



Rapport de projet :

**Etude et dimensionnement d'une  
chaîne de conversion pour une voiture  
solaire avec la possibilité de la recharge  
à partir de la tension du secteur**

2020 /2021



**Réalisé par : (2GE1)**

- JEAFFAR Manale
- YACOUBI Mohamed Reda

**Encadré par :**

- Mr. DERRI Mounir

# Remerciement

Ce rapport de projet a été le fruit d'un travail acharné et une implication mais aussi grâce à plusieurs personnes qu'il est primordial de les remercier pour leurs efforts fournies.

Aux termes de ce travail, on tient à adresser nos sincères remerciements à l'égard de notre professeur Monsieur DERRI Mounir pour la qualité de son enseignement, son attention et sa gentillesse, qui ont fait des séances d'enseignement de l'élément de module Hacheurs et onduleurs autonomes, un moment très intéressant d'apprentissage et de partages d'informations.

On réserve aussi une reconnaissance spéciale à tous les enseignants de l'Ecole Hassania des travaux publics qui ont su donner une formation didactique et appréciable durant notre cursus. On ne terminera pas sans avoir exprimé des remerciements envers toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce projet.



## Table des figures :

Figure 1 : Classification des motorisations des VE .....	10
Figure 2 : Implantation des éléments d'une voiture électrique à traction avant.....	17
Figure 3 : Implantation des éléments d'une voiture électrique à propulsion .....	17
Figure 4 : Implantation des éléments d'une voiture électrique, moteurs dans les moyeux .....	18
Figure 5 : Exemple de moteur incorporé au moyeu : « Active Wheel » de Michelin Heulliez.....	18
Figure 6 : Structure d'un véhicule électrique .....	19
Figure 7 : Architecture d'un véhicule électrique à super-condensateur : topologie 1 .....	20
Figure 8 : Architecture d'un véhicule électrique à super-condensateur : topologie 2 .....	21
Figure 9 : Structure d'une voiture solaire-électrique .....	21
Figure 10 : Schéma de trois cellules PV associées en série .....	23
Figure 11 : Influence de l'association Série des cellules PV .....	23
Figure 12 : Schéma de 3 cellules photovoltaïques associées en parallèle .....	23
Figure 13 : Influence de l'association Parallèle des modules PV .....	24
Figure 14 : Association mixte de modules solaires .....	24
Figure 15 : Influence de l'association mixte (Série + Parallèle) des modules PV .....	25
Figure 16 : Cellules, modules et champ panneaux photovoltaïques .....	28
Figure 17 : Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque.....	28

# Table des matières

<b>Introduction générale.....</b>	<b>5</b>
<b>I. Passage du moteur thermique au moteur électrique .....</b>	<b>6</b>
I.1. Introduction.....	6
I.2. Impacts dus aux moteurs thermiques.....	6
I.2.1. Effets sur l'homme.....	6
I.2.1. Effets sur l'environnement .....	6
I.3. Dépendance au pétrole et solutions envisagées .....	7
I.4. La voiture électrique et les énergies renouvelables .....	8
<b>II. Généralités sur la voiture solaire électrique.....</b>	<b>9</b>
II.1. Introduction.....	9
II.2. Présentation des notions de voiture électrique et solaire.....	9
II.2.1. Voiture électrique.....	9
II.2.2. Voiture solaire .....	10
II.3. Mise en évidence des constituants de la voiture solaire-électrique .....	10
II.3.1. Moteur électrique.....	10
II.3.2. Batterie .....	12
II.3.3. Panneaux photovoltaïques .....	14
II.3.4. Régulateurs .....	15
II.3.5. Hacheurs .....	15
II.3.6. Convertisseurs .....	15
II.3.7. Boîtier d'interconnexion .....	16
II.3.8. Chargeur électrique .....	16
<b>III. Etude et dimensionnement d'une chaîne de conversion pour une voiture solaire avec la possibilité de la recharge à partir de la tension du secteur .....</b>	<b>16</b>
III.1. Les différentes architectures et configurations de conversion électrique dans une voiture solaire .....	16
III.1.1. Configurations de conversion électrique dans une voiture solaire .....	16
III.1.2. Architectures de conversion électrique dans une voiture solaire .....	19
III.2. CARACTERISTIQUES D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE: .....	22
III.2.1. Un panneau photovoltaïque.....	22
III.2.2. Principe de la commande MPPT .....	27
III.2.3. Modélisation et simulation d'un module PV par Psim .....	28
III.3. Dimensionnement de l'ensemble des composants de la chaîne de conversion électrique.....	32

III.3.1. Dimensionnement de notre véhicule : .....	32
III.3.2. Dimensionnement du panneau solaire .....	32
III.3.3. Dimensionnement des batteries .....	33
III.3.4. Dimensionnement des convertisseurs .....	34
<b>Conclusion .....</b>	<b>45</b>
<b>Références .....</b>	<b>46</b>

# Introduction générale

Depuis son émergence, l'automobile est devenue de plus en plus une nécessité majeure vu qu'il permet de réduire le temps de déplacement et facilite la vie à l'homme. Par ailleurs certains problèmes sont apparus avec le temps, tels que les émissions à effet de serre, la pollution, la dépendance au pétrole et ses dérives qui deviennent de plus en plus rares etc... À cet instar, l'orientation vers les nouvelles technologies s'est avérée comme une nécessité pour surmonter ces problèmes.

Suite à tous ces contraintes, les véhicules électriques constitueront la solution qui permettra de faire la transition vers les moyens de transports durable dans les décennies à venir. En plus de cela, si un fonctionnement à l'électricité renouvelable est choisi pour ce type de véhicules, il pourrait y avoir une réduction considérable des émissions de CO<sub>2</sub> ainsi qu'une amélioration locale de la qualité de l'air.

Dans ce projet nous avons choisi de traiter le cas d'une voiture solaire électrique en effectuant une étude et un dimensionnement de la chaîne de conversion pour ce type de voiture avec la possibilité de la recharge à partir de la tension du secteur.

Ce rapport de projet a été réalisé en traitant les parties majeures suivantes :

- Passage du moteur thermique au moteur électrique.
- Généralités sur la voiture solaire électrique.
- Etude et dimensionnement d'une chaîne de conversion pour une voiture solaire avec la possibilité de la recharge à partir de la tension du secteur avec simulation du système de conversion sous Psim.

# Passage du moteur thermique au moteur électrique :

## I.1. Introduction :

L'électrification des moteurs thermiques comprend le remplacement des moteurs à combustion interne par des moteurs qui utilisent l'électricité comme source d'énergie. Tout cela se fait afin d'éviter les effets indésirables et l'impact néfaste des moteurs à combustion interne que ça soit sur l'environnement ou sur l'homme.

## I.2. Impacts dus aux moteurs thermiques:

Les moteurs thermiques, en brûlant des carburants issus du pétrole, émettent des gaz d'échappement et des particules de métaux (plomb, zinc, mercure...) nuisibles à la santé des êtres vivants. Le gaz le plus important en quantité est le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>). Ce gaz est en partie responsable du réchauffement climatique. Les moteurs thermiques sont également très bruyants.

### I.2.1. Effets sur l'homme :

Plusieurs études ont démontré que la pollution présente en ville est pour un grand nombre expliquée à cause de la pollution des voitures avec moteurs thermiques. À cet instar, la pollution provoque une augmentation des maladies respiratoires (plus particulièrement chez les enfants) et des maladies cardio-vasculaires (infarctus, accidents vasculaires cérébraux). D'ailleurs, la pollution est accusée de développer de l'asthme et des allergies chez les plus jeunes. Les émissions de gaz de voitures à moteur thermique favorisent tout cela...

### I.2.1. Effets sur l'environnement :

Le moteur thermique a deux types de combustibles : l'essence et le diesel. Il a donc de gros rejets polluants pour la Terre et les Hommes. Voici une liste non-exhaustive des rejets que le moteur thermique produit :

- le dioxyde de carbone(CO<sub>2</sub>), gaz à effet de serre

- le monoxyde de carbone (CO), gaz incolore, inodore et toxique. Il est produit lors de combustions incomplètes.
- les hydrocarbures aromatiques monocycliques (HAM)
- les particules
- les oxydes d'azote : monoxyde d'azote (NO) et dioxyde d'azote (NO<sub>2</sub>). Les oxydes d'azote forment de l'ozone en réagissant sous l'action des UV.

Par ce fait, le moteur thermique est donc très polluant.

### I.3. Dépendance au pétrole et solutions envisagées:

La dépendance au pétrole est une partie importante du problème énergétique actuel. Elle concerne surtout les pays développés, particulièrement dans les domaines de la mobilité (transport de marchandises, transport individuel et aérien) et des machines (travaux publics, agriculture).

Cette dépendance au pétrole est d'autant plus importante que les villes sont étendues et que les populations sont tributaires des véhicules individuels pour leurs déplacements.

L'augmentation du coût du pétrole sur le long terme, la contrainte sur la balance des paiements, les difficultés géopolitiques que pose son approvisionnement, ainsi que sa raréfaction dans le futur ont conduit un certain nombre de pays consommateurs à étudier et mettre en place une politique de diminution de cette dépendance depuis les chocs pétroliers des années 1970. Les effets négatifs du pétrole sur l'environnement s'ajoutent aujourd'hui aux inconvénients pour accélérer la mise en place de cette politique.

Différentes pistes sont envisagées afin de permettre la réduction de la dépendance au pétrole, parmi lesquelles on trouve:

- la réduction des gaspillages énergétiques;
- Le développement de l'éco mobilité : des modes de transports peu ou pas dépendant du pétrole (ferroviaire, train, tramway, métro, trolleybus, bus à haut niveau de service, V.A.E., ..);



- l'emploi d'autres sources d'énergie, telles que les énergies renouvelables, le charbon ou l'énergie nucléaire.
- L'optimisation des moteurs thermiques
- L'amélioration du rendement des moteurs (injection, moteur, équipement, etc.)
- L'hybridation (électrique et thermique).
- L'utilisation de nouvelles énergies
- Les biocarburants
- Le gaz naturel véhicule (GNV)
- Le gaz de pétrole liquéfié (GPL)
- L'électrique
- Le solaire
- L'hydrogène (dans quelques décennies).

#### I.4. La voiture électrique et les énergies renouvelables :

Dans les décennies à venir, les véhicules électriques et hybrides joueront un rôle très important dans le processus d'évolution vers un transport durable. Si ces véhicules sont mis en marche grâce à l'électricité renouvelable, ils peuvent contribuer à réduire considérablement les émissions de dioxyde de carbone et à permettre une amélioration locale de la qualité de l'air.

Les véhicules électriques peuvent même contribuer à rendre le secteur de l'énergie plus durable si les batteries peuvent être utilisées pour gérer une production croissante selon la nature variable de l'électricité d'origine éolienne et solaire.

Comparées à la technologie des moteurs à combustion interne, les transmissions électriques à partir de batteries offrent de multiples avantages tels que :

- la possibilité d'utiliser des sources d'énergie variées, notamment toutes celles d'origine renouvelable, avec un haut rendement

- le développement d'une mobilité durable et décarbonnée à condition d'utiliser des sources d'énergies renouvelables

- la réduction ou la suppression de la pollution de l'air (selon la source de production d'énergie) et réduire les nuisances sonores.

En d'autres termes plus concis, on peut dire que pour bénéficier des avantages envisagés derrière l'utilisation des véhicules électriques, il est plus judicieux d'utiliser l'énergie d'origine renouvelable.

## I. Généralités sur la voiture solaire électrique :

### II.1. Introduction :

Les véhicules électriques solaires contiennent plusieurs composants différents de ceux des véhicules à moteur thermique. Parmi ces composants, nous pouvons citer: le moteur électrique, les batteries, les panneaux photovoltaïques, etc.

### II.2. Présentation des notions de voiture électrique et solaire :

#### II.2.1. Voiture électrique:

Une voiture électrique est une automobile mue par un ou plusieurs moteurs électriques. La source d'électricité pour ces moteurs était à l'origine une batterie d'accumulateurs.

Il existe cependant différents types de voitures électriques qui sont regroupés dans le tableau suivant :

Désignation	Type de moteur propulsant le véhicule	Source de l'énergie utilisée par le moteur
<b>Voiture électromotrice</b>	Électrique	Électricité stockée dans les batteries
<b>Voiture hybride</b>	Électrique, couplé au thermique	<ul style="list-style-type: none"><li>• Carburant consommé par le moteur thermique</li><li>• Générateur pour les hybrides rechargeables</li><li>• Électricité stockée</li></ul>

		dans les batteries
<b>Voiture à hydrogène</b>	Moteur électrique	Électricité produite par la pile à combustible

## II.2.2. Voiture solaire:

Une voiture solaire est un véhicule alimenté par des cellules photovoltaïques et évoluant sur le réseau routier. Ce sont donc des voitures électriques, qui nécessitent une (des) batterie(s) pour stocker l'énergie qui leur est nécessaire lorsqu'il y a moins de lumière ou même pour pouvoir accélérer lorsque l'apport direct d'énergie solaire n'est pas suffisant pour cela.

## II.3. Mise en évidence des constituants de la voiture solaire-électrique :

### II.3.1. Moteur électrique :

Pour la traction des véhicules électriques, différents types de moteurs peuvent être utilisés. Moteurs avec balais (moteur à courant continu par exemple), ou moteur sans balais (moteur synchrone ou asynchrone par exemple). La figure ci-dessous présente une classification de motorisation des véhicules électriques ou électriques hybrides. Dans cette figure, MCC : Machine à Courant Continu, MAP : Machine à Aimant Permanent, MRV : Machine à Réluctance Variable.

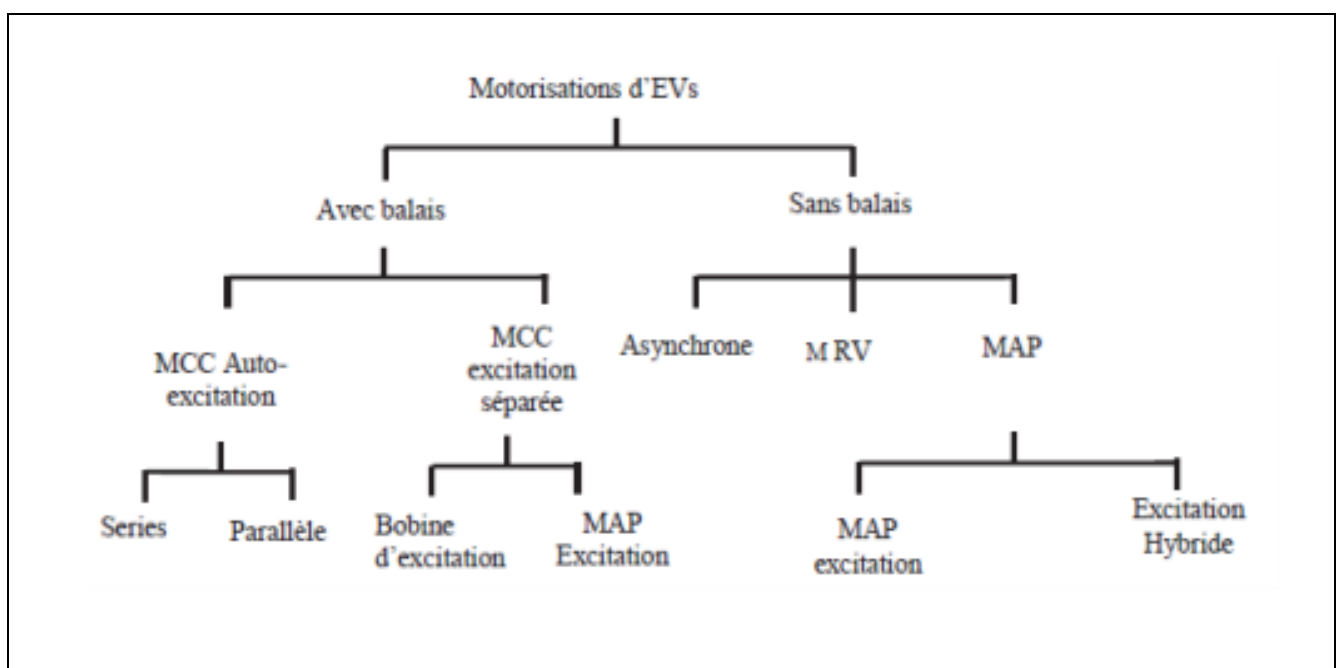


Figure 1 : Classification des motorisations des VE

Les caractéristiques principales d'une machine électrique pour l'application de traction sont :

- 1 – Densités de couple et de puissance élevées
- 2 – Couple élevé au démarrage, à basses vitesses et au freinage, à grande puissance et à grandes vitesses
- 3 – Large bande de vitesse, avec une région de puissance constante atteignant 3 à 4 fois la vitesse de base
- 4 – Rendement élevé sur les larges bandes de vitesse et de couple, y compris le fonctionnement à faible couple
- 5 – Capacité de surcharge, généralement deux fois le couple de base pendant un temps court
- 6 – Fiabilité et robustesse appropriées à l'environnement du véhicule
- 7 – Coût acceptable

	MCC	MSAP	MAS
Rendement maximal	Bon	Très bon	Passable
Rendement moyen	Moyen	Très bon	Bon
Vitesse maximale	Passable	Bon	Bon
Coût de l'électronique de puissance	Très bon	Moyen	Passable
Coût du moteur	Passable	Moyen	Bon

Espace couple-vitesse	Moyen	Très bon	Moyen
-----------------------	-------	----------	-------

Les moteurs sont testés pour déterminer ceux qui offrent les meilleurs performances (rendement, poids, couple, ...) pour le VE. Chaque type de moteur a des avantages et des inconvénients. Le tableau ci-dessous présente le résultat d'une étude comparative de fiabilité de quelques moteurs des VEs :

Avec MSAP signifie Machine Synchrone à Aimant Permanent.

Les moteurs à courant continu (MCC) sont les moteurs les plus utilisés, mais le développement de l'électronique de puissance associé aux aimants permanents provoque une montée en puissance des moteurs synchrones et asynchrones (MSAP). Le tableau ci-dessous montre quelques modèles de VEs avec les motorisations associées :

Modèles V Es	Type de motorisation
Fiat Panda Elettra	MCC série
Mazda Bongo	MCC séparé
Conceptor G-Van	MCC à excitation séparée
Suzuki Senior Tricycle	AM MCC
GM EV1	Moteur asynchrone
Toyota Prius	MSAP
Chloride Lucas	Moteur à RV

### II.3.2. Batterie:

Le stockage de l'énergie électrique à bord d'un véhicule reste le problème majeur actuellement. Ce stockage est caractérisé par deux paramètres principaux :

- La puissance utilisable(en kW) : Il s'agit du produit de la tension batterie par l'intensité maximale qu'elle peut débiter (c.-à-d.  $P=U \times I$ ). La puissance utilisable doit être au moins égale à la puissance de pointe du moteur électrique afin de permettre son alimentation sur toute sa plage de fonctionnement.
- L'énergie stockée(en kWh) : Cette énergie peut être comparable au volume d'un réservoir de carburant d'un véhicule thermique. C'est l'énergie stockée qui va déterminer l'autonomie d'un véhicule électrique.

Il existe plusieurs types de batteries utilisées dans le secteur automobile comme la batterie plomb (Pb), la batterie cadmium nickel (Cd-Ni), la batterie nickel métal hydrure (Ni-Mh), la batterie lithium. Mais la batterie lithium reste la meilleure parce que :

- Le lithium est le plus léger et le plus réducteur des métaux, de masse atomique trois, juste après l'hydrogène et l'hélium. Il a une densité de 0,5 kg/dm<sup>3</sup>
- Tous les matériaux pouvant accueillir en leur sein des ions lithium peuvent servir à la fabrication d'accumulateurs. C'est pourquoi, il existe une grande variété d'accumulateurs au lithium.
- Les accumulateurs lithium offrent aujourd'hui les plus importantes densités d'énergies massiques et volumiques (environ 160 Wh/kg et 400 Wh/l). Ils sont aussi les plus délicats dans leur utilisation et un BMS (Battery Management System) est indispensable pour s'assurer de la meilleure longévité. Ils n'ont aucun effet mémoire.
- La tension d'un accumulateur lithium varie entre 3,0 V et 3,7 V en fonction de sa technologie de fabrication et elle reste stable en charge comme en décharge.
- Le recyclage de ces batteries n'est pas d'actualité, mais les entreprises spécialisées affirment qu'elles seront opérationnelles lorsque les véhicules arriveront en fin de vie.

Le cyclage (nombre de cycles complets de charge et décharge de la batterie) indique la durée de vie de la batterie solaire. Alors il est recommandé de bien vérifier que le cyclage est clairement indiqué par le fabricant. Les batteries solaires de qualité ont une durée de vie de plus de 500 cycles, soit de 7 ans jusqu'à 15 ans.

On distingue plusieurs méthodes pour assurer la recharge des batteries de traction :

- Charge lente : La charge lente consiste à recharger une batterie à partir d'une prise

240 V 16 A.

Exemple : Déterminons le temps pour une charge complète d'une Peugeot Lion dont la batterie a une capacité énergétique de 16 kWh.

Puissance de charge :  $240 \text{ V} \times 16 \text{ A} = 3840 \text{ W}$  soit 3,84 kW

Temps de charge :  $16 \text{ kWh} / 3,84 \text{ kW} = 4,2 \text{ h}$

Ce temps est théorique et doit être majoré de 10 % pour tenir compte des pertes, soit environ 5 heures pour notre exemple.

- Charge rapide : Les batteries modernes lithium peuvent être chargées à 80 % en l'espace de 30 minutes.
- Échange pack : Le remplacement du pack batterie déchargé par un autre prêt à l'emploi.
- Charge par induction : Ce principe de charge supprime toute connexion entre le véhicule et le réseau électrique. Une plaque à induction est installée sur une place de parking réservée au véhicule électrique. Lorsqu'un véhicule y stationne, le capteur d'énergie placé sous le véhicule capte l'induction et la transforme en courant afin de recharger la batterie.

Le problème principal est le stockage difficile de l'énergie. On espère que, dans le futur, les batteries auront une densité d'énergie et une puissance plus hautes, autant dans le processus de chargement que dans celui de déchargement. Les caractéristiques principales de ces batteries devraient être :

- un coût bas ;
- compatible avec l'environnement ;
- une quantité minimale du processus d'autodécharge ;

18

- une longue durée de

### **II.3.3. Panneaux photovoltaïques:**

Pour alimenter les voitures électriques en électricité on a également pensé à installer des panneaux solaires sur les parties planes de la voiture. Sachant que la voiture est exposée au soleil lorsqu'elle roule, alors on peut utiliser l'énergie solaire pour recharger les batteries et ainsi permettre au véhicule une certaine autonomie. Découvert en

1839 par Alexandre Edmond Becquerel, l'effet photovoltaïque permet la transformation de l'énergie lumineuse en électricité. Ce principe repose sur la technologie des semi-conducteurs.

C'est Albert Einstein qui, le premier, a pu expliquer le principe photovoltaïque, avec à la clef, le prix Nobel de physique en 1923. En 1955, des chercheurs américains (Chapin, Fuller, Pearson et Prince) travaillant pour les laboratoires Bell Telephone (devenus aujourd'hui Alcatel-Lucent Bell Labs) développent une cellule photovoltaïque à haut rendement de 6%. Les premières applications ont lieu dès les années 60 avec l'équipement de satellites spatiaux. Les américains lancent en 1959 le satellite Vanguard qui est alimenté par des piles photovoltaïques ayant un rendement de 9%. Puis à partir de 1970, les premières utilisations terrestres ont concerné l'électrification des sites isolés. Les panneaux solaires installés dans les voitures solaires électriques sont les mêmes panneaux utilisés pour la production de l'électricité dans les sites photovoltaïques sauf que ces panneaux doivent avoir une forme qui peuvent s'adapter à la surface plane des voitures.

#### **II.3.4. Régulateurs:**

On peut brancher une batterie solaire directement sur un panneau solaire, mais on risque d'endommager la batterie si son niveau de charge dépasse les 90%. C'est pour cela qu'il est vivement recommandé d'installer un régulateur solaire entre le panneau solaire photovoltaïque et la/les batteries solaires. Le rôle du régulateur dans une installation solaire est très important car le niveau de charge des batteries solaires ne doit être ni trop bas (pas en dessous de 40%) ni trop haut (ne pas dépasser 95%). Des charges trop faibles ou trop importantes non régulées détériorent les batteries et limitent leur durée de vie.

#### **II.3.5. Hacheurs:**

Le convertisseur électronique, encore appelé hacheur, permet de faire varier la tension aux bornes du moteur et par conséquent la vitesse de rotation. Il agit par découpage de la tension, d'où son nom de « hacheur ». Note : Les convertisseurs sont gérés par un microprocesseur qui limite ou stoppe le fonctionnement en cas de température et d'intensité excessives.



### **II.3.6. Convertisseurs:**

Le circuit de bord d'un véhicule électrique est identique à celui d'un véhicule thermique et doit être alimenté par une batterie de 12 V. Les véhicules électriques ne peuvent plus être équipés d'un alternateur pour charger la batterie de bord. Cette fonction est alors confiée à un convertisseur DC/DC, qui puise l'énergie électrique dans la batterie haute tension et la transforme pour charger la batterie 12 V, tout en assurant l'isolement électrique entre les deux batteries (isolation galvanique).

### **II.3.7. Boîtier d'interconnexion:**

Le boîtier d'interconnexion transmet l'énergie à la bonne intensité soit : à la batterie, aux composants électroniques ou au moteur de la voiture, en fonction de ce qui leur est nécessaire et de la phase de roulage du véhicule (charge, accélération, décélération, etc.).

### **II.3.8. Chargeur électrique:**

Le chargeur, quant à lui, accoutume le courant apporté par la prise de branchement à ce que la batterie électrique peut recevoir.

## **II. Etude et dimensionnement d'une chaîne de conversion pour une voiture solaire avec la possibilité de la recharge à partir de la tension du secteur :**

### **III.1. Les différentes architectures et configurations de conversion électrique dans une voiture solaire:**

#### **III.1.1. Configurations de conversion électrique dans une voiture solaire :**

La motorisation électrique peut être implantée sur l'essieu avant, l'essieu arrière ou les deux.

Elle est alors composée d'un moteur équipé d'un réducteur, généralement épicycloïdal, accouplé à un différentiel. L'ensemble est relié aux roues par l'intermédiaire de transmissions.

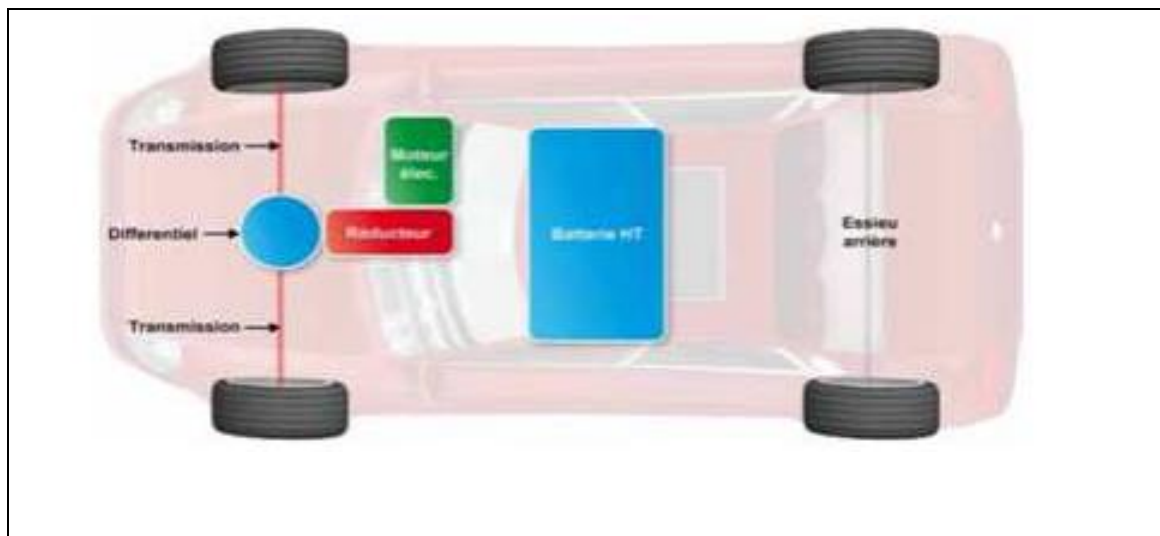


Figure 2: Implantation des éléments d'une voiture électrique à traction avant.

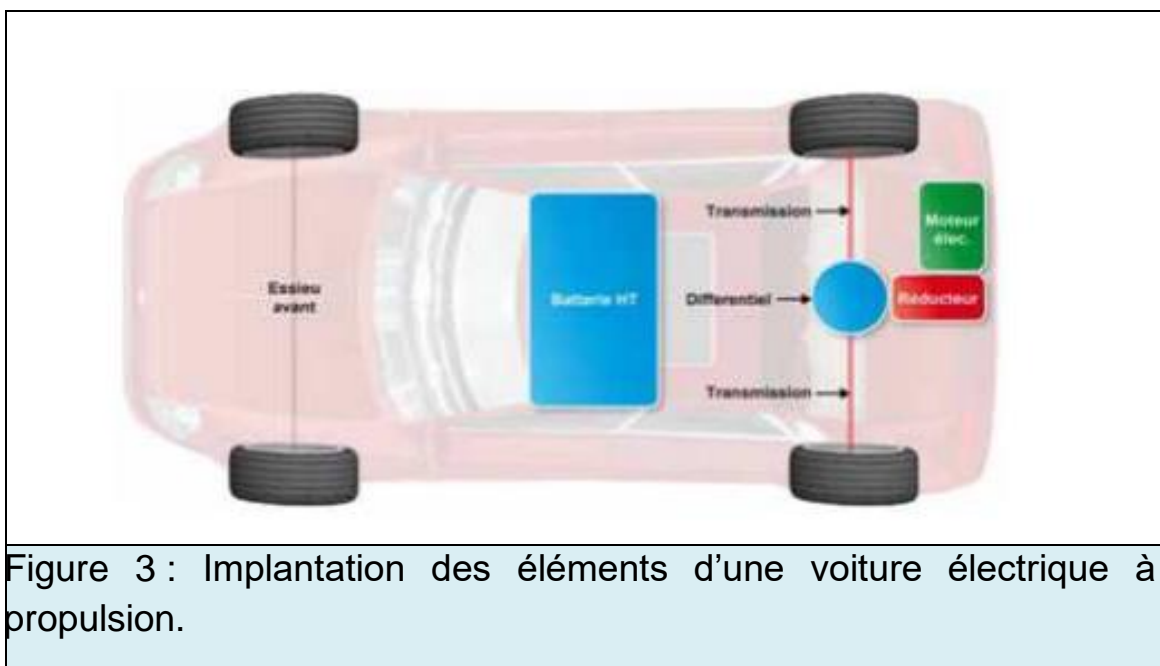


Figure 3: Implantation des éléments d'une voiture électrique à propulsion.

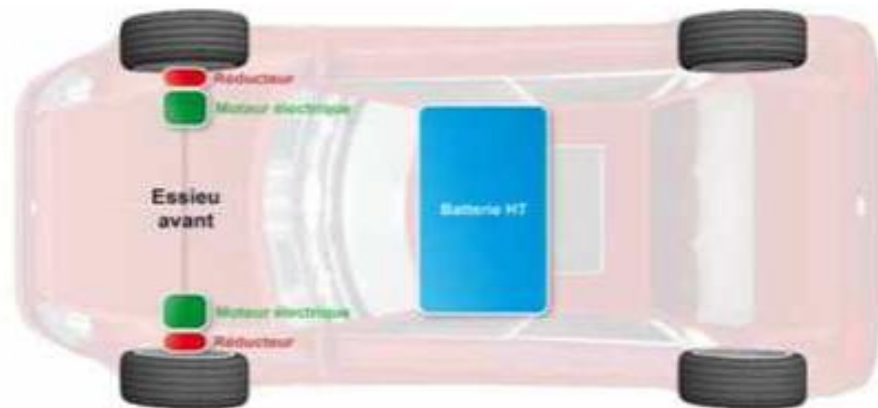


Figure 4 : Implantation des éléments d'une voiture électrique, moteurs dans les moyeux.



Figure 5 : Exemple de moteur incorporé au moyeu : « Active Wheel » de Michelin Heulliez.

Les moteurs peuvent être incorporés aux moyeux sur l'essieu avant, l'essieu arrière ou les deux (Figure II-8). Cette solution présente des inconvénients, car d'une part, on augmente les masses non suspendues et d'autre part, il est nécessaire d'utiliser un convertisseur onduleur par moteur

### III.1.2. Architectures de conversion électrique dans une voiture solaire :

Comme évoqué précédemment, les principaux éléments d'un véhicule électrique sont un moteur électrique une batterie et des convertisseurs de puissances.

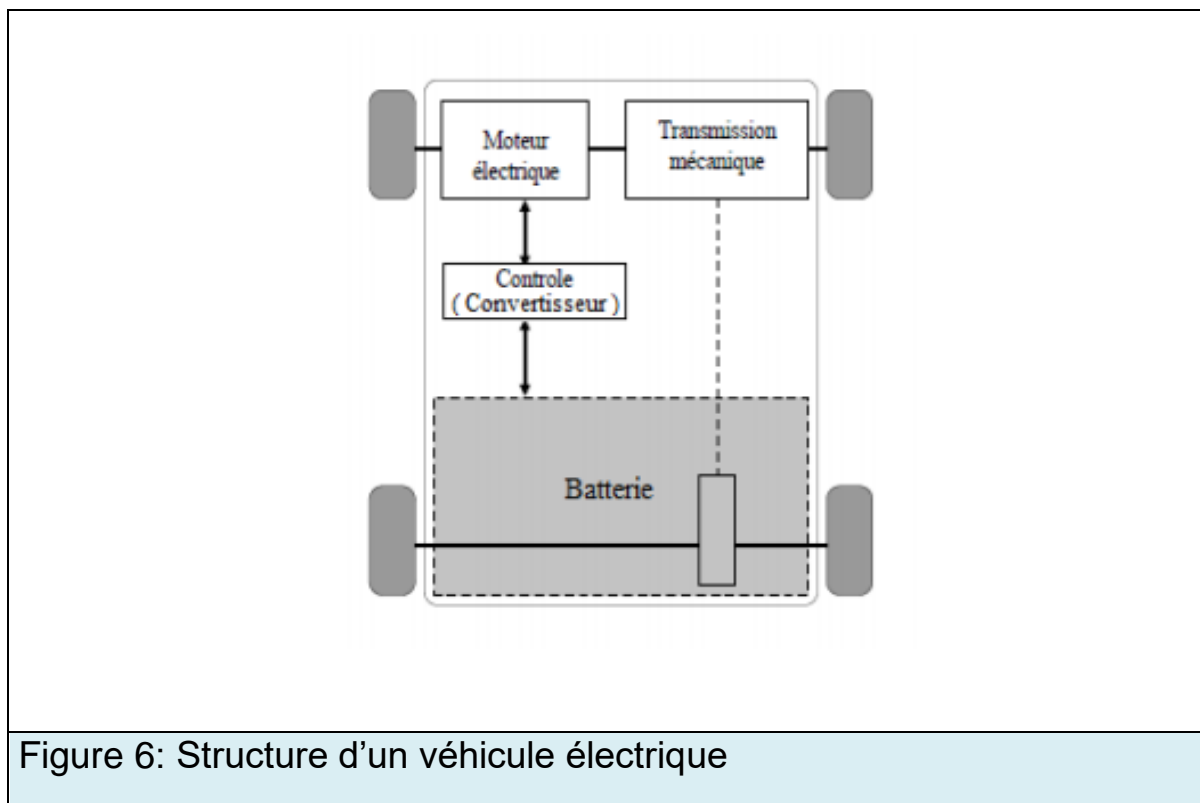
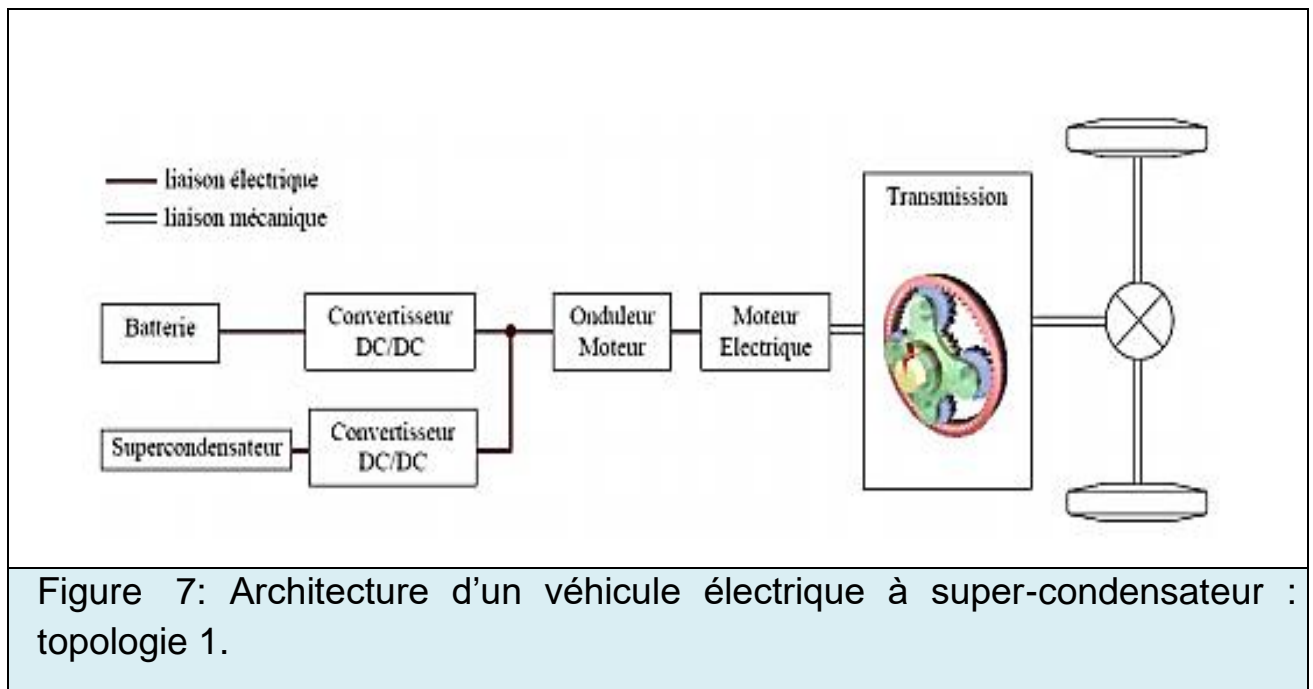


Figure 6: Structure d'un véhicule électrique

Les véhicules tout électriques actuels sont exclusivement des véhicules circulant dans des zones urbaines. Leurs autonomies varient entre 70 et 120 km pour les batteries au Plomb et CadmiumNickel, et entre 150 et 200 km pour les batteries Li-ion et Nickel-métal-hydrure

Pour certains VEs, il y a une hybridation entre la batterie et le super-condensateur (SC). Le super-condensateur est une source de puissance capable d'assurer les forts appels de puissance en 20 Préliminaires cas d'accélération et de récupérer de l'énergie en cas de décélération. Tandis que les batteries fournissent de l'énergie nécessaire

pour le fonctionnement. De plus, les super-condensateurs sont adaptés pour récupérer de l'énergie lors des phases de freinage en raison de leur nombre de cycles élevé et de leur dynamique rapide. Par conséquent, l'hybridation de la batterie et du super-condensateur permet d'obtenir de meilleures performances en termes d'apport énergétique, de coût et de durée de vie du système. Les figures ci-dessous présentent deux topologies possibles d'architecture d'un véhicule électrique à super-condensateur. La topologie 1 donne plus de degrés de liberté. Elle assure une tension stable du bus DC. Tandis que la topologie 2, avec un seul étage de conversion, assure une tension variable du bus DC avec moins de perte. Pour cette deuxième topologie, la variation de la tension du bus DC est due à une variation de charge en fonction du cycle de roulage.



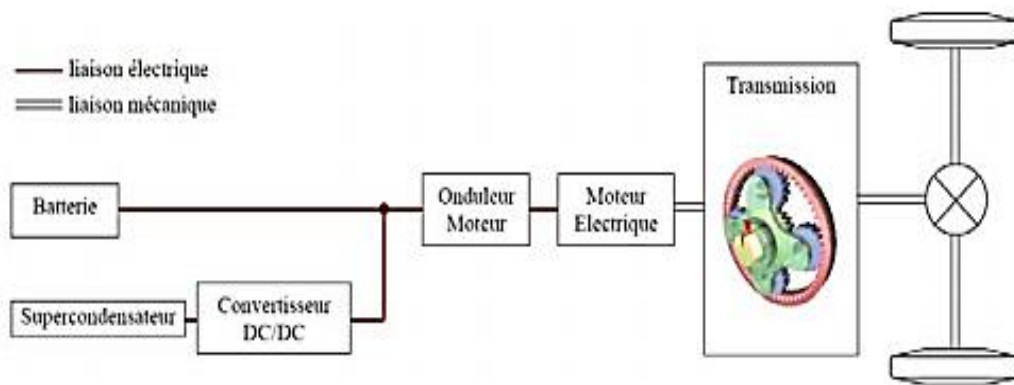


Figure 8 : Architecture d'un véhicule électrique à super-condensateur : topologie 2.

Après l'insertion des panneaux photovoltaïques et d'un convertisseur DC/DC unidirectionnel qui va faire la conversion de la tension reçue par les panneaux afin de stocker l'énergie dans la batterie et alimenter le moteur électrique. La structure d'un véhicule solaire-électrique est présentée dans la figure ci-dessous :

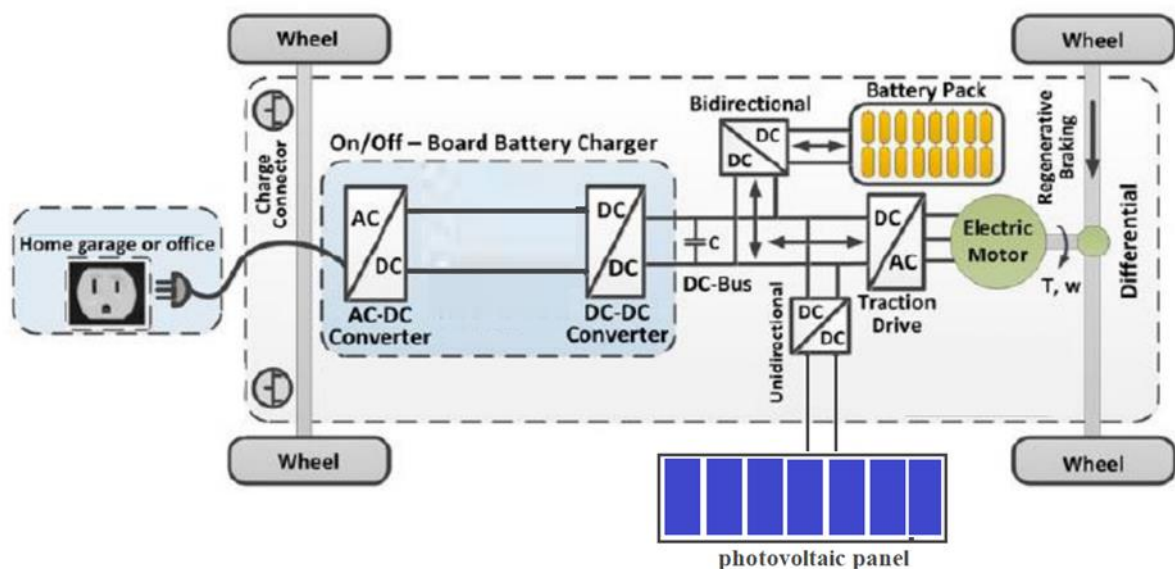


Figure 9 : Structure d'une voiture solaire-électrique

## III.2. CARACTERISTIQUES D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE:

### III.2.1. Un panneau photovoltaïque:

Un panneau photovoltaïque est constitué d'une série de cellules photovoltaïques, formées d'un matériau semi-conducteur en deux couches, l'une dopée positivement (P) et l'autre négativement (N). C'est une jonction PN. Lorsqu'un électron est arraché, il se forme à la place un « trou », se comportant comme une charge positive. L'électron et le trou s'échappent de part et d'autre de cette jonction PN (les électrons vers N et les trous vers P), créant une différence de potentiel (ce que l'on mesure en volts). Une cellule photovoltaïque produit donc ainsi du courant électrique continu.

#### → Association des Cellules Photovoltaïques :

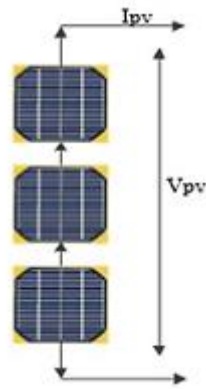
Les caractéristiques des modules solaires tels que le coefficient de température, le rendement sont principalement déterminées par les cellules photovoltaïques qui les composent. Le type d'interconnexion des cellules influe sur ces caractéristiques. La mise en série et où en parallèle de ces cellules ont des effets différents spécialement en présence des défauts d'ombrage.

En effet, l'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donne lieu à un générateur PV. Si les cellules se connectent en série, les tensions de chaque cellule s'additionnent, augmentant la tension totale, si les cellules se connectent en parallèle, c'est l'ampérage qui augmentera.

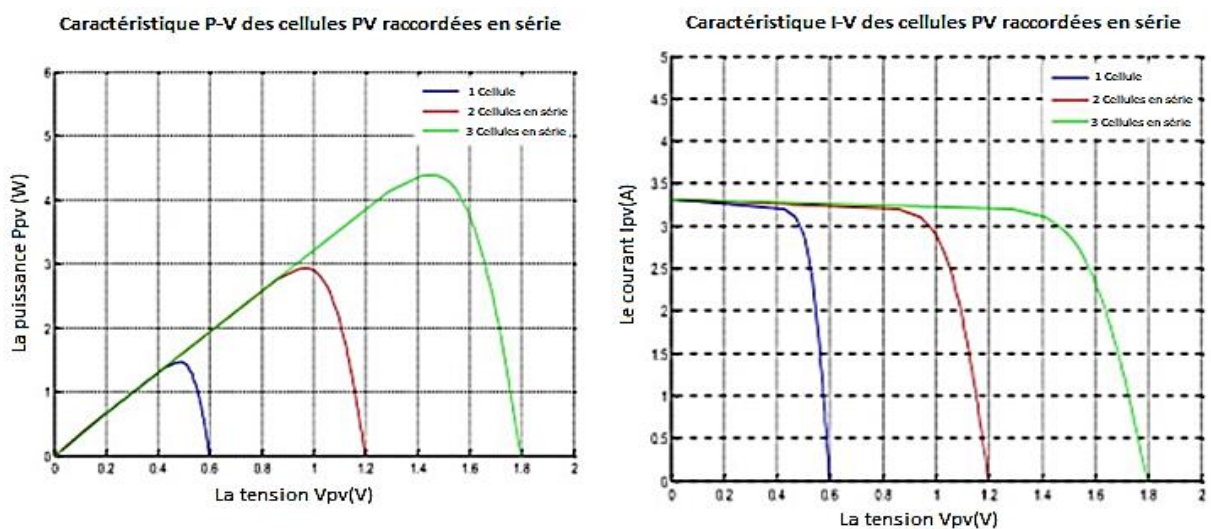
#### ➤ Association en série :

En additionnant des cellules ou des modules identiques en série, le courant de la branche reste le même mais la tension augmente proportionnellement au nombre de cellules (modules) en série.





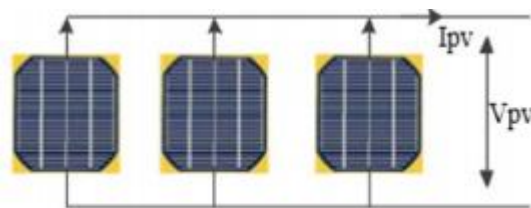
**Figure 10:** Schéma de trois cellules PV associées en série



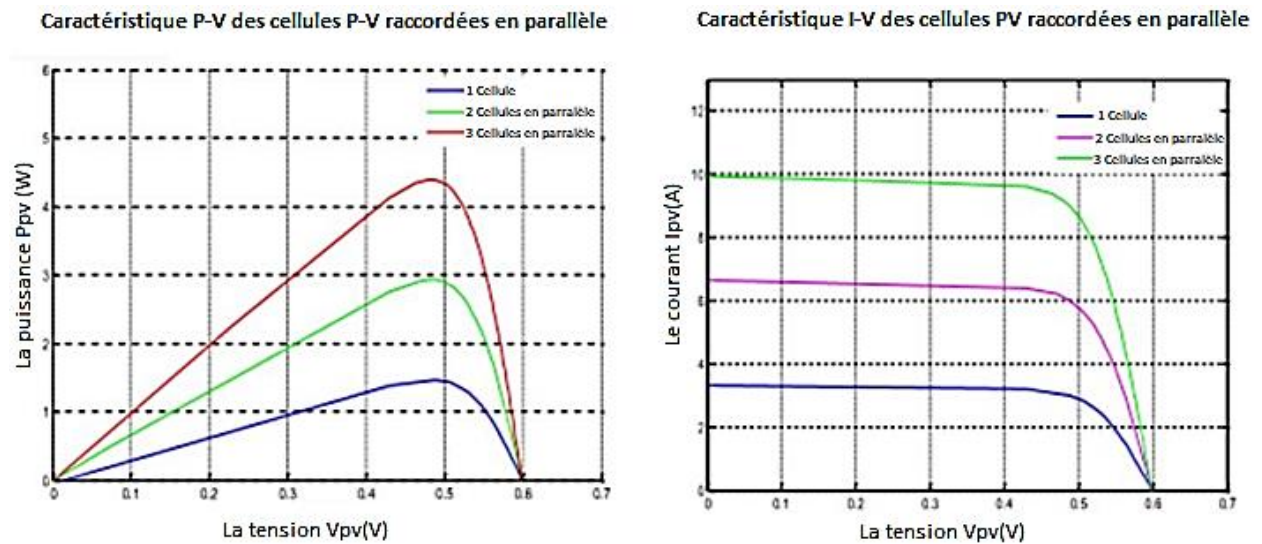
**Figure 11:** Influence de l'association Série des cellules PV

### ➤ Association en Parallèle :

Les propriétés du groupement en parallèle des cellules sont duales de celles du groupement en série. Ainsi, dans un groupement des cellules connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants à tension donnée.



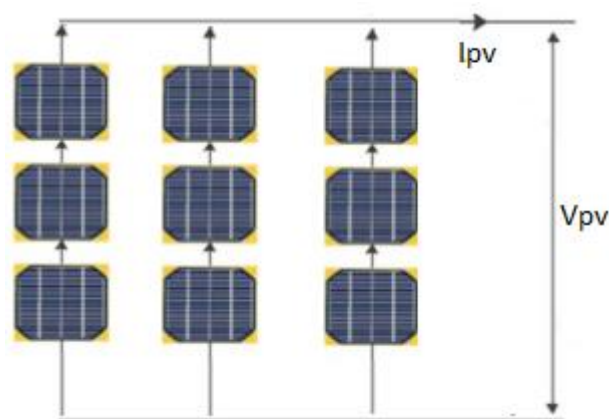
**Figure 12:** Schéma de 3 cellules photovoltaïques associées en parallèle



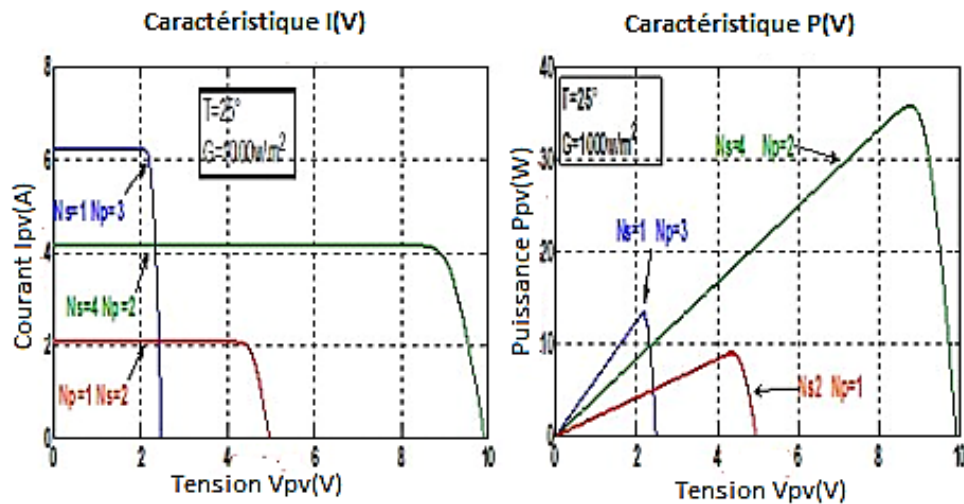
**Figure 13:** Influence de l'association Parallèle des modules PV

➤ **Association mixte (Série + Parallèle) :**

Pour avoir une satisfaction en courant et en tension, on est obligé d'utiliser un groupement mixte, c'est à dire Série-Parallèle.



**Figure 14 :** Association mixte de modules solaires



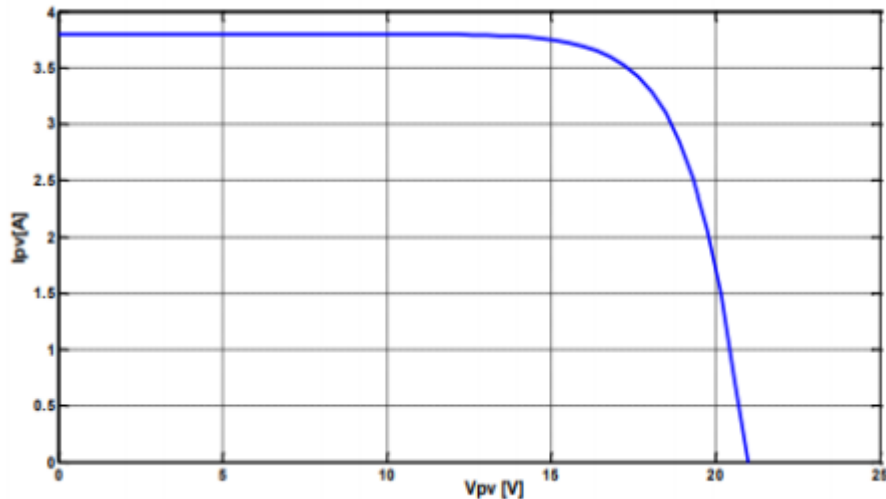
**Figure 15:** Influence de l'association mixte (Série + Parallèle) des modules PV

Si on a un groupement de  $N_s$  module en série dans une branche, et  $N_p$  branches en parallèle et si  $P_m$  est la puissance crête disponible sur un module, alors la puissance disponible aux bornes de ces panneaux photovoltaïques sera :  $P = N_s * N_p * P_m$ .

La plupart des panneaux photovoltaïques commerciaux sont constitués par des sous-réseaux de cellules connectées en série. Chacun de ces sous-réseaux est lui-même constitué d'un groupe de cellules photovoltaïque connectés en série.

#### ➤ Caractéristiques courant-tension:

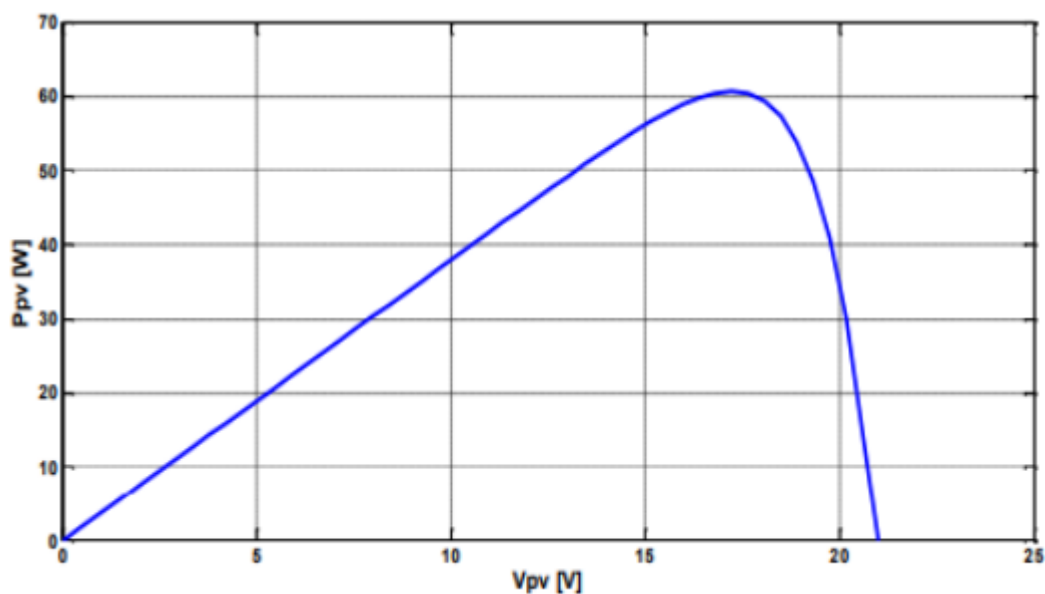
Le panneau photovoltaïque peut être considéré comme une source de puissance à cause de la difficulté de donner un caractère source de courant ou de tension à un panneau photovoltaïque sur toute l'étendue de la caractéristique courant-tension. A température et éclairement fixés, la caractéristique courant-tension d'une cellule a l'allure suivante :



De cette courbe, on peut marquer l'existence du :

- Point de fonctionnement à vide :  $U_v$  pour  $I = 0A$
- Point de fonctionnement en court-circuit :  $I_{cc}$  pour  $U = 0V$
- Point  $P_m$  où la puissance est maximale, et qui correspond à l'intersection du point  $U_{pm}$  et  $I_{pm}$ , ce point représente une très grande importance pour tirer le maximum d'énergie et exploiter au mieux la puissance installée. C'est pourquoi on utilise des régulateurs solaires pour se placer à côté de ce point.

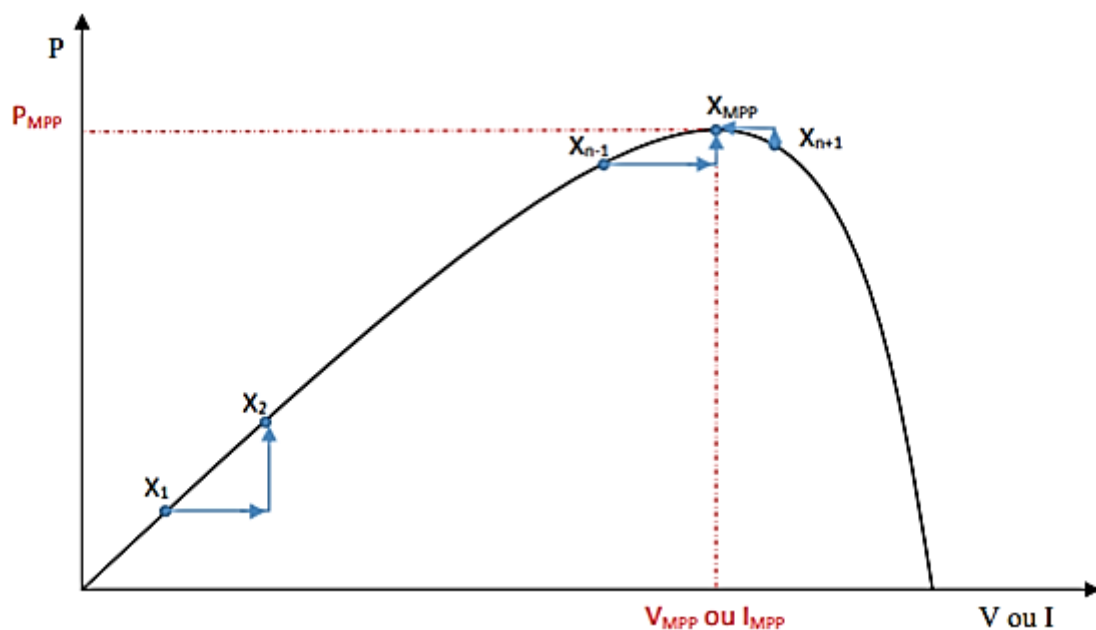
➤ Caractéristiques puissance-tension:



On remarque que la courbe présente deux parties séparées par le point  $P_m$ , la puissance chute rapidement après ce point. Il est donc très important de travailler au plus près de  $P_m$  pour avoir un rendement optimal.

### III.2.2. Principe de la commande MPPT :

Par définition, les commandes MPPT associées à la phase d'adaptation intermédiaire peuvent être implémentées et exécuter GPV (générateur photovoltaïque) de manière à produire en permanence une puissance maximale. Et donc, quelles que soient les conditions météorologiques (température et rayonnement), l'onduleur place le système au point de fonctionnement maximal (VPPM et IPPM). La chaîne de conversion photovoltaïque sera optimisée par un convertisseur statique (CS) commandé par une MPPT. La commande MPPT fait varier le rapport cyclique du convertisseur statique (CS), à l'aide d'un signal électrique approprié, pour tirer le maximum de puissance que le GPV peut fournir. L'algorithme MPPT peut être plus ou moins compliqué pour rechercher le MPP. En général, il est basé sur la variation du rapport cyclique du CS en fonction de l'évolution des paramètres d'entrée de ce dernier ( $I$  et  $V$  et par conséquent la puissance du GPV) jusqu'à se placer sur le MPP.



### III.2.3. Modélisation et simulation d'un module PV par Psim :

Un générateur photovoltaïque ou module est constitué d'un ensemble de cellules photovoltaïques élémentaires montrées en série et/ou parallèle afin d'obtenir des caractéristique électrique désirées tels que la puissance, le courant et la tension.

Les panneaux sont connectés en série. Ils forment alors une chaîne de modules ou string. Les modules sont montés en série et en parallèle pour réaliser un champ photovoltaïque.



Figure 16 : Cellules, modules et champ panneaux photovoltaïques

Il existe plusieurs modèles électriques d'une cellule photovoltaïque dont le plus utilisé est le modèle standard (Modèle à une seule diode). La figure suivante représente le schéma électrique d'une cellule photovoltaïque :

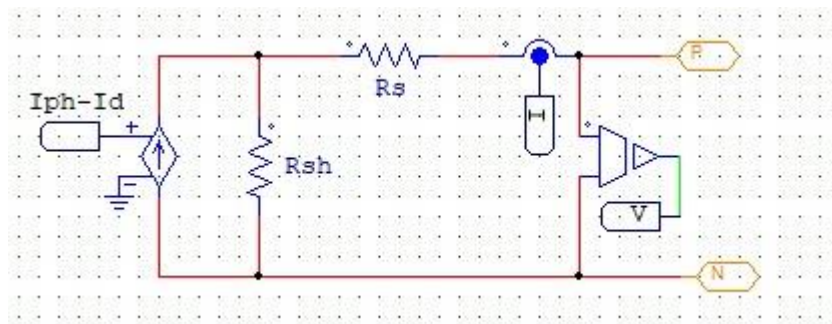


Figure 17 : Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque

Les résistances  $R_s$  et  $R_{sh}$  permettent de tenir en compte des pertes liées aux défauts de fabrication.  $R_s$  représente les diverses résistances de contact et de connexion tandis que  $R_{sh}$  caractérise les courants de fuite dus à diode et aux effets de bord de la jonction.

L'équation caractéristique est déduite d'une manière directe à partir de la loi de Kirchhoff :

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh}$$

**I** : Courant généré par la cellule photovoltaïque

**$I_{ph}$**  : Le courant photonique créé par la cellule

**Id** : Le courant circulant dans la diode

**Ish** : Le courant circulant dans la résistance Rsh

- Le courant photonique :

Le courant photonique est proportionnel à l'éclairement et dépend aussi de la température . Son expression est la suivante :

$$I_{ph} = [I_{cc} + (K_i(T_{op} - T_{ref}))] * \frac{G}{G_0}$$

Avec :

**Icc** : Courant de court-circuit

**Ki** : Coefficient de la température de court-circuit

**G0** : Eclairement pour les STC

**Top** : Température de fonctionnement de la cellule

**Tref** : Température référence de la cellule

- Le courant de saturation :

Le courant de saturation dépend de la température, son expression est sous la forme :

$$I_0 = I_{rs} \left( \frac{T_{op}}{T_{ref}} \right)^3 e^{\frac{q \cdot E_g}{A \cdot K} \left( \frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_{op}} \right)}$$

Avec :

**Eg** : Energie de seuil

**A** : Facteur d'idéalité de la diode =1.3

**q** : Charge électrique élémentaire ( $1.6 \times 10^{-19} C$ )

**K** : La constante de Boltzmann ( $1.381 \times 10^{-23} J/K$ )

**Irs** : Courant de saturation inverse avec  $I_{rs} = \frac{I_{cc}}{\frac{qV_{oc}}{e^{AKT}} - 1}$

**Voc** : Tension de circuit ouvert du module (V)

- Le courant de la jonction Id :

Il est donné par :  $I_d = I_s(e^{\frac{V_d}{V_{th}}} - 1)$

Avec :

**Is** : Courant de saturation



**Vth** : Tension thermique avec  $V_{th} = \frac{A \cdot K \cdot T_{op}}{q}$

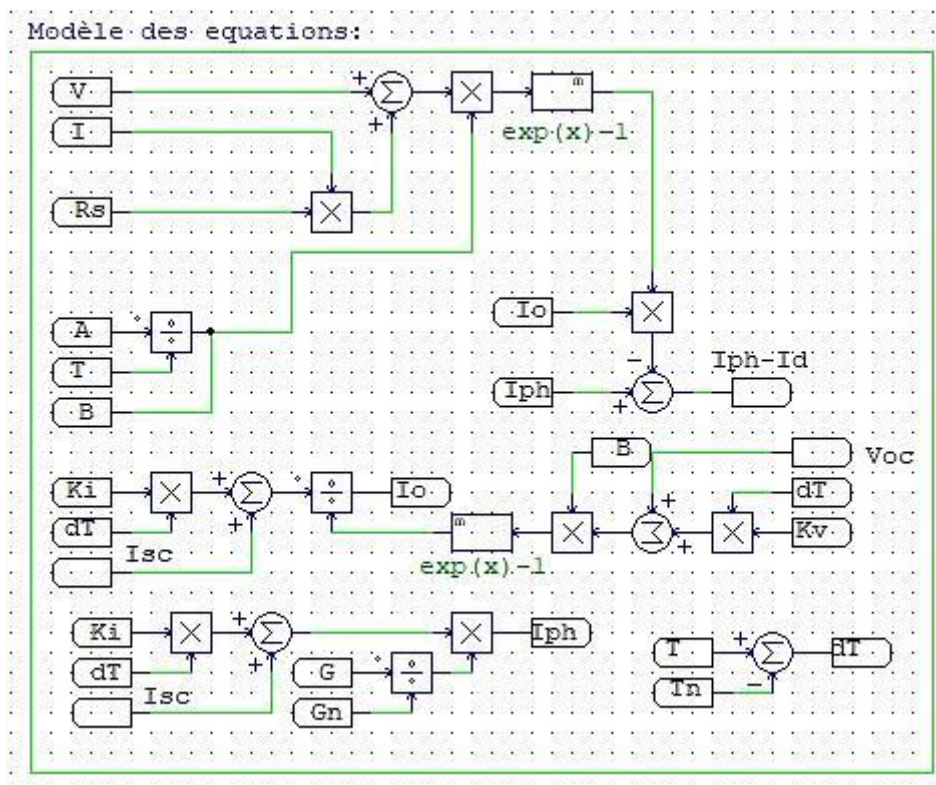
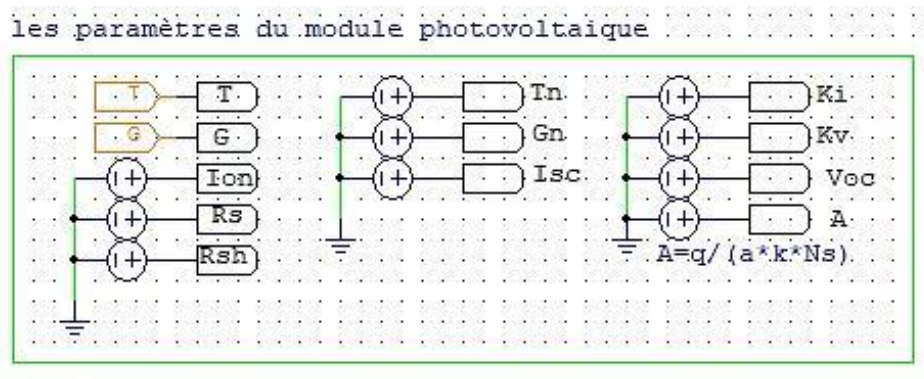
- Le courant shunt :

$$I_{sh} = \frac{V_d + R_s \cdot I}{R_{sh}}$$

Donc le courant total généré par le PV :  $I = I_{ph} - I_d - I_{sh}$

Si on remplace  $I_{ph}$ ,  $I_d$  et  $I_{sh}$  par ses expressions l'équation total devient :

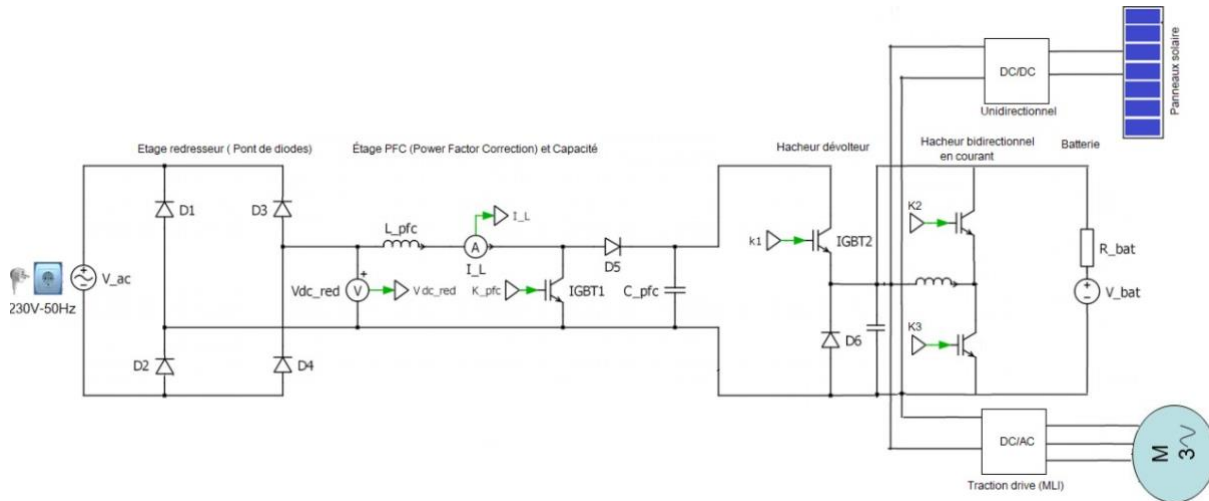
$$I = [I_{cc} + K_i(T_{op} - T_{ref})] \cdot \frac{G}{G_0} - I_0 \left( e^{\frac{q(V_d + I \cdot R_s)}{A K T}} - 1 \right) - \frac{V_d + R_s \cdot I}{R_{sh}}$$





### III.3. Dimensionnement de l'ensemble des composants de la chaîne de conversion électrique:

On considère le schéma suivant de la chaîne de conversion pour notre voiture solaire sous le logiciel Psim :



#### III.3.1. Dimensionnement de notre véhicule :

Vu que cette étude vise une conception dans les mesures réelles de la voiture solaire-électrique, nous avons aussi pensé au dimensionnement technique de notre véhicule. Les dimensions réelles sont regroupées dans le tableau suivant :

<b>Longueur (mm)</b>	3900
<b>Largeur (mm)</b>	1650
<b>Hauteur (mm)</b>	1200

#### III.3.2. Dimensionnement du panneau solaire :

Pour exploiter la surface de 6m<sup>2</sup> d'une façon optimum on utilise les panneaux suivant :

- 3 panneaux de 250Wc
- 2 panneaux de 50Wc

→ La puissance totale maximal délivrer par les panneaux est :  
**P=850W**

Electrical Data			Projected specifications including additional backside irradiation contribution in Isc as a percent of STC.		
		STC*	10%	20%	30%
Rated Power	Pmax (W)	245	269	293	315
Rated Voltage	Vmp (V)	30.1	30.1	30.0	29.9
Rated Current	Imp (A)	8.14	8.94	9.75	10.55
Open Circuit Voltage	Voc (V)	38.5	38.6	38.8	39.0
Short Circuit Current	Isc (A)	8.76	9.63	10.51	11.93
Module Efficiency	(%)	15.1	16.5	18.0	19.4
Max System Voltage	IEC UL	1000V 600V			
Series Fuse Rating		15A			
Temperature Coefficients	Power Voltage (Voc) Current (Isc)	-0.37 %/°C -0.11 V/°C 4.12 mA/°C			
NOCT (C°)		48.9°C**			

### III.3.3. Dimensionnement des batteries :

La batterie permet le stockage de l'énergie électrique produite par les modules solaires. Ce ne peut être qu'un stockage court terme et tout stockage inter saisonnier ne peut être envisagé dans l'état actuel d'avancement technologique des batteries Pb/acide, Cd/Ni, Su/Na... Ce n'est pas l'élément le plus fiable dans une installation photovoltaïque mais une bonne gestion en limitera la faiblesse intrinsèque. Une batterie au Pb/acide qui est la batterie la plus couramment utilisée dans les installations photovoltaïque ne doit jamais être laissée dans un état de décharge profond pendant une longue période. Nous pouvons observer sur la figure une gamme de batterie «solaire ».



→ Les batteries utilise sont 4 batteries  
 de 18 Ah.

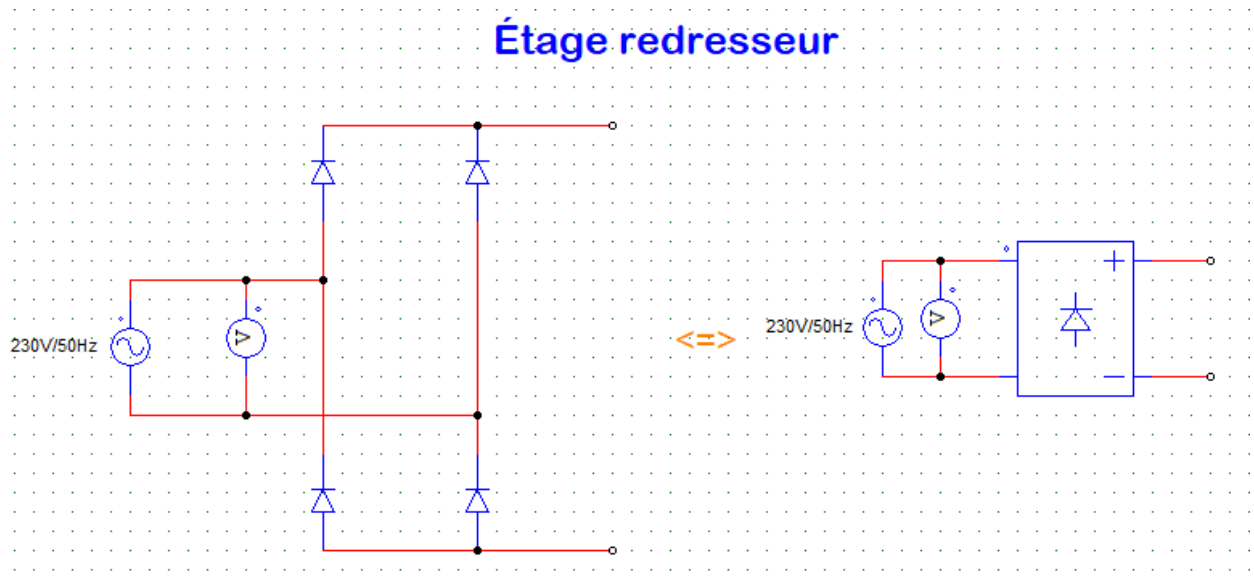
### III.3.4. Dimensionnement des convertisseurs :

#### ➤ Cahier de charge :

Entrée AC
$V = 220-240\text{ V}$
$I = 16\text{ A}$
$f = 50\text{ Hz}$
$\cos \varphi = 1$

#### ➤ Étage redresseur

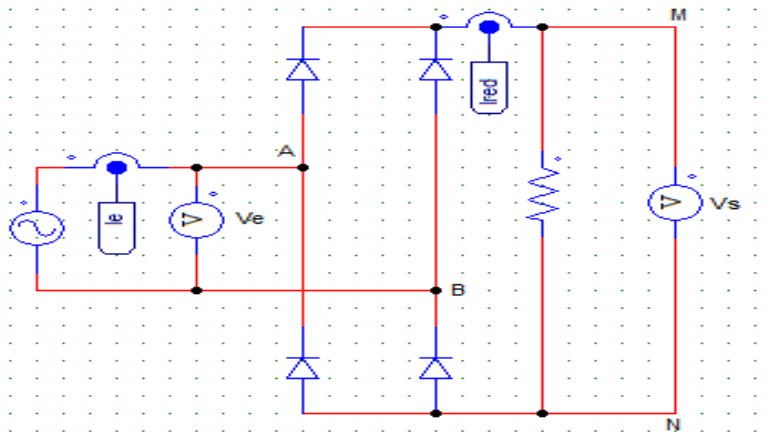
Un convertisseur AC/DC permet l'adaptation d'une source alternative vers une charge continue. Il est génériquement appelés redresseurs. Plusieurs types de convertisseurs AC/DC existent : redresseur à diodes, PFC, redresseur monophasé, redresseur triphasé, redresseur commandé...



#### ✓ **Objectifs**

Transformer une tension alternative en tension continue à l'aide d'un pont de diodes (ou pont de Graetz).

✓ Analyse du fonctionnement :



On a :  $V_e = V_m \times \sin \theta$  avec :  $\theta = \omega t$

$$V_e = V_A - V_B$$

\*  $0 \leq \theta < \pi$  on a :  $V_e > 0$  ;  $D_1$  et  $D_3$  passants ;  $D_2$  et  $D_4$  bloqués

$$\text{donc : } V_{red} = V_M - V_N = V_A - V_B = V_e$$

$$\text{d'où : } I_{red} = \frac{V_e}{R}$$

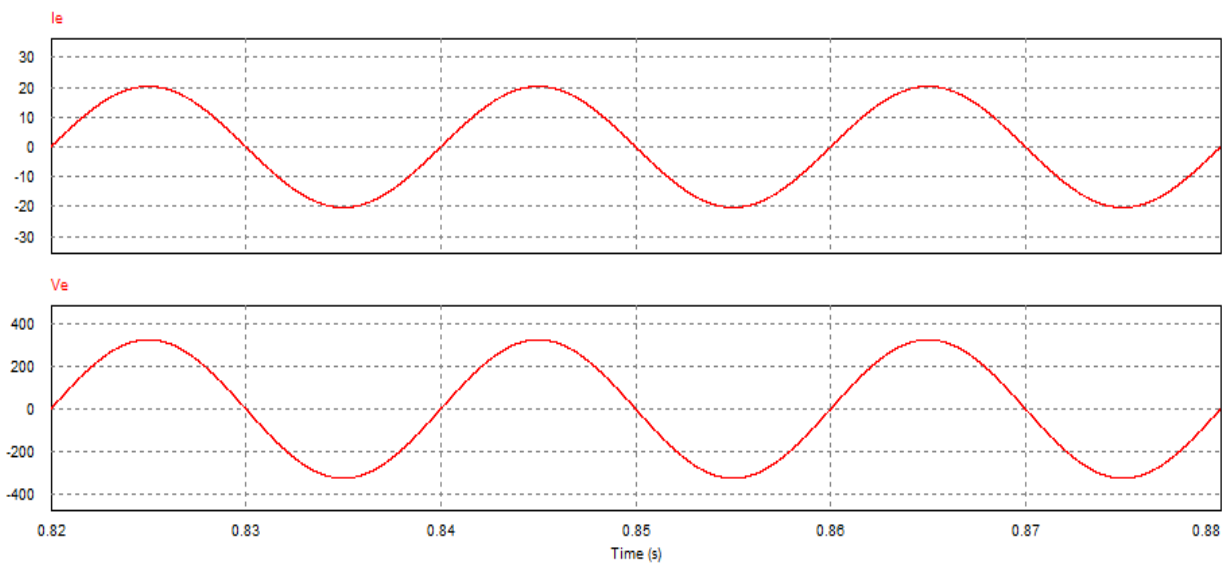
\*  $\pi \leq \theta < 2\pi$  on a :  $V_e < 0$  ;  $D_1$  et  $D_3$  bloqués ;  $D_2$  et  $D_4$  passants

$$\text{donc on a : } V_{red} = V_M - V_N = V_B - V_A = -V_e$$

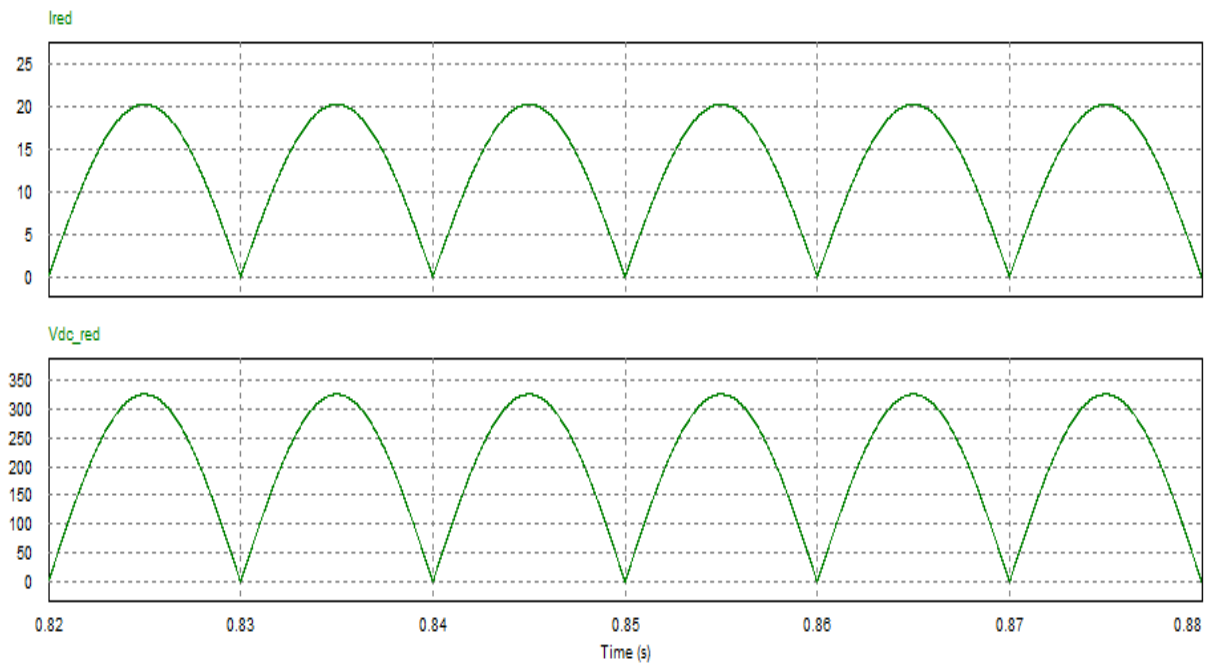
$$\text{d'où : } I_{red} = \frac{-V_e}{R}$$

✓ Tension et courant étage redresseur :

En entrée :



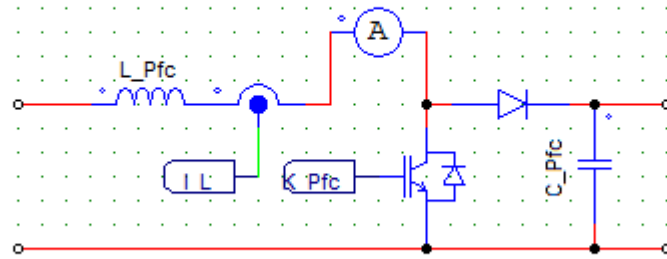
En sortie :



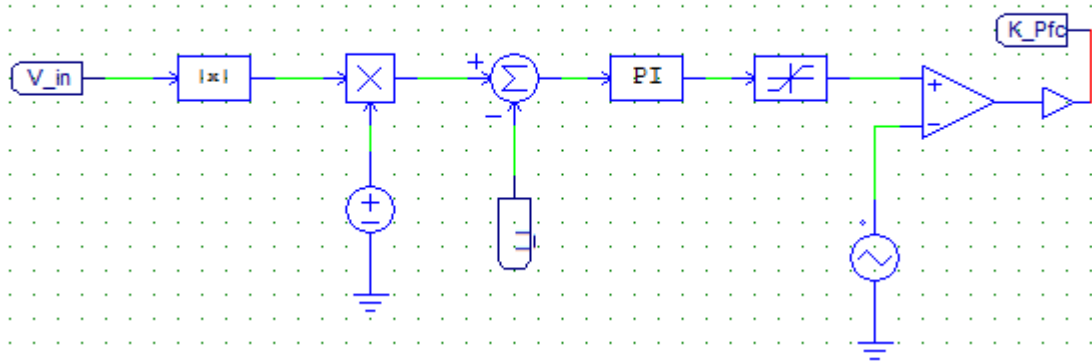
➤ **Étage PFC (Power Factor Correction):**

La Technique Active de Correction du Facteur de Puissance (TACFP) devient de plus en plus demandée dans la plus part des applications industrielles. Le principe de prélèvement sinusoïdal consiste à forcer le courant circulant dans l'inductance à suivre une référence sinusoïdale redressée, en contrôlant la fermeture et l'ouverture de l'interrupteur commandé de puissance.

## Étage PFC



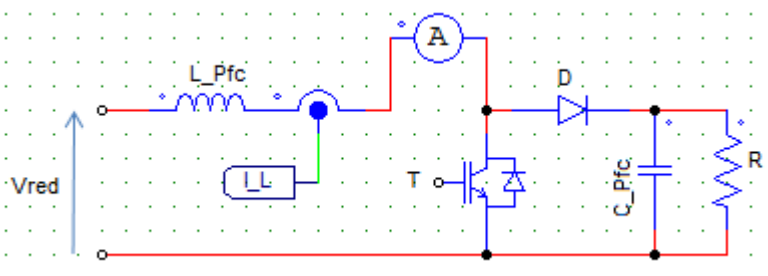
## Commande PFC



### ✓ Objectifs

- Rendre le courant d'entrée sinusoïdal (redresseur à absorption sinus).
- Éviter un filtre de basses fréquences (50 Hz) de trop grand volume.
- Lisser la tension en sortie (capacité).

### ✓ Analyse du fonctionnement :



Nous allons représenter l'évolution de la tension aux bornes de l'inductance  $L_{Pfc}$  :

- Sur le premier intervalle de temps,  $t \in [0, \alpha T_{dec}]$ , le transistor (T) est passant. La tension aux bornes de la diode est donc négative sur cet intervalle de temps, la diode (D) est donc bloquée. D'où :  

$$V_L(t) = V_e$$
- Sur le deuxième intervalle de temps,  $t \in [\alpha T_{dec}, T_{dec}]$  le transistor (T) est commandé au blocage et la diode rentre en conduction. D'où :  

$$V_L(t) = V_e - V_s$$

Avec  $\alpha$  est le rapport cyclique du hacheur survolteur (PFC)  $\alpha = \frac{t_{on}}{T_{dec}}$  où  $t_{on}$  est le temps de conduction de l'interrupteur.

Nous donnons la relation entre le courant et la tension aux bornes de l'inductance :

$$V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt}$$

En valeur moyen, on trouve :

$$V_{L_{moy}} = \frac{1}{T} \int_0^T V_L(t) dt$$

Et puisque en régime permanent, le courant moyen est constant alors :

$$V_{L_{moy}} = 0$$

Ainsi dans le cas du hacheur parallèle qu'on étudie, la relation suivante est donc vérifiée :

$$V_e \cdot \alpha T_{dec} = -(V_e - V_s)(1 - \alpha) \cdot T_{dec}$$

$$\text{D'où } \frac{V_s}{V_e} = \frac{1}{1-\alpha}$$

Pour calculer l'expression du courant dans l'inductance, nous utiliserons l'expression suivante :

$$i_L(t) = \frac{1}{L} \int V_L(t) dt$$

Après calcul, on trouve les relations suivantes :

Sur l'intervalle  $[0, \alpha T_{dec}]$  :  $i_L(t) = \frac{V_e}{L} \cdot t + I_{Lmin}$

Sur l'intervalle  $[\alpha T_{dec}, T_{dec}]$  :  $i_L(t) = \frac{V_e - V_s}{L} \cdot (t - \alpha T_{dec}) + I_{Lmax}$

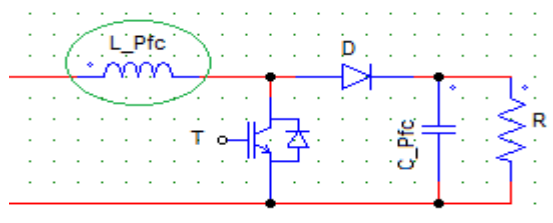
- L'ondulation de courant dans l'inductance représente l'excursion entre la valeur minimale et maximale du courant, rencontrée sur une période de celui-ci :

$$\Delta i_L(t) = i_{Lmax} - i_{Lmin} = \frac{V_e \cdot \alpha}{L \cdot f_{dec}}$$

- L'ondulation crête à crête de la tension de sortie a pour expression :  $\Delta V_s = \frac{P_s}{2\pi f_{res} C V_s}$

Avec  $P_s$  est la puissance de sortie et  $f_{res}$  est la fréquence du réseau.

#### ✓ Dimensionnement de l'inductance:



$L_{Pfc}$  permet d'atténuer les harmoniques.

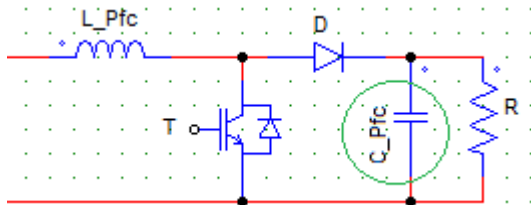
A partir de l'équation de l'ondulation de courant on peut déterminer l'inductance  $L_{Pfc}$  :



$$L_{Pfc} = \frac{V_e \cdot \alpha}{\Delta i_L \cdot f_{dec}}$$

$$L_{Pfc} = 7.8mH$$

### ✓ Dimensionnement de la capacité:



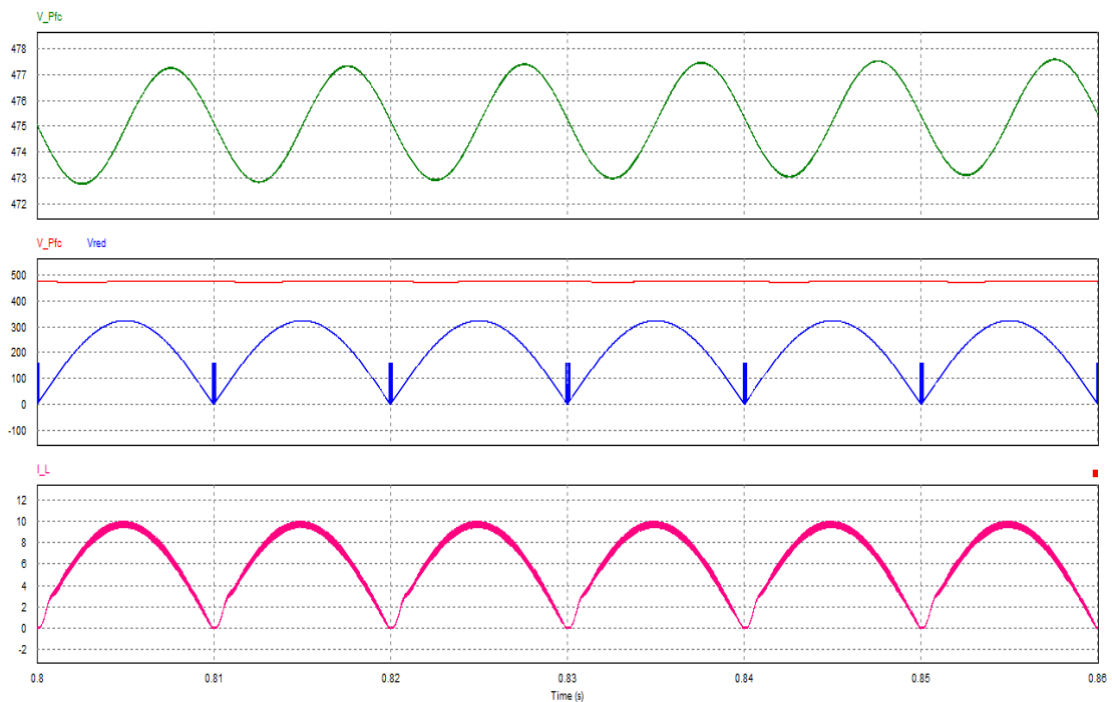
$C_{Pfc}$  permet de lisser la tension en sortie de l'étage redresseur.

A partir de l'ondulation de la tension de sortie, on peut déterminer la capacité  $C_{Pfc}$  du condensateur de filtrage à la sortie du hacheur :

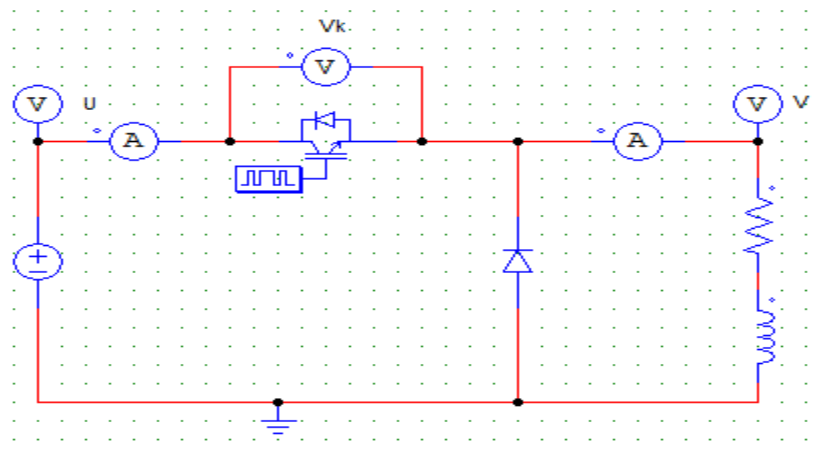
$$C_{Pfc} = \frac{P_s}{2\pi \cdot f_{dec} V_s \cdot \Delta V_s}$$

$$C_{Pfc} = 2.4mF$$

### ✓ Tension et courant étage PFC



## ➤ Étage hacheur dévolteur



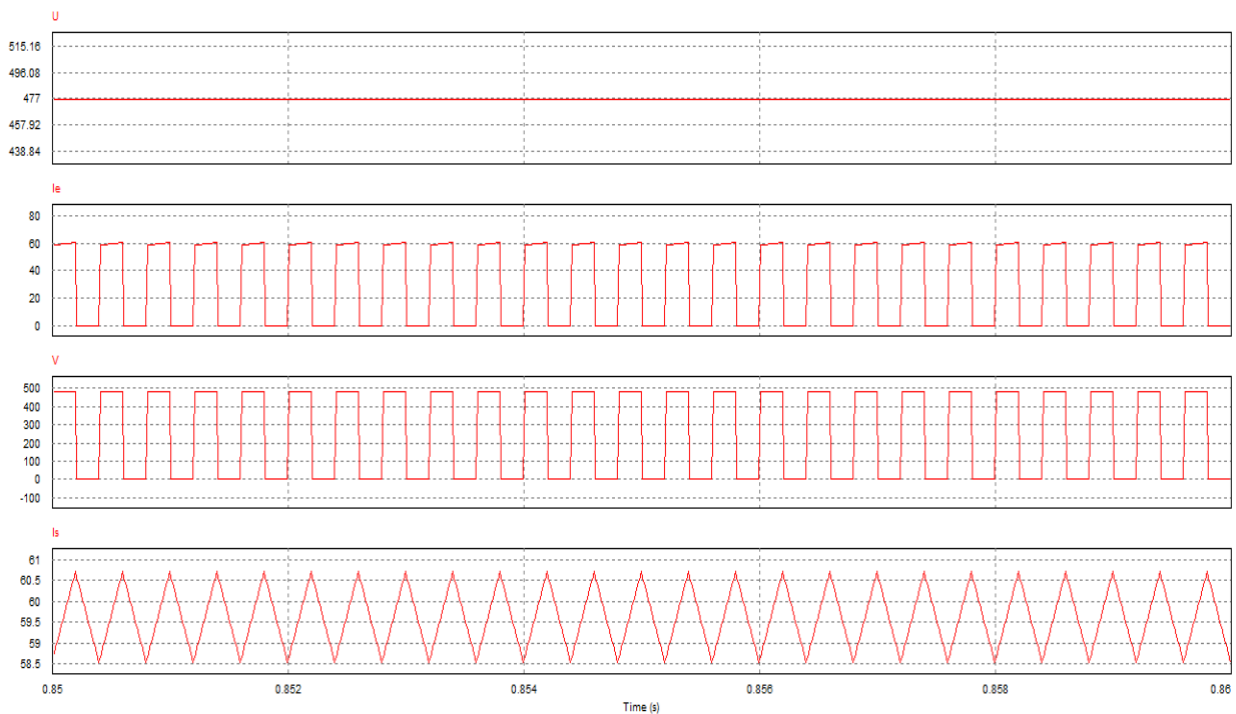
### ✓ Objectifs

Obtenir la tension désirée (diminution)

### ✓ Impact

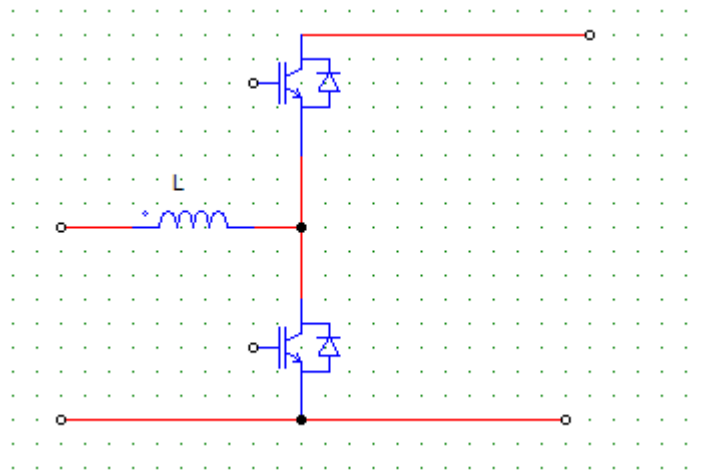
Change la forme d'onde du courant et de la tension

### ✓ Tension et courant étage dévolteur



### ➤ Hacheur bidirectionnel en courant

Dans la station de recharge, le changement du sens de parcours de l'énergie est lié au changement de signe du courant alors que le signe de la tension reste invariable. Donc le hacheur utilisé pour recharger les batteries de traction est un hacheur réversible en courant.



Le convertisseur est constitué d'une inductance  $L$  et deux interrupteurs, symbolisés ici comme des IGBTs de puissance.

Les expressions de l'inductance  $L$  et du rapport cyclique moyen  $D_L$  sont données par les expressions suivantes :

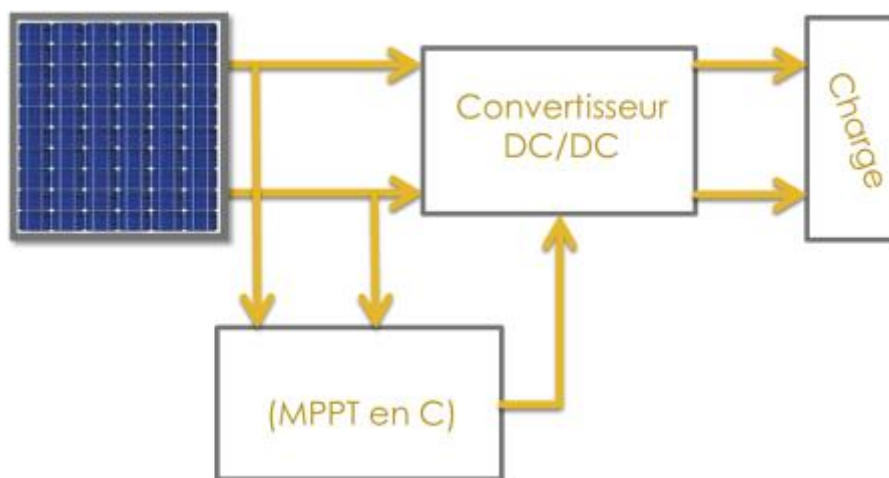
$$D_L = 1 - \frac{V_1}{V_2}$$

$$L = \frac{D_L \cdot V_1}{F \cdot \Delta I}$$

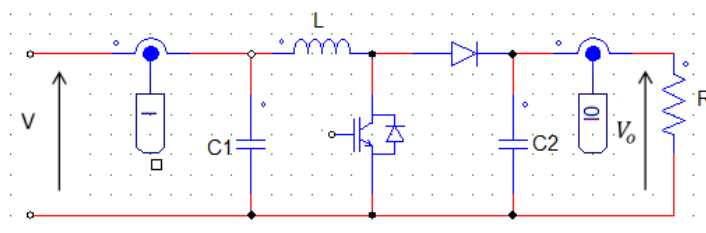
Avec  $V_1$  tension d'entrée,  $V_2$  tension de sortie et  $F$  la fréquence du hacheur.

### ➤ Hacheur unidirectionnel :

L'objectif d'une commande d'un module photovoltaïque consiste à amener le système à son optimum de puissance et à l'y maintenir en dépit des variations de paramètres. En outre, il est nécessaire d'optimiser les convertisseurs (continu/continu) DC/DC employés comme interface entre le générateur PV et la charge afin d'extraire le maximum de puissance et ainsi faire fonctionner le générateur GPV à son point de puissance maximum (MPP) à l'aide d'un contrôleur MPPT (maximum power point tracking),



Dans cette perspective, nous allons étudier un convertisseur Boost, commandé par un MPPT de type perturbe & and observe (P&O), en utilisant un bloc en langage C.

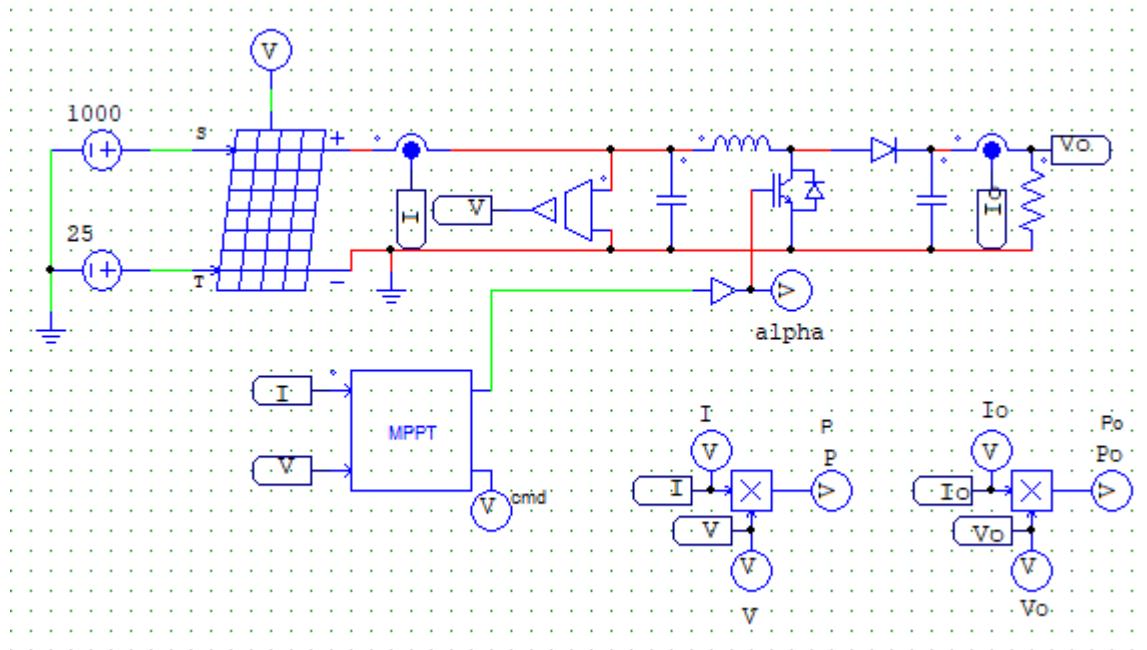


Ce convertisseur est régi par les équations suivantes :

$$V_0 = \frac{V}{1 - \alpha}$$

$$I_0 = I(1 - \alpha)$$

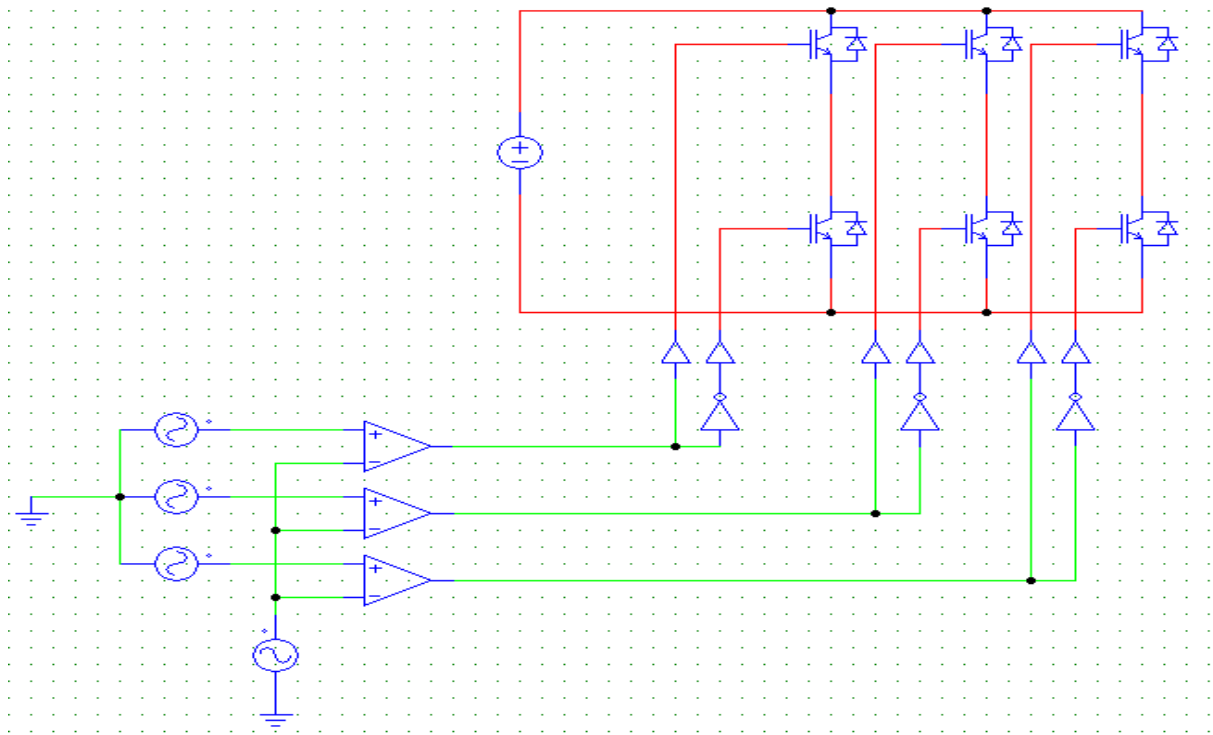
Où  $\alpha$ ,  $V_0$  et  $I_0$  désignent respectivement le rapport cyclique, la tension de sortie et le courant de sortie du convertisseur Boost. Le rapport cyclique  $\alpha$ , est la sortie du système de commande MPPT (P&O).



### ➤ Onduleur de tension triphasé

L'onduleur est la dernière partie du variateur de vitesse située avant le moteur. Il fournit des grandeurs électriques variables au moteur. Dans tous les cas, l'onduleur est composé de semi-conducteurs(en général IGBT et des diodes de roue libre associées) disposés par paires en trois bras. Les semi commutent sur des signaux en provenance du circuit de commande.

L'onduleur de tension est constitué de cellules de commutation généralement à transistor ou thyristor pour les grandes puissances. Donc les onduleurs sont des convertisseurs statiques continu-alternatif permettant de fabriquer une source de tension alternatif à partir d'une source de tension continue.



## Conclusion :

La dépendance au pétrole et ses dérives, la hausse considérable du coût de ces produits ainsi que la nécessité de minimiser les émissions des gaz à effet de serre, font appel à la nécessité de trouver d'autres solutions basées sur les nouvelles technologies au service des véhicules de demain.

L'électrification des moteurs thermiques utilisés dans les véhicules est l'une des voies envisagées dans ce sens. Cela permet de réduire considérablement la consommation des carburants en mettant en évidence l'utilisation des énergies renouvelables.

En s'appuyant sur l'utilisation d'énergie primaire non productrice de CO<sub>2</sub> qu'est l'énergie solaire, la voiture solaire-électrique possède un avenir prometteur comme l'une des solutions bénéfique pour le secteur de l'automobile.

À travers ce projet, nous avons pu témoigner du potentiel de l'énergie solaire pour les véhicules à travers les différentes rubriques qu'on a traité.

## Références

- [http://impactcar.weebly.com/impact-sur-l'environnement.html?c=mkt\\_w\\_chnl%3Aaff\\_geo%3Aall\\_prtnr%3Aas\\_subprtnr%3A742098\\_camp%3Abrand\\_adtype%3Atxtlnk\\_ag%3Aweebly\\_lptype%3Ahp\\_var%3A358504&sscid=51k5\\_kwrqo](http://impactcar.weebly.com/impact-sur-l'environnement.html?c=mkt_w_chnl%3Aaff_geo%3Aall_prtnr%3Aas_subprtnr%3A742098_camp%3Abrand_adtype%3Atxtlnk_ag%3Aweebly_lptype%3Ahp_var%3A358504&sscid=51k5_kwrqo)
- <https://www.paycar.fr/guide-auto/voiture-electrique-presentation/>
- <https://www.domsweb.org/ecolo/voiture-solaire.php>
- Abdelfatah Kolli. [ANALYSE D'UNE ARCHITECTURE DE PUISSANCE DEDIEE AUX MODES TRACTION-RECHARGE DANS UN VEHICULE ELECTRIQUE. Optimisation de la commande et fonctionnement en mode dégradé ]. UNIVERSITE PARISSUD 11, Submitted on 29 Jan 2014.
- <https://www.natura-sciences.com/energie/voiture-electrique-recharge774.html>
- Luc Lasne. [Electronique de puissance ; Cours, Etudes de cas et exercices corrigés ]. Dunod, Paris, 2011, 2015.