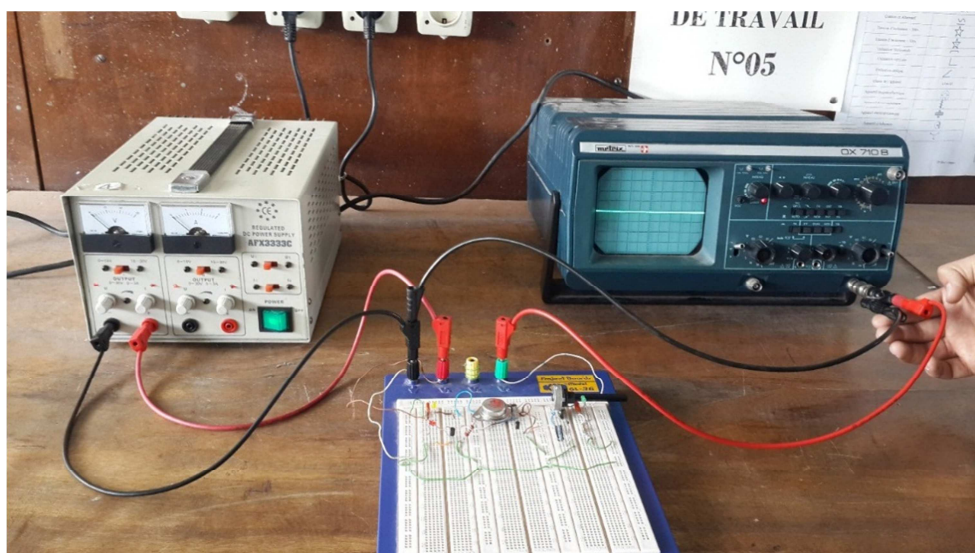


Figure III.15. Shéma de montage de régulateur.

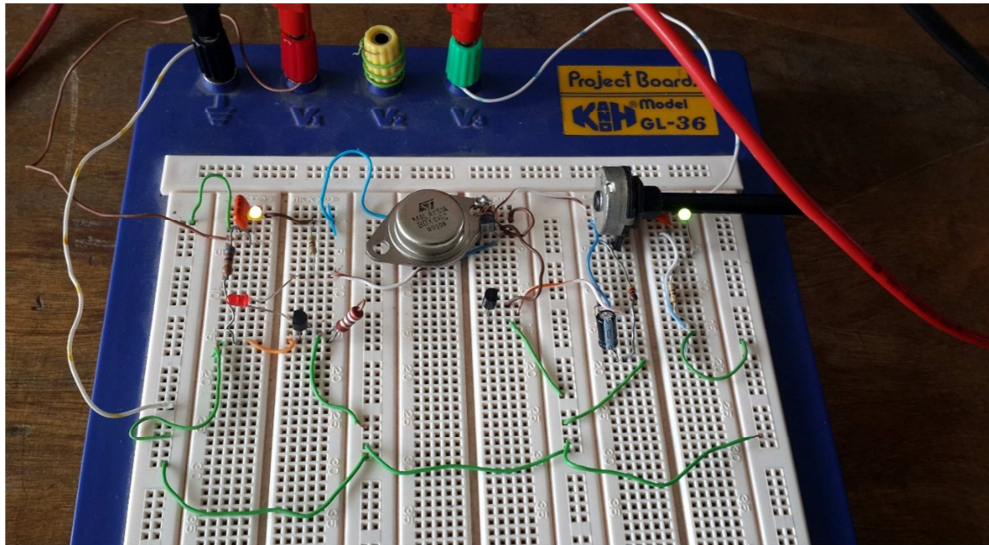


Figure III.16. schéma de régulateur sur plaque d'essai.

### Remarque

Si on alimente à l'entrée la LED jaune est allumé, la LED verte allumé si on a une tension de sortie, la LED rouge allumé si le courant limité atteint.

Voici le signal sur oscilloscope avec calibre de tension 10V :

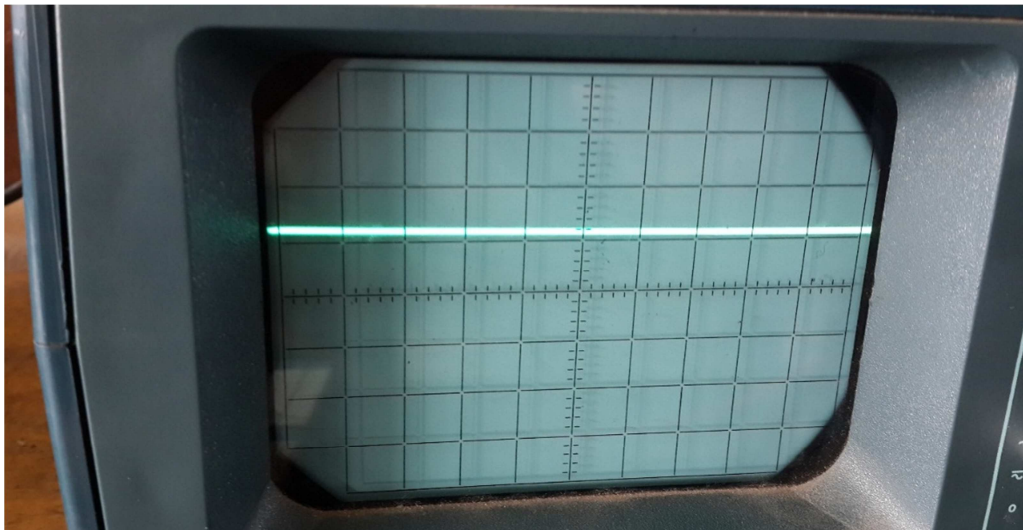
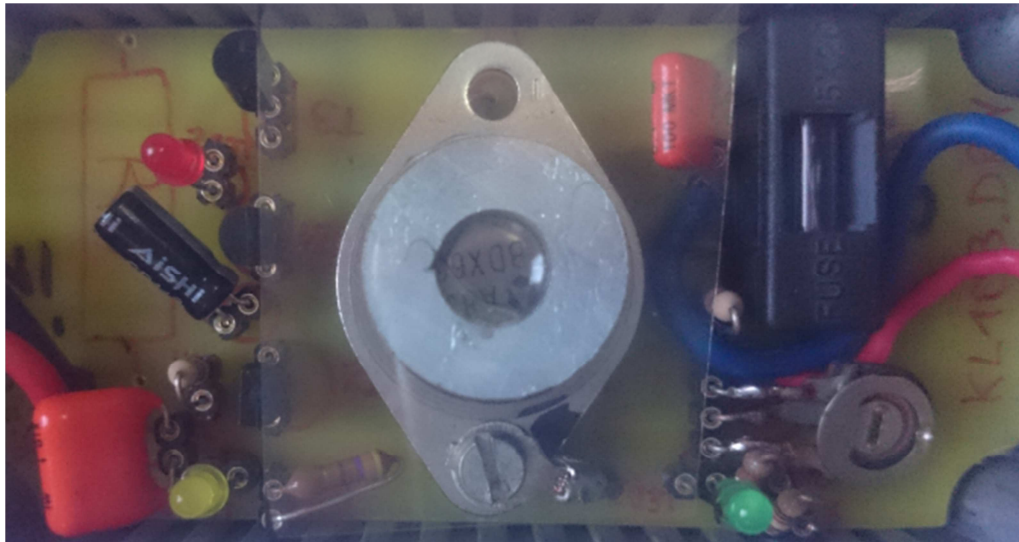


Figure III.17. Signal de sortie 12V.



**Figure III.18.** Schéma de régulateur à l'intérieur.

## Conclusion

Un régulateur à faible chute ou LDO est un régulateur de tension linéaire DC qui peut réguler la tension de sortie, même lorsque la tension d'alimentation est très proche de la tension de sortie. Les avantages d'un régulateur à faible chute de tension sur les autres DC aux régulateurs DC comprennent l'absence de bruit de commutation (car aucune commutation a lieu), plus petite taille de l'appareil (comme ni grandes inductances ni transformateurs sont nécessaires), et une plus grande simplicité de conception (se compose généralement d'une référence, un amplificateur, et un élément de passe). Un inconvénient important est que, contrairement à des régulateurs à découpage, les régulateurs DC linéaires doivent dissiper la puissance à travers le dispositif de régulation pour réguler la tension de sortie

Grace à la réalisation de ce régulateur qui fonctionne suivant de trois étages, un étage de régulation de tension, un étage de puissance et un étage de limitation du courant maximum autorisé, on a vu les essais par des tensions d'entrées supérieures de 12V par la signalisation des LEDs de témoins (entrée, sortie, court-circuit). Ces essais permettent de montrer clairement le rôle de régulateur contribuent d'éviter l'endommagé des appareils qui relie directement au panneau solaire.

afin de réalisation de ce circuit il est obligé à mettre un radiateur métallique à cause de Dissipation thermique plus élevée.



# CONCLUSION GENERALE

Le travail effectué dans le cadre de ce mémoire a permis d'étudier et de mettre au point un régulateur de tension forte puissance 12V-10A pour les systèmes photovoltaïques, pour ce faire nous l'avons partagé en trois chapitres.

Avant d'aller au cœur de notre objectif, au premier chapitre nous avons présenté des généralités sur les systèmes photovoltaïques, principe de fonctionnement, quelques définitions de différents types de systèmes PV, et ainsi une petite présentation sur les régulateurs de tension.

Nous avons consacré le deuxième chapitre à l'étude et modélisation de ce régulateur de tension forte puissance, comme un stabilisateur série à diode et transistor, avec le choix de ces composants TL431 et le transistor BDX66, et leurs coefficients de stabilisation, et après on a vu l'augmentation de puissance à partir le montage Darlington pour obtenir un courant plus élevé. Nous sommes ensuite passés au régulateur parallèle pour de forts courants, et les calculs théoriques pour notre régulateur.

Au troisième chapitre, nous avons voulu de réaliser ce régulateur pour vérifier les résultats expérimentaux, et faire la comparaison avec les résultats théoriques.

Ce travail non exhaustif offre quelques perspectives pour améliorer ce régulateur de tension au futur tel que ce régulateur de tension série, de type LDO, peut être amélioré de la façon suivante, pour offrir une puissance de sortie supérieure :

-Choisir un transistor darlington PNP de puissance supérieure:

- un MJ11011, MJ11013 ou MJ11015 peut, d'une part, améliorer la fonction LDO en la réduisant de 2V à 1.5V seulement, et d'autre part, un courant de sortie pour notre montage de 15A max.

-avec un NTE2350, on peut fixer le courant max. du montage à 25A.

-Au-delà de 300W en sortie, il est déconseillé de travailler avec une tension de 12V (car le diamètre des fils de câblage devient trop grand); dans ce cas, en électronique de puissance, il est recommandé d'opter pour une tension de 24V, ou même 48V.

-le coût des modules d'affichage 3 digits étant devenu très bas, grâce aux microcontrôleurs 8-bit, il est conseillé de rajouter un afficheur 3 digits monté en ampèremètre.

# BIBLIOGRAPHIE

- [1] T.T. Ha Pham, C. Clastres, F. Wurtz, S. Bacha, S. Ploix, "Mise en oeuvre de l'optimisation pour le dimensionnement et les études de faisabilité de systèmes multisources électriques dans le bâtiment" IBPSA France, 6 et 7 Novembre 2008, [www.ibpsa-france.net](http://www.ibpsa-france.net) .
- [2] P. Rodatz, G. Paganelli, A. Sciarretta et L. Guzzella, "Optimal power management of an experimental fuel cell/supercapacitor-powered hybrid vehicle," Control Engineering Practice, vol. 13, n° 1, january 2005, pp. 41-53.
- [3] S. H. Choi, J. Kim et Y. S. Yoon, "Fabrication and characterization of a LiCoO<sub>2</sub> batter super capacitor combination for a high-pulse power system," Journal of Power Sources, vol. 138, n° 1-2, november 2004, pp. 360-363.
- [4] Livre central photovoltaïque (1996), 724243.f.
- [5] [http://fr.wikipedia.org/wiki/Semi\\_conducteur](http://fr.wikipedia.org/wiki/Semi_conducteur)
- [6] Antonio Luque and Steven Hegedus, "Handbook of Photovoltaic Science and Engineering", John Wiley & Sons Ltd, 2003.
- [7] F. Kininger, "Photovoltaic Systems Technology", University of Kassel, 2003.
- [8] R.A. Messenger, J. Ventre, "Photovoltaic Systems Engineering (Second Edition)", CRC Press, 2004.
- [9] Tom Markvart & Luis Castaner, "Handbook of Photovoltaic's: Fundamentals and Applications", ELSEVIER, 2003.
- [10] [http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg\\_droi.php](http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php)
- [11] <http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>
- [12] Livre "LES ALIMENTATIONS ELECTRONIQUES", pages 107 à 115, et pages 202 à 206, Pierre Mayé, DUNOD, 2001.
- [13] A. Farret, M. Godoy Simoes, "Integration of Alternative Sources of Energy", John Wiley.
- [14] TL431 adjustable precision shunt regulator, Literature Number: SLVS005E, Texas Instruments, 1995

- [15] Low Drop Out regulator,  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Low-dropout\\_regulator](https://en.wikipedia.org/wiki/Low-dropout_regulator)
- [16] Linear and switching voltage regulator fundamental part 1, Literature Number: SNVA558,  
Texas Instruments, 2011
- [17] Compound Pair vs Darlington Pair,  
<http://sound.westhost.com/articles/cmpd-vs-darl.htm>
- [18] Using copper PCB etch for low value resistance, by Larry Spaziani, DN-71, UNITRODE  
Design Note, Texas Instruments, 2001
- [19] Radio Plans Electronique Loisirs, N°466, page 94, Septembre 1986
- [20] **ANSI PCB Trace Width Calculator,**  
<http://www.desmith.net/NMdS/Electronics/TraceWidth.html>
- [21] Calcul simplifié de dissipateurs thermiques,  
[http://www.sonelec-musique.com/electronique\\_bases\\_radiateur\\_calcul.html](http://www.sonelec-musique.com/electronique_bases_radiateur_calcul.html)
- [22] Les radiateurs,  
<http://kudelsko.free.fr/articles/radiateurs2.htm>

# ANNEXE

## TL431, A, B Series

Figure 1. Test Circuit for  $V_{KA} = V_{ref}$

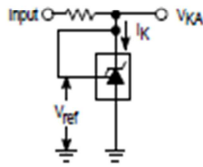


Figure 2. Test Circuit for  $V_{KA} > V_{ref}$

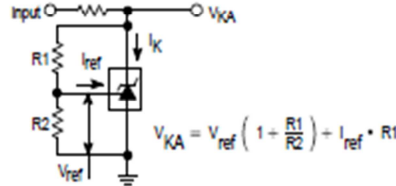


Figure 3. Test Circuit for  $I_{off}$

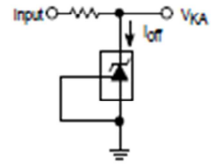


Figure 4. Cathode Current versus Cathode Voltage

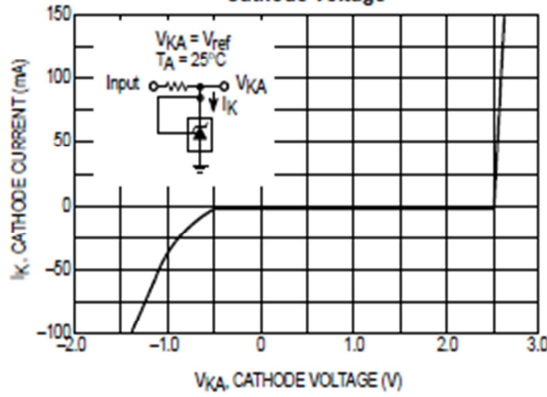


Figure 5. Cathode Current versus Cathode Voltage

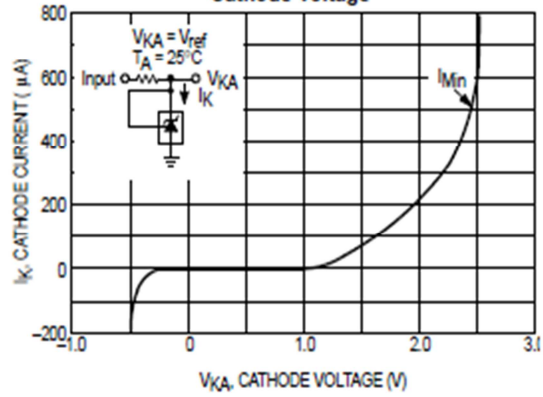


Figure 20. Output Control for a Three-Terminal Fixed Regulator

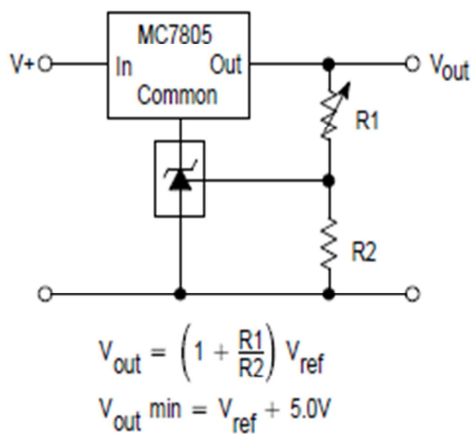
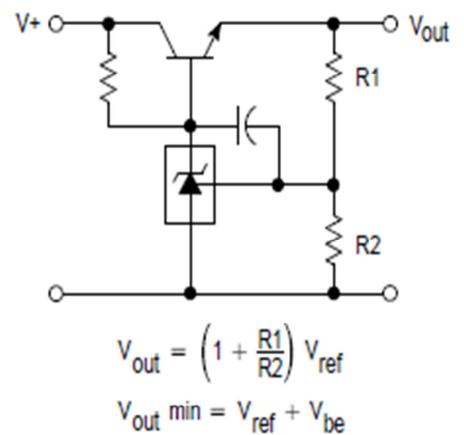


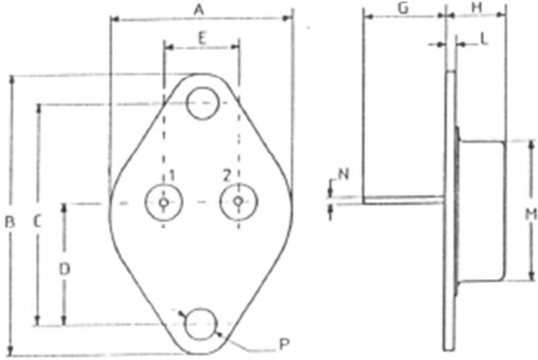
Figure 21. Series Pass Regulator



**Transistor BDX66**

**MECHANICAL DATA CASE TO-3**

DIMENSIONS		
	mm	inches
A	25,51	1,004
B	38,93	1,53
C	30,12	1,18
D	17,25	0,68
E	10,89	0,43
G	11,62	0,46
H	8,54	0,34
L	1,55	0,6
M	19,47	0,77
N	1	0,04
P	4,06	0,16



Pin 1 :	Base
Pin 2 :	Collector
Case :	Emitter