

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur Et de La Recherche Scientifique



Université de Ghardaïa

N° d'ordre :  
N° de série :

Faculté des Sciences et Technologies  
Département des Sciences et Technologies

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de

**Master**

**Domaine :** Sciences et Technologies

**Filière :** Automatique

**Spécialité :** Automatique

**Thème**

**ETUDE D'UN SYSTEME HYBRIDE POUR  
L'ALIMENTATION D'UN VEHICULE SOLAIRE**

**Realisé par :**

**Mr. RAMDANE Hocine**

**Jury :**

Mr. BOUAROUR Kamel	Maître de Conférences B	Univ. Ghardaïa	<b>Président</b>
Mr. TOUAFEK Khaled	Maître de Recherche A	URAER Ghardaïa	<b>Encadreur</b>
Mr. AKERMI Fouzi	Maître Assistant A	Univ. Ghardaïa	<b>Examineur</b>
Mme. BELGHERES Sifia	Maître de Conférences B	Univ. Ghardaïa	<b>Examineur</b>

**Année universitaire 2014/2015**

# Remerciements

*Je remercie Dieu le tout puissant de m'avoir donné le courage, la volonté et la patience de mener à terme le présent mémoire.*

*Au terme de ce modeste travail nous tenons à remercier chaleureusement et respectivement tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste projet de fin d'étude, Je tiens à remercier **Dr. TOUAFEK Khaled** pour son encadrement, sa compréhension, ses conseils, ses observations son aide et sa disponibilité durant la réalisation de ce mémoire.*

*Je remercie sincèrement Monsieur **Dr. BOUAROUR Kamel** Doyen de la Faculté des Sciences et de la Technologie à l'université de Ghardaïa pour avoir accepté de présider le jury, Monsieur **AKERMI Faouzi** Enseignant à l'Université de Ghardaïa, d'avoir accepté d'examiner ce mémoire.*

*Mes profondes gratitude s'adressent aussi à tous les enseignants qui nous ont suivis durant notre formation.*

# dédicace

Je voudrais dédier cet humble travail *à mon père, à ma mère, pour leur tendresse, leurs conseils, leurs sacrifices, leur présence à mes cotés et leur soutien, A mes cher grands parents qui m'ont soutenu et encourager.*

*A mon frère et mes sœurs*

*A ma cher fiancée*

*A toute ma famille*

*A mes amies et mes collègues*

A tous ceux qui m'aiment

Hocine Ramdane.

## ABSTRACT

The integration of photovoltaic panels in hybrid vehicles is increasingly possible because of the growing fleet electrification, increased fuel costs, progress in terms of PV panel technology, and reducing their cost. Solar Hybrid vehicles can therefore be an attractive solution to meet both energy saving and environmental issues. Of course, these vehicles can not be a universal solution, since the best balance between benefits and costs depend on the mission profile: in particular, significant reductions in fuel consumption and emissions can be achieved in the typical use in urban conditions during working days. In addition, the integration of solar energy would also help reduce the charging time of the battery.

## Résumé

L'intégration de panneaux photovoltaïques dans les véhicules hybrides est de plus en plus possible, en raison de la flotte électrification croissante, à l'augmentation des coûts de carburant, les progrès en termes de technologie de panneau PV, et à la réduction de leur coût. Véhicules hybrides solaires peuvent donc représenter une solution intéressante pour faire face à la fois les économies d'énergie et les questions environnementales. Bien sûr, ces véhicules ne peuvent pas représenter une solution universelle, puisque le meilleur équilibre entre les avantages et les coûts dépendrait de profil de la mission: en particulier, des réductions significatives de la consommation de carburant et les émissions peuvent être obtenus lors de l'utilisation typique dans les conditions urbaines pendant les jours ouvrables. En outre, l'intégration de l'énergie solaire contribuerait également à réduire le temps de recharge de la batterie.

الضوئية السيارات الهجينة للحد من تزايد تكاليف الكهرباء المتزايد  
زيادة تكاليف التكنولوجيا الكهروضوئية الشمسية  
الهجينة الشمسية جذريا لتلبية المتطلبات الطاقوية والقضايا البيئية. لا يمكن  
سيارات الهجينة الشمسية أن تكون الحل الشامل لمشاكل الانبعاثات الغازية الضارة التي تسببها السيارات  
في هذا النوع من السيارات يكمن في بين والتكاليف (الطاقة و وزن البطاريات مثلا ) بحيث يمكن  
تحقيق تخفيضات كبيرة استهلاك الحضرية أيام .

---

## Sommaire

Liste des figures.....	04
Liste des tableaux.....	07
Introduction générale.....	08

### Chapitre1 L'énergie solaire

1.1. Introduction.....	10
1.2. L'énergie solaire .....	10
1.3. La puissance .....	11
1.4. Mouvements de la Terre .....	12
1.5. Mouvement apparent du Soleil .....	13
1.6. Générateur photovoltaïque .....	15
1.7. L'énergie photovoltaïque .....	16
1.8. Cellules photovoltaïques .....	16
1.8.1. L'effet photovoltaïque .....	17
1.8.2. Technologie d'une cellule photovoltaïque .....	18
1.9. Regroupement des cellules.....	19
1.9.1. Regroupement en série .....	19
1.9.2. Regroupement en parallèle.....	20
1.9.3. Regroupement (série et parallèle).....	21
1.10. Influence de la température.....	21
1.11. Influence de l'éclairement.....	23
1.12. Conclusion.....	24

### Chapitre 2 les véhicules électrique

2.1. Introduction .....	25
2.2. Historique .....	25
2.3. Définition.....	28
2.4. Les composants de véhicule électrique.....	28
2.4.1. Le Bloc Moteur Electrique.....	29
2.4.1.1. Les composants d'un moteur électrique.....	30
2.4.1.2. Le Moteur Electrique d'Entraînement.....	32
2.4.1.3. Moteurs à Courant Continu.....	33
2.4.1.4. Moteurs à Courant Alternatif.....	34
2.4.1.5. Les moteurs roues.....	36

2.4.2. Le Bloc de Commande et de Contrôle.....	37
2.4.3. Le Bloc de Puissance.....	37
2.5. Stockage de l'énergie.....	38
2.5.1. Les batteries.....	38
2.5.2. Différentes technologies.....	40
2.5.2.1. Accumulateur au Plomb.....	40
2.5.2.2. Batteries Lithium-Ion.....	41
2.5.2.3. Batteries au Nickel.....	42
2.6. Véhicule solaire.....	44
2.7. Architecture des voitures solaires.....	44
2.8. Ingénierie du générateur PV embarqué.....	45
2.9. la modélisation du véhicule.....	46
2.10. Conclusion.....	47
<b>Chapitre 03 les véhicules hybrides</b>	
3.1. Introduction.....	48
3.2. Historique.....	48
3.3. Définition.....	49
3.4. Classifications des véhicules hybrides.....	49
3.4.1. Architecture.....	50
3.4.1.1. Les véhicules Hybride série.....	50
3.4.1.2. Les véhicules Hybride parallèle.....	51
3.4.1.3. Les véhicules Hybride doux (mild hybrid).....	52
3.4.1.4. Autres configurations.....	53
3.5. La source primaire.....	54
3.5.1. Moteur à combustion interne.....	54
3.6. Le moteur électrique.....	56
3.7. Stockage de l'énergie électrique.....	58
3.8. La transmission.....	59
3.9. Taux d'hybridation.....	60
3.9.1. Véhicule thermique assisté électriquement = TH faible.....	60
3.9.2. Véhicule électrique avec prolongation d'autonomie = TH moyen.....	60
3.9.3. Le véhicule électrique hybride proprement dit = TH élevé.....	61
3.10. Les différents fonctionnements suivant le régime.....	61

---

3.11. Comparaison des systèmes hybride et non-hybride.....	62
3.12. Avantages et inconvénients des véhicules hybrides .....	63
3.13. conclusion.....	64

### **Chapitre 04 les véhicules hybrides solaires**

4.1. Introduction.....	66
4.2. Structure du véhicule hybride solaire.....	67
4.3 modèle pour conception optimale de VHS.....	68
4.4 Batteries solaire .....	69
4.5. Le Générateur Photovoltaïque.....	71
4.5.1. Modèle Avec Deux Diodes.....	71
4.6. Position du problème de la gestion d'énergie .....	73
4.6.1. Modes de fonctionnement.....	74
4.6.1.1. Mode démarrage (Stop-and-Start).....	74
4.6.1.2. Mode régénération.....	74
4.6.1.3. Mode récupératif.....	74
4.6.1.4. Mode boost.....	74
4.6.1.5. Mode thermique pur.....	75
4.6.1.6. Mode électrique pur.....	75
4.7. Modélisation d'un véhicule électrique hybride.....	75
4.7.1. Moteur Thermique.....	76
4.7.2. Modèle de la batterie .....	77
4.7.3. Modèle de Moteurs Électriques .....	78
4.8. Simulations et Résultats.....	80
4.9. Conclusion.....	89

## Liste des figures

Figure 1- 1 : Carte mondiale de gisement solaire.....	11
Figures 1- 2: Schématisation des mouvements de la Terre autour du Soleil.....	12
Figures 1- 3: Mouvement apparent du Soleil observé d'un point de latitude L.....	13
Figures 1- 4: Repérage de la position du Soleil.....	14
Figure 1- 5: Composantes principales d'une chaîne photovoltaïque.....	16
Figure I- 6 : Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque.....	17
Figure 1- 7 : Schéma de principe de la conversion photoélectrique.....	17
Figure I- 8 Caractéristique courant tension de Ns cellule en série.....	20
Figure I- 9 : Caractéristique courant tension de (Np) cellule en parallèle.....	20
Figure 1- 10: La caractéristique de $I=f(V)$ en fonction de température.....	22
Figure 1- 11 : La caractéristique de $P= f(V)$ en fonction de température.....	22
Figure 1- 12: La caractéristique $I=f(v)$ en fonction de l'éclairement.....	23
Figure 1- 13: La caractéristique $P=f(v)$ en fonction de l'éclairement.....	24
Figure 2.1 : Exemples des voitures électriques du début du siècle.....	26
Figure 2.2: schéma équivalent d'un véhicule électrique.....	29
Figure 2.3:schéma équivalent d'un moteur électrique.....	30
Figure 2.4: la tournure de rotor.....	31
Figure 2.5: les deux phases de moteur électrique.....	32
Figure. 2 .6 : Couple/Puissance-Vitesse requises pour VE.....	33
Figure 2.7 : Exemples de roue englobant un moteur-roue : a) Roue active de MICHELIN ; b) Roue motrice nouvelle génération BRIDGESTONE.....	37
Figure 2.8 : Tension de « cut-off » d'une batterie.....	39
Figure 2.9 : Caractéristique de décharge d'une batterie au plomb.....	39
Figure 2.10 : Vue éclatée d'un accumulateur au Plomb et détail d'un élément.....	41
Figure 2 .11 : Principe de fonctionnement des batteries au Lithium.....	42
Figure 2.12 : Énergie massique stockable en fonction du type d'accumulateur.....	43
Figure 2.13 : Architecture générale du véhicule solaire.....	45
Figure 2.14 : Générateur photovoltaïque partitionné en 6 sections et architecture énergétique avec indication des flux d'énergie.....	46
Figure 2.15 : Structure générale du véhicule solaire.....	47
Figure 3.1: Véhicule Hybride Série.....	50



Figure 3.2: Véhicule Hybride Parallèle.....	51
Figure 3.3: Hybride parallèle avec un seul arbre.....	52
Figure 3.4 : Véhicule Hybride complexe: La Prius II.....	53
Figure 3.5: un cylindre de moteur à explosion 4 temps.....	54
Figure 3.6 : fonctionnement d'un moteur a4 temps.....	54
Figure 3.7 : Machine électrique de la Honda Insight.....	57
Figure 3.8: Classification des véhicules suivant le taux d'hybridation.....	61
Figure 3.9 : Les différents fonctionnements suivant le régime .....	62
Figure 4.1 : Schéma du véhicule solaire hybride série.....	67
Figure 4.2 : Modèle électrique équivalent du générateur photovoltaïque.....	71
Figure 4.3. : PV modèle Simulink.....	73
Figure 4.4 : Vue générale du modèle de simulation de VHS.....	76
Figure 4.5 : les Caractéristiques Couple/Vitesse et Puissance/Vitesse du moteur thermique.....	77
Figure 4.6: modèle de batterie standard non linéaire.....	78
Figure 4.7: Le diagramme Simulink du modèle de batterie.....	78
Figure 4.8 : Toyota e-CVT transmission : MG1 est à gauche, MG2 à droite, le train épicycloïdal au centre.....	79
Figure 4.9 : Schéma de principe de l'entraînement électrique du moteur.....	80
Figure 4.10 : Vitesse du véhicule (Km/h).....	81
Figure 4.11 : Couples Moteurs Thermique, Electrique et Génératrice.....	81
Figure 4.12 : Etat du moteur Électrique.....	82
Figure 4.13 : Etat du Moteur Thermique.....	82
Figure 4.14 : Etat de la Génératrice.....	83
Figure 4.15 : Signal de la pédale d'accélération.....	83
Figure 4.16: Couple du Moteur Thermique.....	84
Figure 4.17 : Etat de charge de la batterie.....	84
Figure 4.18 : Tension du Bus Continu.....	85
Figure 4.19 : Tension de la Batterie.....	85
Figure 4.20 : Courant Ias statorique du moteur électrique.....	86
Figure 4.21 : Courant Ias statorique de la génératrice.....	86
Figure 4.22: Couple Electromagnétique Ce du moteur Electrique.....	87
Figure 4.23 : Couple Electromagnétique Ce de la génératrice.....	87

Figure 4.24 : Vitesse du rotor (rpm) du moteur électrique.....	88
Figure 4.25 : Vitesse du rotor (rpm) de la génératrice.....	88
Figure 4.26 : Vitesse du moteur thermique (rpm).....	89

## Liste des tableaux

Tableau 1. 1: Avantage et inconvénient des cellules photovoltaïques.....	19
Tableau 2 .1 : Principaux véhicules électriques commercialisés dans les années 1990.....	28
Tableau 2 .2 : Différents Modèles des Véhicules Electriques.....	34
Tableau 2 .3 : Comparaison des différents Moteurs + : avantage. 0 : neutre. - : désavantage.....	35
Tableau 2 .4 : Puissance Maximale Nécessaire pour divers Véhicules.....	36
Tableau 2.5: caractéristiques des batteries.....	43
Tableau 3.1: Comparatif des moteurs électriques.....	57
Tableau 3.2: Comparaison des performances des versions avancées des différents types des batteries .....	59
Tableau 3.3 : comparaison des performances énergétiques des batteries Li-Ions aux Carburants liquides (essence ou gasoil).....	59

## **Introduction générale**

A la fin du 19<sup>ème</sup> siècle est apparue une invention technologique majeure qui a considérablement modifié les sociétés de nombreux pays au cours du 20<sup>ème</sup> siècle. Cette invention n'est autre que le véhicule (automobile). À l'origine, l'automobile a d'abord été à propulsion électrique, mais avec la découverte de nombreux puits de pétrole de par le monde et notamment aux États-Unis d'Amérique, le véhicule à moteur thermique s'est rapidement imposé au début du 20<sup>ème</sup> siècle. Ce véhicule utilise donc le pétrole comme vecteur d'énergie. L'automobile s'est ainsi progressivement imposée dans les pays développés comme le principal mode de transport pour la circulation des individus et des marchandises. Son industrie a été l'un des secteurs les plus importants et les plus influents depuis la fin de la Seconde Guerre mondiale et son essor mondial en a été spectaculaire. La production annuelle mondiale de voitures a dépassé le cap du milliard d'unités en 2010, L'automobile a révolutionné les transports et a entraîné de profonds changements sociaux, en particulier dans le rapport des individus à l'espace. Elle a favorisé le développement des échanges économiques et culturels et a conduit au développement massif de nouvelles infrastructures (routes, autoroutes, parkings...).

Au 20<sup>ème</sup> siècle, l'automobile, qui a déjà été confrontée aux différents chocs pétroliers, doit faire face désormais à la raréfaction inéluctable du pétrole, au réchauffement climatique et aux restrictions d'émissions polluantes imposées à l'industrie dans son ensemble. Afin de pallier ces problèmes, l'industrie automobile s'active à la conception de nouvelles voitures n'utilisant pas le pétrole comme source d'énergie. Parmi les solutions avancées par les constructeurs automobiles, on retrouve les voitures électriques et les voitures hybride.

Par définition un véhicule électrique est un véhicule dont la propulsion est assurée par un moteur fonctionnant exclusivement à l'énergie électrique. La voiture électrique est avancée par tous les acteurs du domaine de l'automobile comme étant l'une des solutions de transport les plus propres et écologiques, malgré les nombreuses recherches effectuées sur la chaîne de traction et les batteries, le véhicule électrique n'en est encore qu'au stade expérimental et est sujet à modification ou à amélioration. Comme toute chose, les voitures adoptant ce type de consommation possèdent des avantages ainsi que des inconvénients.

Enfin, ce type de moteur confère une qualité de roulement qualifiée de douce puisqu'en principe il n'utilise pas de transmission, ce qui confère au véhicule une accélération continue et progressive. La voiture électrique est très adaptée aux conditions urbaines dans la mesure où elle ne consomme d'énergie ni dans le freinage ni dans les embouteillages et s'auto-(re)charge dans les descentes.

Quant à ses inconvénients, ils sont tout aussi multiples et vont des conditions de production de l'énergie électrique aux différents coûts de la voiture et surtout au stockage embarqué de l'énergie. Malgré un effort technologique important et quelques résultats spectaculaires, plusieurs limitations, telles que la densité de puissance faible, la disponibilité imprévisible de la source solaire et inconvénients énergétiques (augmentation du poids et de la friction et les pertes aérodynamiques dus à des composants supplémentaires), provoquent les voitures solaires pur pour être encore loin de faisabilité pratique. D'autre part, le concept d'une voiture électrique hybride assisté par des panneaux solaires semble plus réaliste. En fait, grâce aux efforts de recherche pertinente, ces véhicules représentent maintenant une solution réaliste aux problèmes importants, tels que la réduction de la pollution gazeuse dans le secteur urbain ainsi que les exigences d'économie d'énergie. En outre, il existe un grand nombre de conducteurs en utilisant quotidiennement leur voiture, pour de courts trajets et avec la demande de puissance limitée. Les considérations ci-dessus ouvrent des perspectives prometteuses en ce qui concerne l'intégration de panneaux solaires avec des véhicules hybrides, électriques «purs», avec un intérêt particulier dans la possibilité de stocker de l'énergie, même pendant les phases de stationnement.

L'objectif de notre travail est d'étudier la faisabilité d'intégrer un système hybride (moteur à combustion avec un générateur photovoltaïque) dans un véhicule afin de satisfaire toutes ses charges énergétiques.

Notre mémoire est divisé en quatre chapitres et une conclusion générale. Dans le premier chapitre nous avons présenté les principales caractéristiques et les technologies des éléments constitutifs d'un générateur PV, le deuxième chapitre est consacré à l'étude des véhicules électriques et des véhicules solaires et dans le troisième chapitre nous avons présenté les véhicules hybrides, le 4<sup>ème</sup> chapitre on a analysé et étudié les véhicules hybrides solaires leurs dimensionnements et à la fin une simulation d'une voiture hybride solaire.

# Chapitre 1

## L'énergie solaire

### 1.1. Introduction

Le soleil fournit une énergie colossale à la terre (10.000 fois l'énergie nécessaire) sous forme lumineuse. Mais le problème réside en ce que la forme sous laquelle nous la recevons n'est pas nécessairement celle sous laquelle elle est utilisable. C'est pourquoi, nous devons utiliser des processus de conversion. Par exemple, les cellules solaires photovoltaïques permettent de convertir l'énergie lumineuse du soleil en énergie électrique. L'appauvrissement des sources énergétiques traditionnelles (pétrole...) due à une utilisation accrue de celles-ci et l'augmentation considérable du prix du pétrole, entraînent que l'étude des énergies renouvelables revêt une importance cruciale pour les années à venir.

L'électricité solaire est une importante source d'énergie renouvelable qui pourrait être une alternative aux autres sources classiques afin de satisfaire les larges besoins d'énergie dans le futur. Cette énergie trouve tout son avantage dans des applications de petite et moyenne consommation dans des régions isolées et loin des lignes de distribution électrique.

Dans le cadre de notre étude, nous nous sommes concentrés sur la production d'électricité à partir de l'énergie photovoltaïque. Dans ce chapitre nous détaillons les éléments ayant traités à cette ressource et sa transformation en énergie électrique.

### 1.2. L'énergie solaire

Le rayonnement solaire qui parvient sur la Terre en un an représente plus de 7000 fois la consommation mondiale d'énergie, toutes formes et usages confondus et notre étoile bienfaitrice a une durée de vie prévisible de 5 milliards d'années.

Le soleil émet de l'énergie avec un taux très important et très régulier, 24 heures par jour, 365 jours par an. Si toute cette énergie pouvait être transformée en une forme utilisable sur terre, ce serait amplement suffisant pour répondre à la demande mondiale. Cependant, ce n'est pas possible, parce que:

- a-** la terre n'intercepte qu'une petite fraction de l'énergie qui part du soleil;
- b-** la terre tourne si bien qu'une collection d'appareils n'est exposée à l'énergie solaire que pour environ la moitié de chaque période de 24 heures;
- c-** les conditions atmosphériques comme les nuages et la poussière réduisent parfois de manière significative la quantité d'énergie solaire atteignant la surface terrestre.

L'intensité de l'énergie solaire sur une surface orientée perpendiculairement aux rayons du soleil au-dessus de l'atmosphère terrestre (connue sous le nom de constante solaire) a été mesurée par satellite entre 1.365 et 1.367 W/m<sup>2</sup>. Cette énergie est transmise à travers l'atmosphère et atteint la surface terrestre à un taux variable dans le temps à un endroit donné en fonction de l'angle auquel les rayons du soleil atteignent la terre (c'est l'angle zénithal) [1].

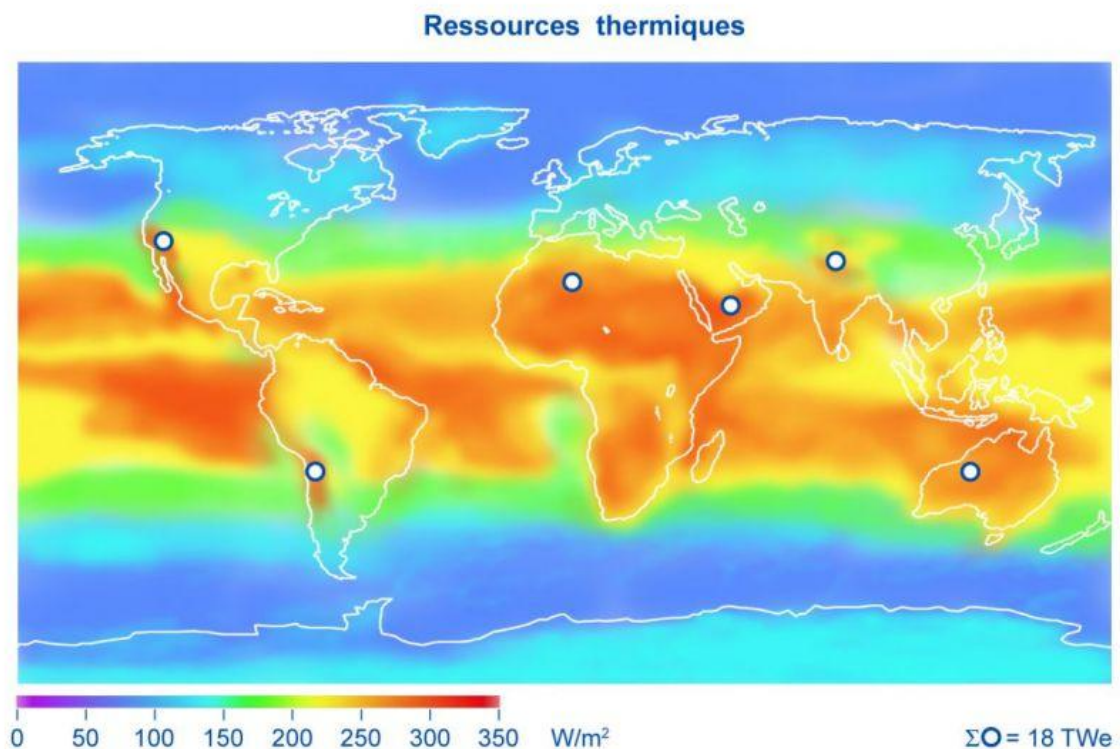


Figure 1- 1 : Carte mondiale de gisement solaire [1].

### 1.3. La puissance

Le rayonnement thermique reçu à la limite de l'atmosphère est de 1370 W/m<sup>2</sup>, la part d'énergie perdue en traversant l'atmosphère (diffusion, absorption, réflexion) amène cette valeur à environ 1000 W/m<sup>2</sup> pour une surface perpendiculaire au rayonnement.

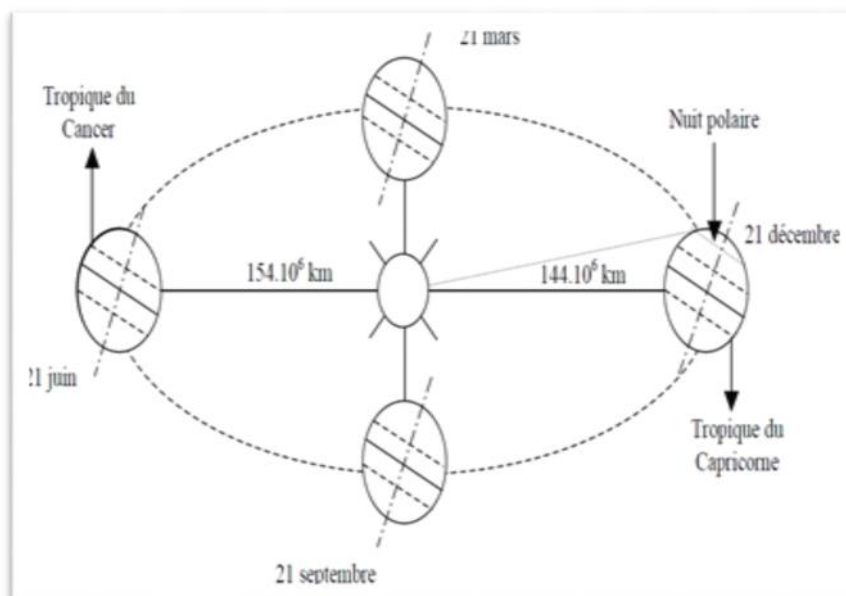
Revenons sur le plan énergétique. Pour fixer les idées, un réacteur de centrale nucléaire produit typiquement 1 000 MW. Le Soleil fournit donc une puissance équivalente à celle de  $4.10^{17}$  réacteurs nucléaires, un chiffre difficilement imaginable et véritablement « astronomique ». Cependant, seule une infime partie de cette puissance est reçue par la Terre du fait du faible angle solide sous lequel est vue notre planète à partir du Soleil : environ deux milliards de fois moins, ce qui donne un chiffre qui reste fort respectable (environ  $1,9.10^{17}W$ ) [2].

Le système Terre-atmosphère réfléchit environ 30 % de l'énergie solaire interceptée et absorbe les 70 % restants qui sont presque intégralement transformés en chaleur. Pour reprendre les comparaisons faites plus haut, la puissance absorbée par le système Terre-atmosphère représente celle qui serait fournie par un peu plus de 120 millions de réacteurs nucléaires.

En poursuivant les comparaisons, il n'est pas inutile de rappeler que l'énergie géothermique représente environ 0,033 % de l'énergie effectivement absorbée par le système surface-atmosphère, tandis que la photosynthèse utilise environ 0,03 % de l'énergie solaire absorbée. Quant à l'énergie dissipée par les activités humaines, elle représentait en 1990 grossièrement 0,01 % de l'énergie solaire mise en jeu sur Terre. La biosphère (marine et continentale) consomme donc trois fois plus d'énergie que les hommes ! [2].

#### 1.4. Mouvements de la Terre

La trajectoire de la Terre autour du Soleil est une ellipse dont le Soleil est l'un des foyers. Le plan de cette ellipse est appelé l'écliptique. L'excentricité de cette ellipse est faible ce qui fait que la distance Terre/Soleil ne varie que de  $\pm 1,7\%$  par rapport à la distance moyenne qui est de 149 675.106 km. La Terre tourne également sur elle-même autour d'un axe appelé l'axe des pôles. Le plan perpendiculaire à l'axe des pôles et passant par le centre de la Terre est appelé l'équateur. L'axe des pôles n'est pas perpendiculaire à l'écliptique : l'équateur et l'écliptique font entre eux un angle appelé inclinaison et qui vaut  $23^{\circ}27'$ . Les mouvements de la Terre autour de son axe et autour du Soleil sont schématisés sur la Figures 1-2 [3].



Figures 1- 2: Schématisation des mouvements de la Terre autour du Soleil.



On appelle déclinaison l'angle formé par la direction du Soleil avec le plan équatorial. Elle varie au cours de l'année entre  $-23,45^\circ$  et  $+23,45^\circ$ . Elle est nulle aux équinoxes (21 mars et 21 septembre), maximale au solstice d'été (21 juin) et minimale au solstice d'hiver (21 décembre). La valeur de la déclinaison peut être calculée par la relation :

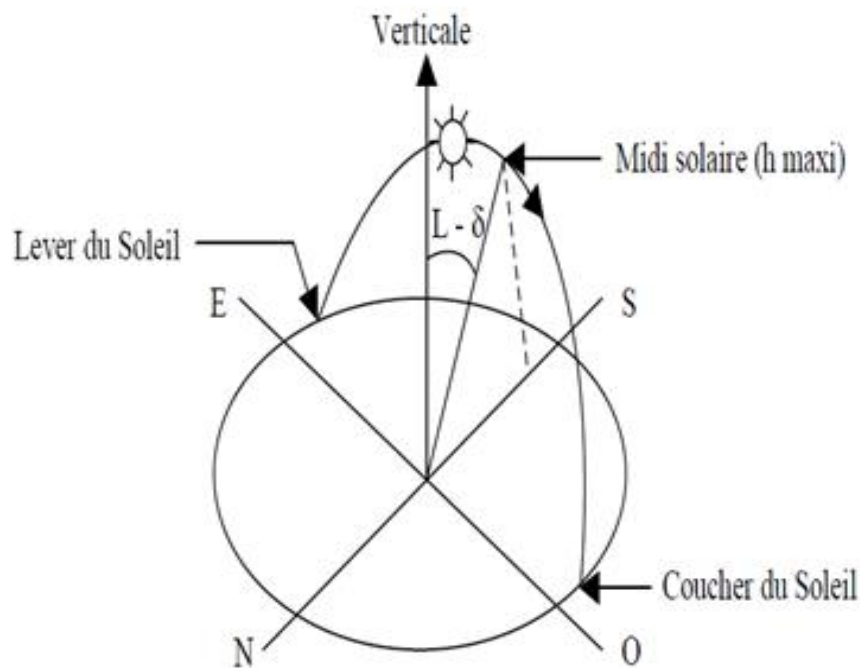
$$\delta = 23,45 \sin [0,980 \cdot (j - 84)] \quad (1)$$

Où (j) est le numéro du jour de l'année.

### 1.5. Mouvement apparent du Soleil

Le mouvement apparent du Soleil vu par un observateur fixe en un point de latitude L au nord de l'équateur est représenté sur la Figures 1-3.

Au midi solaire, l'angle que fait la direction du Soleil avec la verticale du lieu est égal à  $(L - d)$ . La durée du jour est de 12h aux équinoxes, elle est inférieure à 12h entre le 21 septembre et le 21 mars, supérieure à 12h entre le 21 mars et le 21 septembre.



Figures 1- 3: Mouvement apparent du Soleil observé d'un point de latitude L.

#### Exemple :

Calculer l'angle fait par la direction du Soleil avec la verticale au midi solaire à Ghardaïa le 27 mai. La latitude de Ghardaïa est  $L = 32,45N$ .

Nous avons :

$$j = (31 + 28 + 31 + 30 + 27) = 157 \quad \dots\dots\dots(2)$$

D'où

$$\delta = 23,45^\circ \sin [0,980^\circ (157 + 284)] = 20,78^\circ \quad \dots\dots\dots(3)$$

L'angle fait par la direction du Soleil avec la verticale du lieu au midi solaire a pour valeur :

$$L - = 32,46 - 20,78 = 11,68^\circ \dots\dots\dots(4)$$

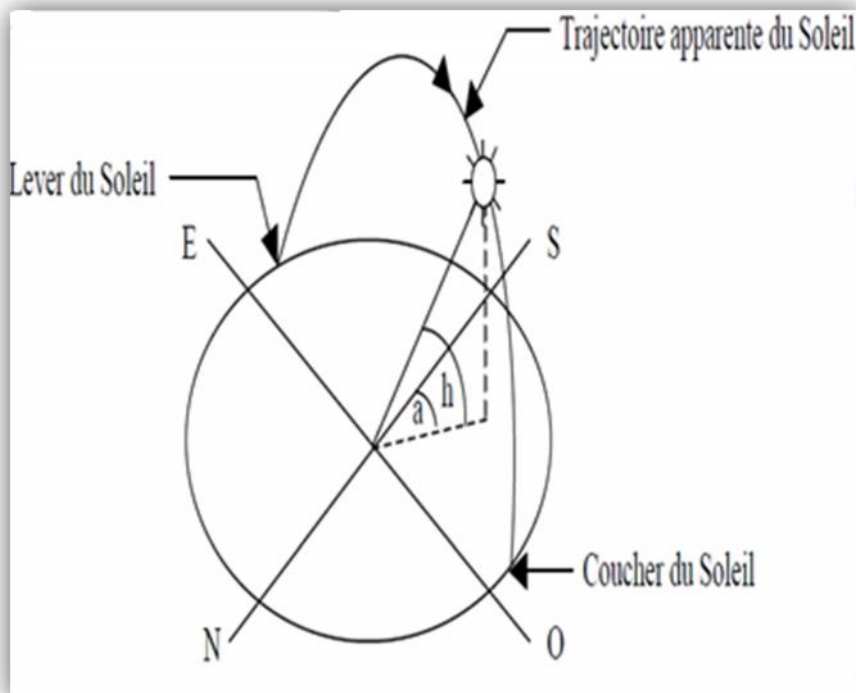
A Ghardaïa le 27 mai, le Soleil passe donc au Nord de la verticale à midi bien que Ghardaïa soit dans l'hémisphère Nord.

Le repérage du Soleil s'effectue par l'intermédiaire de deux angles :

\* **L'azimut  $a$**  : c'est l'angle que fait la direction de la projection du Soleil sur le plan horizontal avec la direction Sud, cet angle étant orienté positivement vers l'Ouest.

\* **La hauteur  $h$  du Soleil** : c'est l'angle que fait la direction du Soleil avec sa projection sur un plan horizontal.

Ces deux angles sont représentés sur la Figures 1- 4.



Figures 1- 4: Repérage de la position du Soleil

Ces deux angles sont fonction de

- \* La latitude **L** du lieu
- \* La date **j** (numéro du jour de l'année)
- \* L'heure solaire **TS** dans la journée.

La latitude **L** et la date **j** servent à déterminer la trajectoire du Soleil dans le ciel et l'heure **TS** donne sa position instantanée sur cette trajectoire. On définit le jour comme le temps mis par la Terre pour effectuer un tour sur elle-même. Un jour a été divisé en 24h et on a défini l'heure solaire **TS** en fixant **TS = 12h** lorsque la hauteur du Soleil est maximale (le Soleil est à son « **zénith** ») [3].

On définit également l'angle horaire par :

$$\sin h = \sin \delta \cos \omega \quad (5)$$

est compté positivement l'après-midi.

La hauteur  $h$  du Soleil peut alors se déduire de la relation :

$$\sin h = \sin \delta \cos \omega \quad (6)$$

Et l'azimut  $a$  par la relation :

$$\sin(a) = \frac{\cos(\delta) \sin(\omega)}{\cos(h)} \quad (7)$$

## 1.6. Générateur photovoltaïque

Le générateur photovoltaïque est un ensemble d'équipements mis en place pour exploiter l'énergie photovoltaïque afin de satisfaire les besoins en charge. En fonction de la puissance désirée, les modules peuvent être assemblés en panneaux pour constituer un "champ photovoltaïque". Relié au récepteur sans autre élément, le panneau solaire fonctionne "au fil du soleil", c'est-à-dire que la puissance électrique fournie au récepteur est fonction de la puissance d'ensoleillement. Elle est donc à son maximum lorsque le soleil est au zénith et nulle la nuit [4].

Mais, très souvent, les besoins en électricité ne correspondent pas aux heures d'ensoleillement et nécessitent une intensité régulière (éclairage ou alimentation de réfrigérateurs, par exemple). On équipe alors le système de batteries d'accumulateurs qui permettent de stocker l'électricité et de la restituer en temps voulu [4].

Un régulateur est alors indispensable pour protéger les batteries contre les surcharges ou les décharges profondes nocives à sa durée de vie.

Pour un certain nombre d'applications, le courant continu produit, par le générateur photovoltaïque, est convertit à l'aide d'un onduleur en courant alternatif.

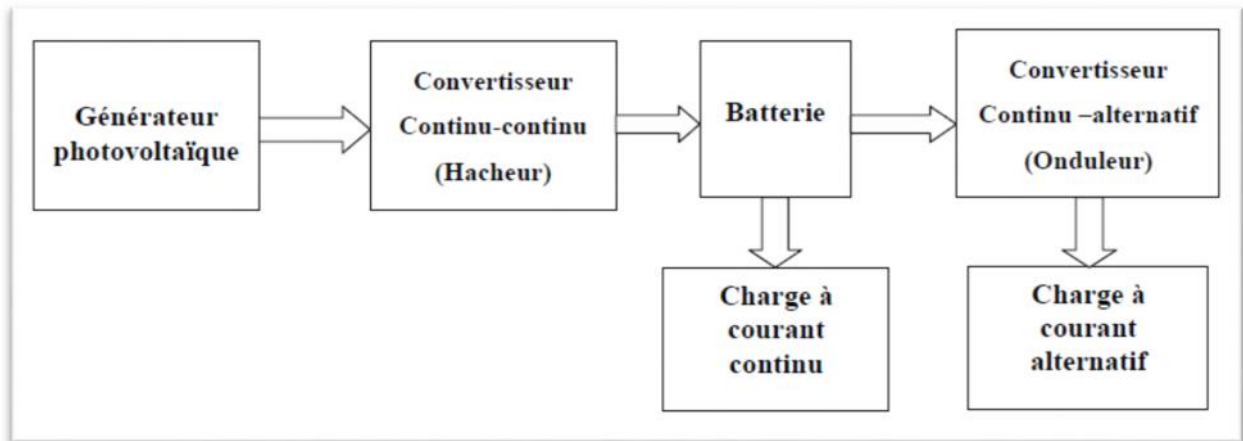


Figure 1- 5: Composantes principales d'une chaîne photovoltaïque

### 1.7. L'énergie photovoltaïque

L'énergie photovoltaïque (PV) est la transformation directe de la lumière en électricité. A l'encontre de l'énergie solaire passive, qui utilise les éléments structuraux d'un bâtiment pour mieux le chauffer (ou le refroidir), et de l'énergie solaire active, qui utilise un caloporteur (liquide ou gazeux) pour transporter et stocker la chaleur du soleil (on pense au chauffe-eau), l'énergie photovoltaïque n'est pas une forme d'énergie thermique. Elle utilise une photopile pour transformer directement l'énergie solaire en électricité.

L'effet photovoltaïque, c'est-à-dire la production d'électricité directement de la lumière, fut observée la première fois, en 1839, par le physicien français Edmond Becquerel. Toutefois, ce n'est qu'au cours des années 1950 que les chercheurs de la compagnie Bell-Lab, aux États-Unis, parvinrent à fabriquer la première photopile, l'élément primaire d'un système photovoltaïque [4].

### 1.8. Cellules photovoltaïques

Les cellules photovoltaïques ou les plaques solaires sont des composants optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité par un processus appelé « effet photovoltaïque », a été découverte par E. Becquerel en 1839 [5].

Elles sont réalisées à l'aide des matériaux semi-conducteurs, c'est à dire ayant des propriétés intermédiaires entre les conducteurs et les isolants.

La taille de chaque cellule va de quelques centimètres carrés jusqu' à 100 cm<sup>2</sup> ou plus sa forme est circulaire, carrée ou dérivée des deux géométries.

Les cellules se branchent en série, ce qui permet aux électrons générés par une cellule d'être repris par la suivante. Le but est d'avoir une différence de potentiel normalement entre 6 et 24 V. la figure (1- 6) suivante représente le schéma électrique d'une cellule photovoltaïque [6].

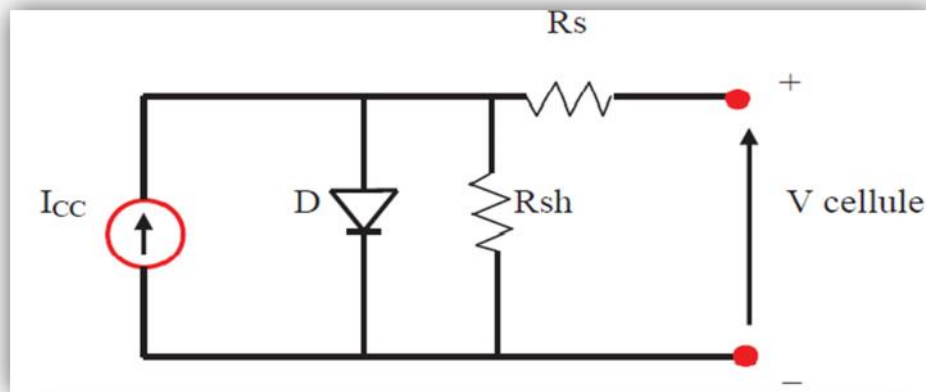


Figure I- 6 : Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque

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 [7].

### 1.8.1. L'effet photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est basée sur le phénomène physique appelé effet Photovoltaïque qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier entre 0.3 V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température de la cellule et du vieillissement de la cellule [8]. La figure (1- 7) illustre une cellule PV typique où sa constitution est détaillée. Les performances de rendement énergétique atteintes industriellement sont de 13 à 14 % pour les cellules à base de silicium monocristallin, 11 à 12 % avec du silicium poly cristallin et enfin 7 à 8 % pour le silicium amorphe en films minces [9]. La photopile ou cellule solaire est l'élément de base d'un générateur photovoltaïque [10].

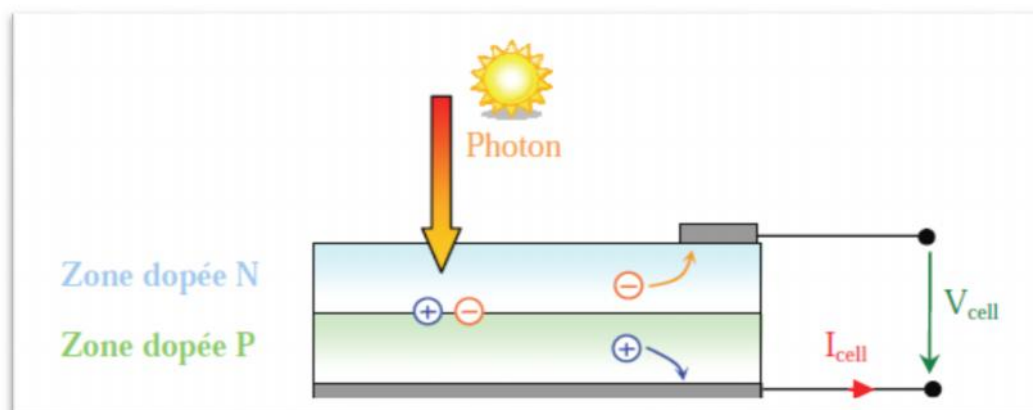


Figure 1- 7 : Schéma de principe de la conversion photoélectrique.

### 1.8.2. Technologie d'une cellule photovoltaïque

#### ➤ Silicium monocristallin

Le silicium cristallin est actuellement l'option la plus populaire pour les cellules commerciales, bien que beaucoup d'autres matériaux soient disponibles. Le terme « cristallin » implique que tous les atomes dans le matériau PV actif font partie d'une structure cristalline simple où il n'y a aucune perturbation dans les arrangements ordonnés des atomes.

#### ➤ Silicium poly cristallin

Il est composé de petits grains de silicium cristallin. Les cellules à base de silicium poly cristallin sont moins efficaces que les cellules à base de silicium monocristallin. Les joints de grains dans le silicium poly cristallin gênent l'écoulement des électrons et réduisent le rendement de puissance de la cellule. L'efficacité de conversion PV pour une cellule à base de silicium poly cristallin modèle commercial s'étend entre 10 et 14%.

#### ➤ Silicium amorphe (a-si)

Le silicium est déposé en couche mince sur une plaque de verre ou un autre support souple. L'organisation irrégulière de ses atomes lui confère en partie une mauvaise semi conduction. Les cellules amorphes sont utilisées partout où une solution économique est recherchée ou lorsque très peu d'électricité est nécessaire, par exemple pour l'alimentation des montres, des calculatrices, ou des luminaires de secours. Elles se caractérisent par un fort coefficient d'absorption, ce qui autorise de très faibles épaisseurs, de l'ordre du micron. Par contre son rendement de conversion est faible (de 7 à 10 %) et les cellules ont tendance à se dégrader plus rapidement sous la lumière [11].

#### ➤ Nouvelle technologie

On utilise de plus en plus de matériaux organiques dans le domaine de l'optoélectronique, avec des perspectives d'électronique organique voire moléculaire, pour l'éclairage à l'aide de diodes électroluminescentes organiques (OLED : Organic Light- Emitting Diode). Bien que les optimisations des matériaux à mettre en œuvre ne soient pas les mêmes, le domaine du photovoltaïque bénéficie depuis quelques années des avancées technologiques de l'optoélectronique. Ainsi, bien que cette filière soit vraiment récente, les progrès annuels sont spectaculaires. Les matériaux organiques, moléculaires ou polymériques, à base de carbone, d'hydrogène et d'azote, sont particulièrement intéressants en termes d'abondance, de coût, de poids et de mise en œuvre [12].

Le tableau (1-1) présente les avantages et les inconvénients pour les technologies les plus utilisées d'une cellule photovoltaïque.

Tableau 1- 1: Avantage et inconvénient des cellules photovoltaïques

Type	Silicium Mono Cristallin	Silicium Poly Cristallin	Silicium Amorphe
<b>Durée De Vie</b>	35 ans	35 ans	< 10 ans
<b>Avantage</b>	Bon rendement en soleil direct	Bon rendement en soleil direct (moins que le monocristallin mais plus que l'amorphe)	Souplesse prix moins élevé que les cristallins Bon rendement en diffus
<b>Inconvénient</b>	Mauvais rendement en soleil diffus (temps nuageux ....) Prix élevé	Mauvais rendement en soleil diffus (temps nuageux ....) Prix élevé	Mauvais rendement en plein soleil

## 1.9. Regroupement des cellules

### 1.9.1. Regroupement en série

Une association de ( $N_s$ ) cellule en série figure (1- 8) permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque. Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultant du groupement série est obtenues par addition des tensions élémentaires de chaque cellule. L'équation résume les caractéristique électriques d'une association série de ( $N_s$ ) cellules [12].

$$V_{coNs} = N_s \times v_{co}$$

$$I_{ccNs} = I_c$$

$V_{coNs}$ : la somme des tensions en circuit ouvert de  $N_s$  cellules en série.

$I_{ccNs}$ : courant de court-circuit de  $N_s$  cellules en série.

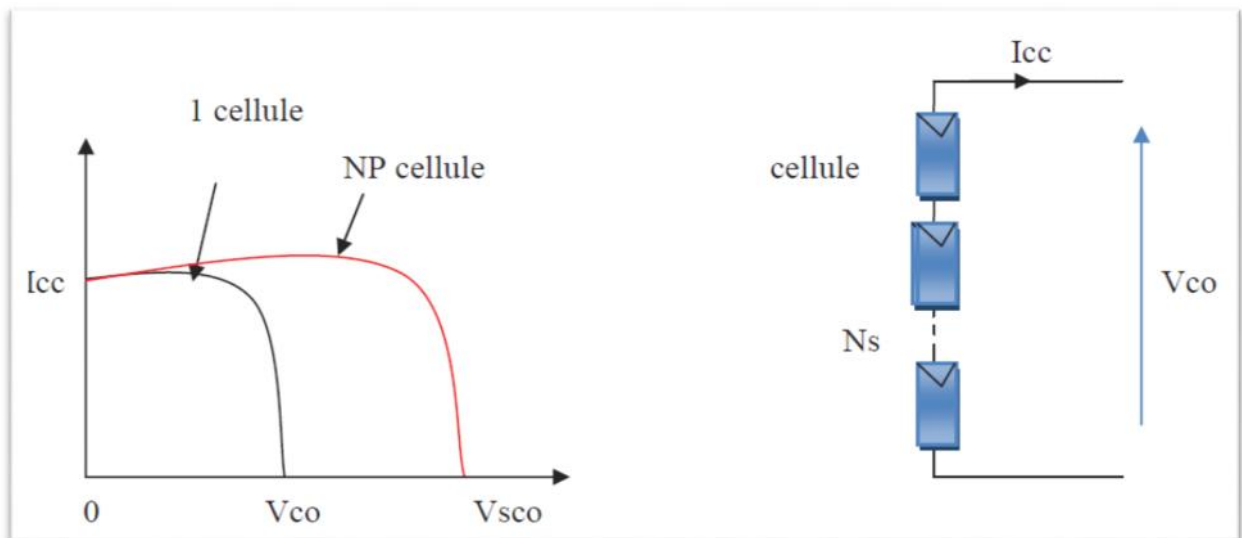


Figure 1- 8 : Caractéristique courant tension de  $N_s$  cellule en série

### 1.9.2. Regroupement en parallèle

Une association parallèle de (NP) cellule figure (1- 9) est possible et permet d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créé. Dans un groupement de cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants [13].

Avec :

$$I_{ccNp} = N_p \times I_{cc}$$

$$V_{co} = V_{coNp}$$

$I_{ccNp}$ : la somme des courants de court circuit de (NP) cellule en parallèle

$V_{coNp}$ : tension du circuit ouvert de ( $N_p$ ) cellules en parallèle

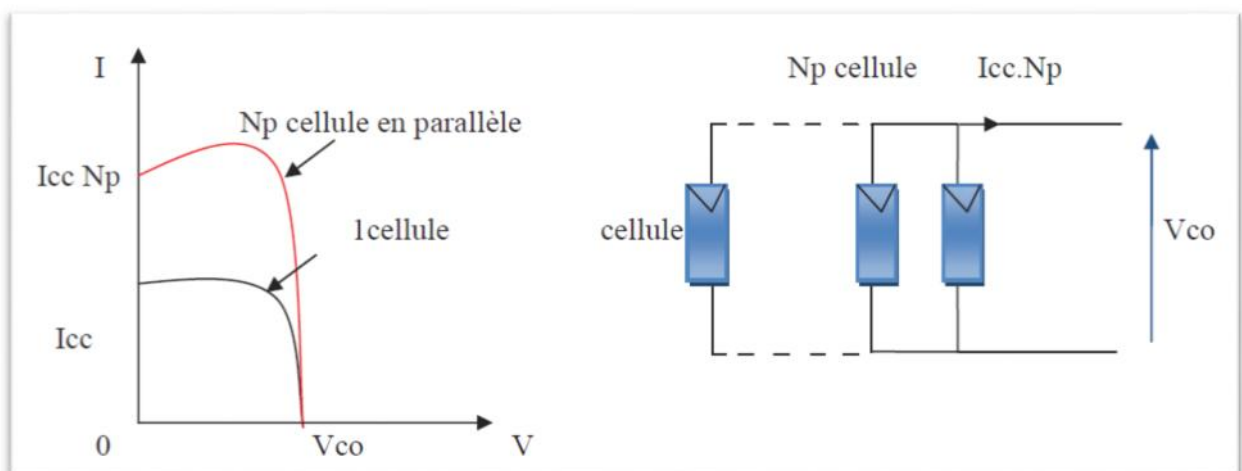


Figure I- 9 : Caractéristique courant tension de ( $N_p$ ) cellule en parallèle



### 1.9.3. Regroupement (série et parallèle)

On utilise généralement ce type d'association pour en tirer une tension importante puisque l'association en série des photopiles délivre une tension égale à la somme des tensions individuelles et un courant égal à celui d'une seule cellule. La caractéristique d'un groupement de deux modules solaires est représentée ci-dessous, ce qui peut être généralisé sur une gamme de  $N_s$  modules solaires en série. Ce genre de groupement augmente le courant.

Afin d'obtenir des puissances de quelques kW, sous une tension convenable, il est nécessaire d'associer les modules en panneaux et de monter les panneaux en rangées de panneaux série et parallèle pour former ce que l'on appelle un générateur photovoltaïque [7].

### 1.10. Influence de la température

L'équation de Boltzmann donne :  $I_{sc} = I_0 \cdot \exp(q \cdot V_o / KT)$ , l'expérience montre que la tension de circuit ouvert d'une cellule solaire diminue avec l'augmentation de la température de la cellule [14,15].

Nous présentons ci-dessous les caractéristiques I-V et P-V (figure 1- 10 et 1- 11) d'un module photovoltaïque SP75 (module photovoltaïque siemens) pour un niveau d'ensoleillement  $G$  donné et pour différentes températures :

Pour la figure (1- 10) Nous remarquons que le courant dépend de la température puisque le courant augmente légèrement à mesure que la température augmente, on constate que la température influe négativement sur la tension de circuit ouvert. Quand la température augmente la tension de circuit ouvert diminue. Et par contre la puissance maximale du générateur subit une diminution lorsque la température augmente figure (1- 11).

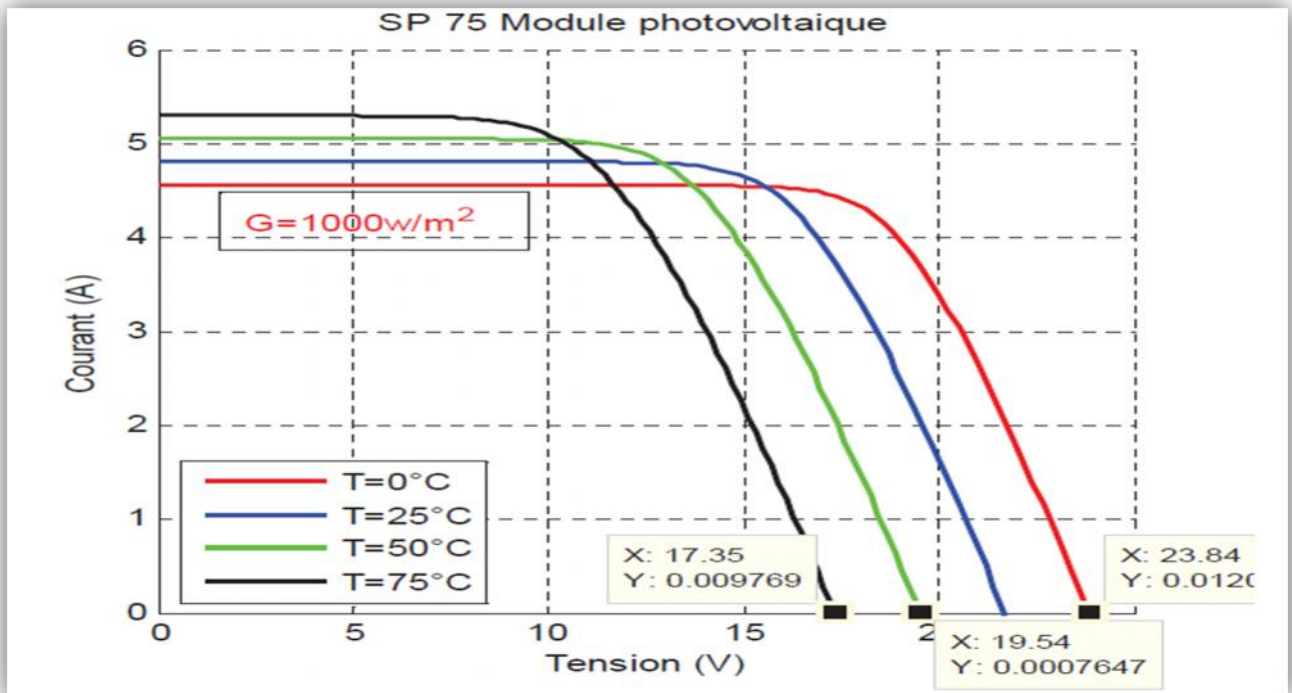


Figure 1- 10: La caractéristique de  $I=f(V)$  en fonction de température

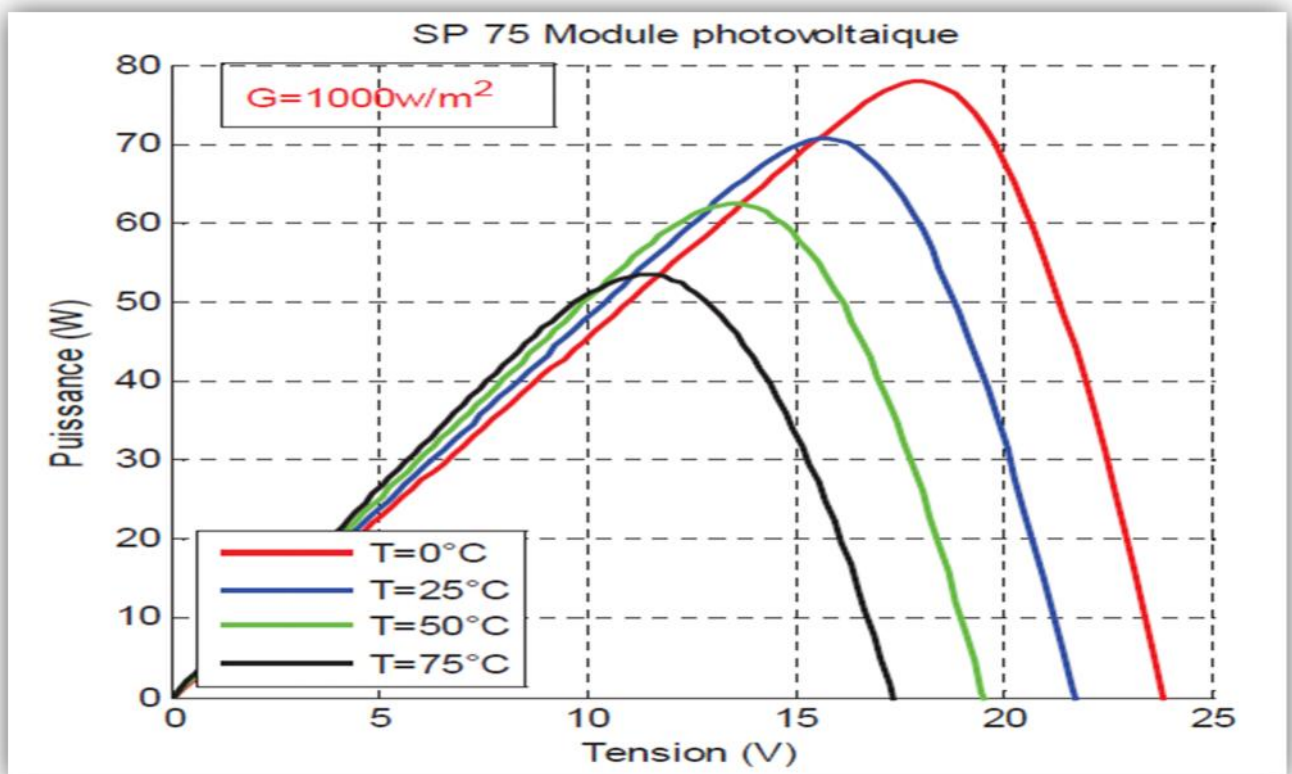


Figure 1- 11 : La caractéristique de  $P= f(V)$  en fonction de température

### 1.11. Influence de l'éclairement

Le même travail comme précédente, nous avons fixé la température pour différents Éclairements figure (1- 12 et 1- 13).

Pour la figure (1-10) on remarque que pour l'éclairement  $G=1000 \text{ w/m}^2$  le courant  $I_{sc}=4.8\text{A}$  et pour  $G=800\text{w/m}^2$  le courant  $I_{sc}=3.84\text{A}$  on peut voir que le courant subit une variation importante, quand l'éclairement augmente le courant de court-circuit est augmenté, mais par contre la tension varie légèrement .Ce qui se traduit par une augmentation de la puissance, lorsque l'éclairement est augmenté figure (1- 11).

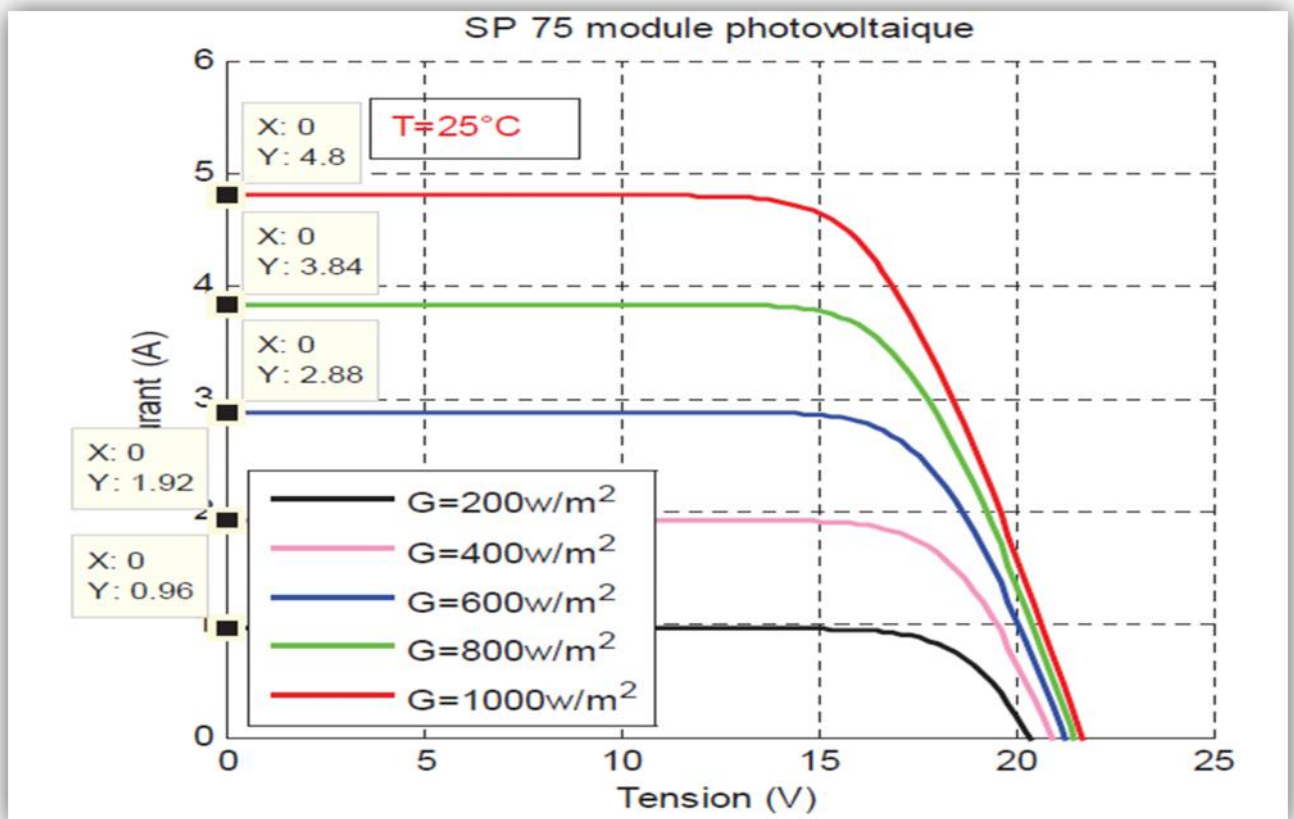


Figure 1- 12: La caractéristique  $I=f(v)$  en fonction de l'éclairement

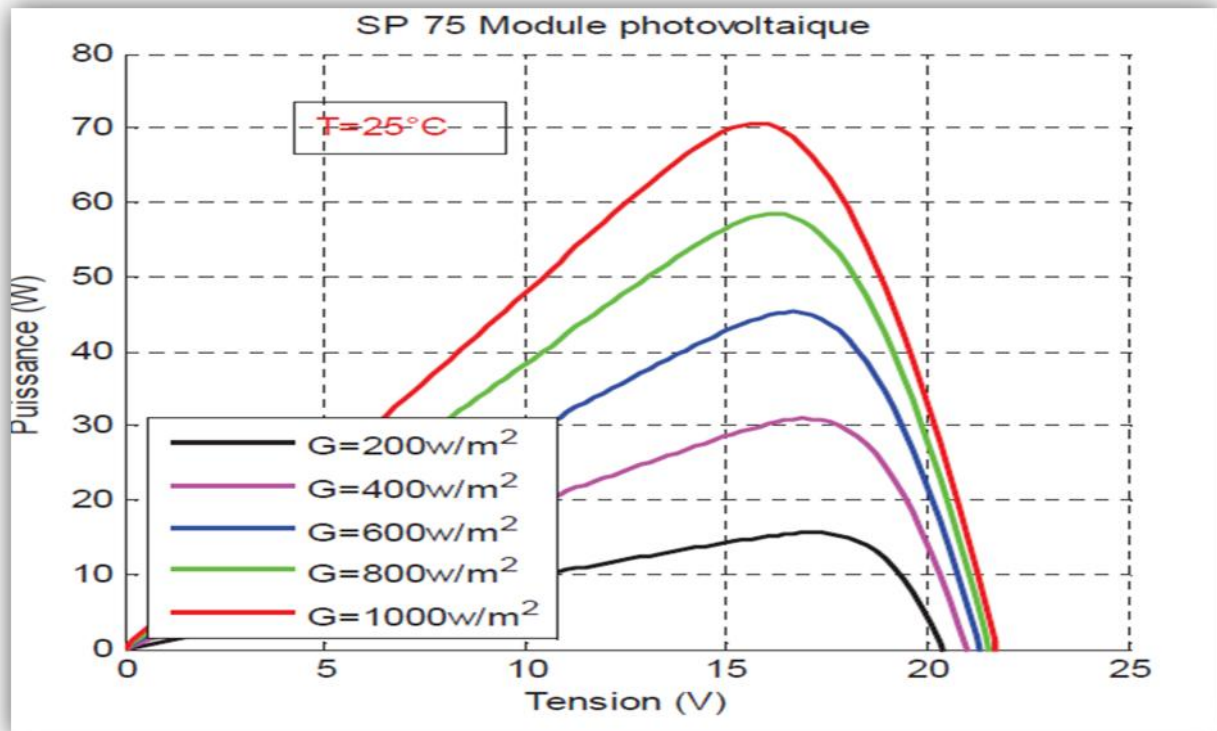


Figure 1- 13: La caractéristique  $P=f(v)$  en fonction de l'éclairement

### 1.12. Conclusion

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par la cellule photovoltaïque basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque. La tension générée peut varier en fonction du matériau utilisé pour la fabrication de la cellule. L'association de plusieurs cellules en série et/ou parallèle donnent lieu à un module photovoltaïque qui a une caractéristique courant-tension non linéaire présentant un point de puissance maximale

Dans ce chapitre nous avons présenté les principales caractéristiques et les technologies des éléments constitutifs d'un générateur PV ainsi nous avons montré bien l'influence de la température et l'éclairement sur le rendement de la cellule, et on constate que la puissance ne dépend pas seulement de la température mais dépend aussi de l'éclairement.

## *Chapitre 2*

### *Les véhicules électriques*

#### **2.1. Introduction**

A l'heure de l'économie mondialisée et d'une société collective de plus en plus individualiste, les besoins de mobilité des individus ont poussé ces derniers à se tourner vers des moyens de transport rapides et individuels. La conséquence de ce phénomène est qu'aujourd'hui, les transports routiers représentent le secteur le premier consommateur de produits pétroliers ainsi que le premier émetteur de gaz à effet de serre. L'épuisement des réserves de pétrole, les nuisances directes dues à la circulation ainsi que les inquiétudes vis-à-vis de l'effet de serre sont autant de raisons pour nous pousser à explorer toutes les marges de manœuvre afin de réduire l'influence néfaste des transports routiers sur l'environnement. L'une des idées émergentes concerne la généralisation des véhicules électriques. Mais qu'en est-il vraiment ?

Le premier objectif de cette étude, est de faire le point sur les caractéristiques intrinsèques du véhicule électrique et les véhicules hybrides. Ainsi, nous nous intéresserons à son efficacité énergétique afin de déterminer si le véhicule électrique est économe en ressources. De plus, nous nous attacherons à mesurer ses impacts directs et indirects sur le plan environnemental. Le deuxième objectif de cette étude est quant à lui double, il est d'une part d'estimer quelles seraient les conséquences énergétiques et environnementales d'une généralisation des voitures électriques et d'autre part, de mesurer nos capacités et ressources à assumer un tel changement pour qu' « avec des si nous puissions refaire le Monde ».

Le réchauffement climatique et la diminution des ressources pétrolières remettent en question nos véhicules à carburant fossile. Les nouvelles technologies de propulsion, basées sur l'électricité, suffiront-elles à sauver notre mobilité exacerbée ? Elles n'offriront qu'une partie de la réponse, en complément avec une mobilité plus raisonnée utilisant plus de transports en commun. Quels sont les caractéristiques et défis des propulsions de futurs véhicules automobiles ?

#### **2.2. Historique**

L'histoire du véhicule électrique commence en Europe au début du 18<sup>ème</sup> siècle. Après l'invention de la batterie primaire par Volta en 1800 et la démonstration du principe du moteur électrique en 1821 par Faraday, la première voiture électrique a été construite en 1834 à Brandon, en Grande Bretagne, par un mécanicien nommé Thomas Davenport. Le petit véhicule fonctionnait sur une batterie non- rechargeable et réussissait à parcourir un court trajet sur rail [16]. Puis, en 1859, le français G. Planté inventait la batterie secondaire plomb/acide rechargeable et en 1869 Gramme construit le premier moteur électrique à courant continu ayant une puissance de plus d'un

cheval. Douze ans plus tard, en 1881, Gustave Trouvé, réalisait le premier véhicule électrique alimenté par une batterie secondaire, Le véhicule était propulsé par un moteur électrique à courant continu de 0,1 cheval et pesait 160 kg avec son conducteur. D'après il a été précédé par Sir David Salomons qui construisit un VE avec une batterie rechargeable en 1874. Plus tard, en 1885, les allemands Daimler et Benz inventaient la première voiture à essence [17].

Les premières réalisations n'ont pas attiré l'attention du public due à leur technologie encore immature qui ne pouvait pas rivaliser avec les voitures à chevaux. Mais, les choses ont vite changeait et dans les années qui ont suivi la course était lancée : les véhicules électriques rivalisaient avec les véhicules thermiques mais aussi avec les véhicules à vapeurs. A titre d'exemple, parmi les automobiles construites en 1900 aux Etats-Unis, 1575 étaient électriques, 1684 à vapeur et seulement 936 à essence [18].

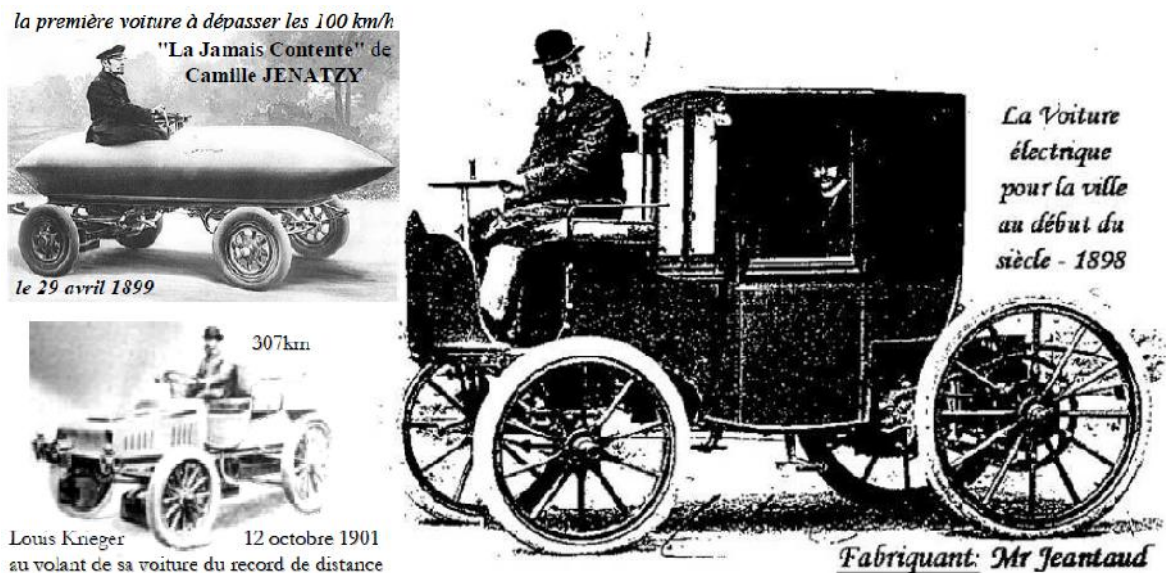


Figure 2.1 : Exemples des voitures électriques du début du siècle

Sans doute, le début du 20<sup>ème</sup> siècle a constitué l'âge d'or du VE. En effet, c'est un VE qui pour la première fois a franchi la limite de 100 km/h, le 29 avril 1899, avec le Belge Camille Jenatzy à bord de sa voiture baptisée « La Jamais Contente » en forme d'obus. Ce VE avait deux moteurs entraînant directement les roues arrière, d'une puissance maximale totale de 50 kW (soit 67 chevaux), alimentés par les 80 éléments de la batterie Fulmen pesant près de la moitié du poids total du véhicule de 1,5 tonne [18]. Deux ans plus tard, le 12 octobre 1901, l'ingénieur français Louis Krieger effectuait, sans recharge, le voyage Paris-Châtellerauld soit 307km à la vitesse moyenne de 17,5km/h. Cette performance lui a valu un statut parmi les plus importants constructeurs de véhicules électriques du début du siècle [19].

Le véhicule électrique était donc bien présent dans le monde de l'automobile. Notamment, à l'occasion de l'Exposition Universelle de Paris, en 1900, la ville est traversée par « des taxis à batteries amovibles, d'élégants et silencieux coupés, des fourgons postaux, des voitures de livraison et des véhicules de pompiers, fonctionnant tous à l'électricité » [19].

Cependant, l'amélioration continue des performances des véhicules à moteur à combustion interne, l'apparition de l'essence bon marché, et la persistance des limites qui affectent la capacité des batteries, font disparaître progressivement les VE du marché. Ainsi, au début des années 30, la production de véhicules électriques est presque complètement interrompue, la période 1921-60 étant dominée par les véhicules à moteur thermique. Dès lors, les VE n'ont connu que des utilisations spécifiques. D'après [17] la dernière production significative de VE, d'un point de vue commercial, a été réalisée autour des années 1905.

De nouvelles possibilités vont apparaître en traction électrique après les années 1945, lorsque les laboratoires Bell inventent le transistor et plus tard, à l'apparition des thyristors capables de commuter des courants et des tensions élevées. Ces découvertes conduisent au développement de l'électronique de puissance qui permet le remplacement des rhéostats et la commande des moteurs à courant alternatif à fréquence variable.

En même temps, dans les années 60-90, à cause de la pollution atmosphérique et surtout des chocs pétroliers des années 70 et 80, de nombreux pays commencent à s'intéresser aux VE. Les recherches sont reprises et le VE commence à réapparaître en petit nombre. L'ère moderne du VE culmine entre les années 80-90 avec quelques véhicules réalisés comme l'EV1 produit par GM et la Peugeot 106 Electrique produite par PSA. Malgré les progrès, dans les années 90, il devient évident que les véhicules électriques ne peuvent pas rivaliser avec les véhicules conventionnels à cause de leur autonomie et performances insuffisantes. Comme au début du 20<sup>ème</sup> siècle, le frein à leur développement est, et reste, la source de stockage d'énergie, i.e. la batterie.

Tableau. 2 .1 : Principaux véhicules électriques commercialisés dans les années 1990

Marque	Moteur	Batterie	Autonomie	Performance	Chargeur
Peugeot 106	MCC	Ni-Cd 120V 12.5kWh	80-150km	90km/h	3kW
Citroën Berlingo	MCC	Ni-Cd 162V 12.5kWh	90km	95km/h	3kW
Citroën Saxo	MCC	Ni-Cd 120V 12.5kWh	75km	90km/h	3kW
Renault Clio	MCC	Ni-Cd 114V 11.4kWh	80km	95km/h	3.25kW
Renault Kangoo	MS Triphasé	Ni-Cd 132V 13.2kWh	90-180*km	103km/h	3.3kW
Peugeot Partner	MCC	Ni-Cd 162V 12.5kWh	75km	95km/h	3kW
<i>*180km : Système muni d'un prolongateur d'autonomie</i>					

### 2.3. Définition

Un véhicule électrique VE est un véhicule dont la propulsion est assurée par un moteur fonctionnant exclusivement à l'énergie électrique. Autrement dit, la force motrice est transmise aux roues par un ou plusieurs moteurs électriques selon la solution de transmission retenue. Compte tenu des progrès scientifiques et technologiques accomplis dans le domaine de l'électronique de puissance, les systèmes de gestion de l'énergie, etc. beaucoup d'idées et de nouvelles conceptions sont explorées pour développer ce mode de propulsion. Toutes ces explorations sont liées à une problématique commune : la production, le transport, le stockage et l'utilisation de l'électricité [20].

### 2.4. Les composants de véhicule électrique

Comme vous pouvez le voir sur le schéma ci-dessus, la constitution d'une voiture électrique moderne est nettement plus simple que celle d'une voiture à essence. La transmission et le moteur sont nettement plus petits et les batteries peuvent être placées de façon à obtenir une répartition idéale des masses. Elles peuvent même être intégrées au châssis, abaissant ainsi le centre de gravité du véhicule et améliorant sa tenue de route. La taille réduite et la simplicité des composants permettent d'imaginer des véhicules extrêmement petits et légers, ce qui est un avantage non négligeable lorsque l'on souhaite économiser de l'énergie. De plus, les moteurs électriques sont particulièrement « coupleux », ce qui veut dire qu'ils délivrent une puissance importante à une



fréquence de rotation moindre. Cela permet d'accélérer rapidement lorsque l'on part depuis l'arrêt. Voyons comment ces moteurs transforment une énergie électrique en mouvement [21].

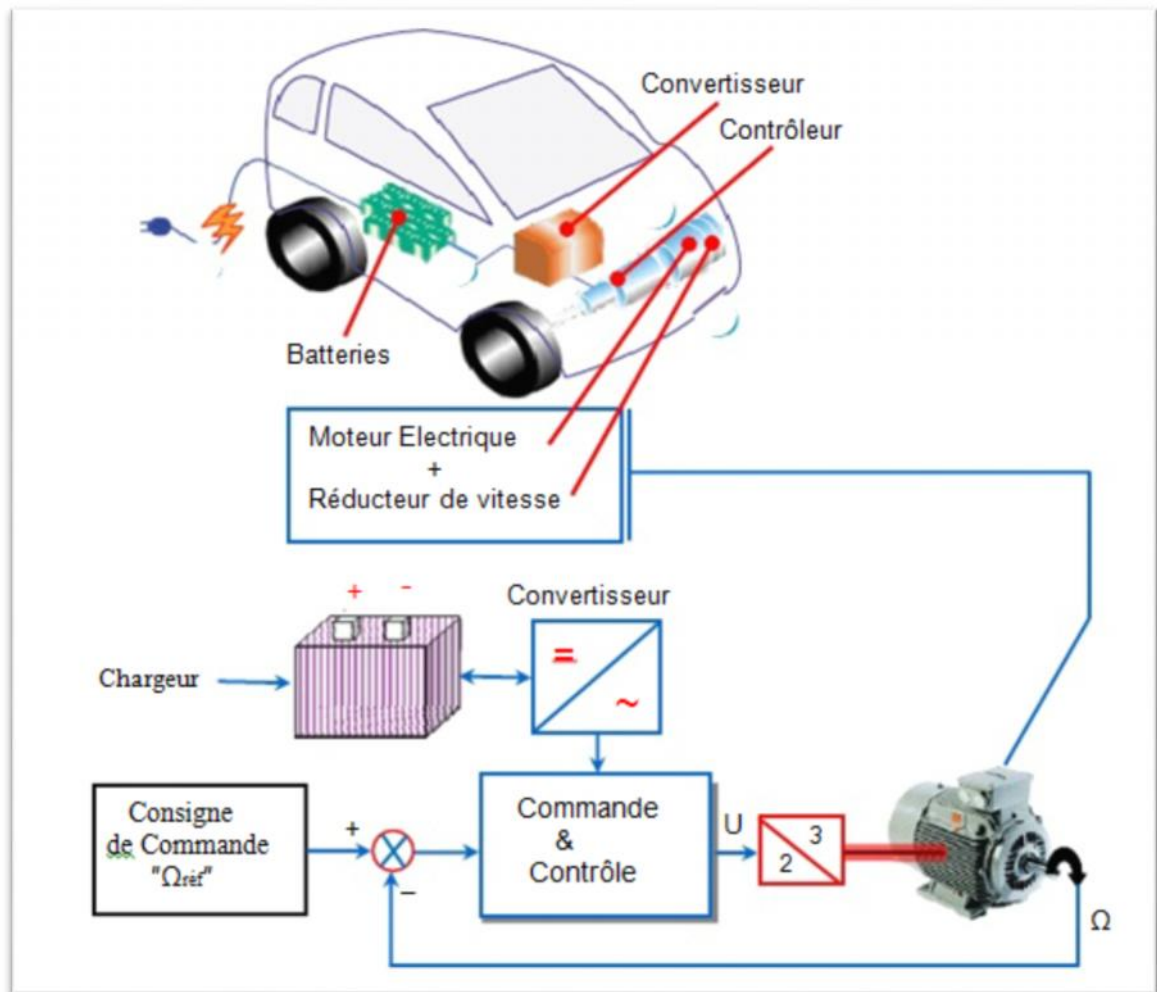


Figure 2.2: schéma équivalent d'un véhicule électrique.

#### 2.4.1. Le Bloc Moteur Electrique

Le moteur électrique est l'élément indispensable du véhicule électrique, il doit être robuste, fiable et pratiquement sans entretien, ce qui est plus indiqué pour le moteur à induction. Selon le type de propulsion, il peut y avoir un ou plusieurs moteurs. Par ailleurs, différents types de moteurs peuvent être utilisés pour la propulsion, et cela dépend de plusieurs paramètres et contraintes du type de propulsion (véhicule lourd ou léger, faible ou grande puissance, etc.) [22].

Le moteur électrique est né de la découverte de l'électromagnétisme par Oersted en 1821, ce phénomène montre que le courant électrique exerce une force sur un aimant, le premier mouvement rotatif obtenu par ce principe est la roue de Barlow. Les tentatives suivantes de création d'un moteur à proprement parlé n'ont pas abouti commercialement ; Il a fallu les découvertes de Xénobe Gramme, l'inventeur de la génératrice pour que Tesla dépose le premier brevet exploitable.

### 2.4.1.1. Les composants d'un moteur électrique

Un moteur électrique est composé principalement d'un stator (fixe), et d'un rotor (qui tourne). Le stator entoure le rotor, et génère un champ magnétique qui le traverse. Ce champ peut être généré par induction, ou par des aimants permanents (comme sur les illustrations de cette page). Le rotor est constitué de bobines dont le fil est recouvert d'une couche isolante, et de connecteurs. Il est solidaire de l'axe central du moteur. Voici une vue en coupe d'un moteur électrique simple (Figure 2.3).

D'après Laplace, un conducteur placé dans un champ magnétique  $\vec{B}$  et parcouru par un courant  $\vec{I}$ , est soumis à une force  $\vec{F}$ , perpendiculaire au plan formé par  $\vec{I}$  et  $\vec{B}$ . La direction et le sens de ces trois vecteurs sont déterminés par la règle des trois doigts de la main droite. Le pouce indique le sens du courant, l'index indique le sens du champ magnétique, et le majeur indique le sens de la force.

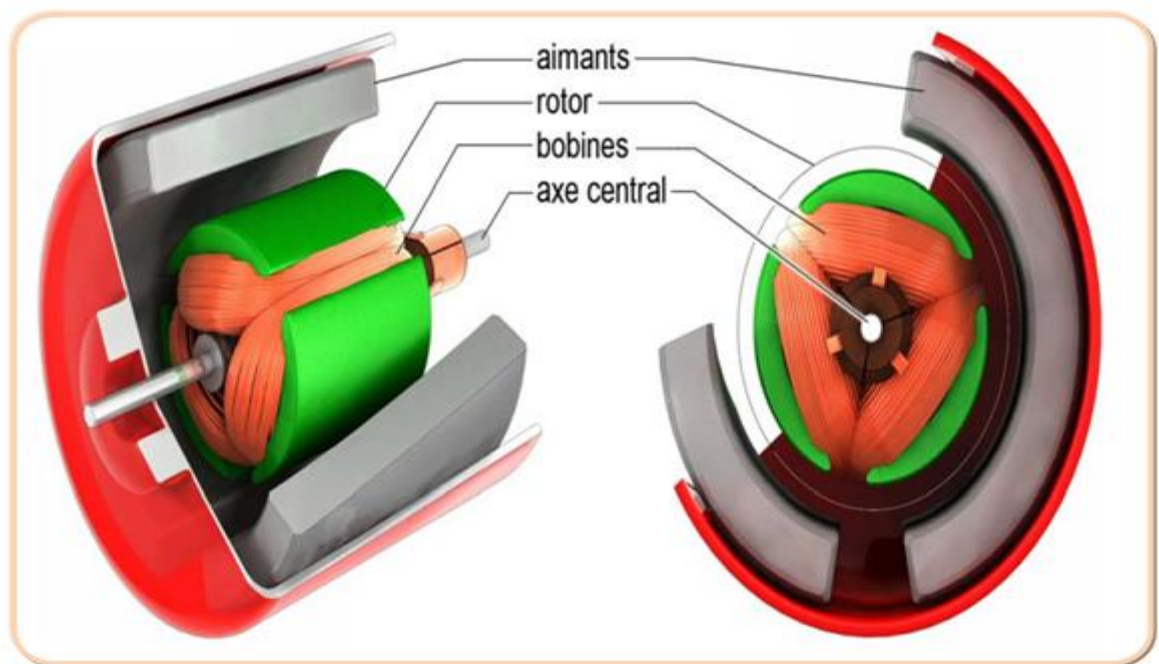


Figure 2.3:schéma équivalent d'un moteur électrique.

C'est ainsi que le courant et le champ magnétique présents dans un moteur électrique permettent de faire tourner le rotor, et donc l'axe du moteur, observez la Figure 2.2 représentant de manière simplifiée un moteur électrique.

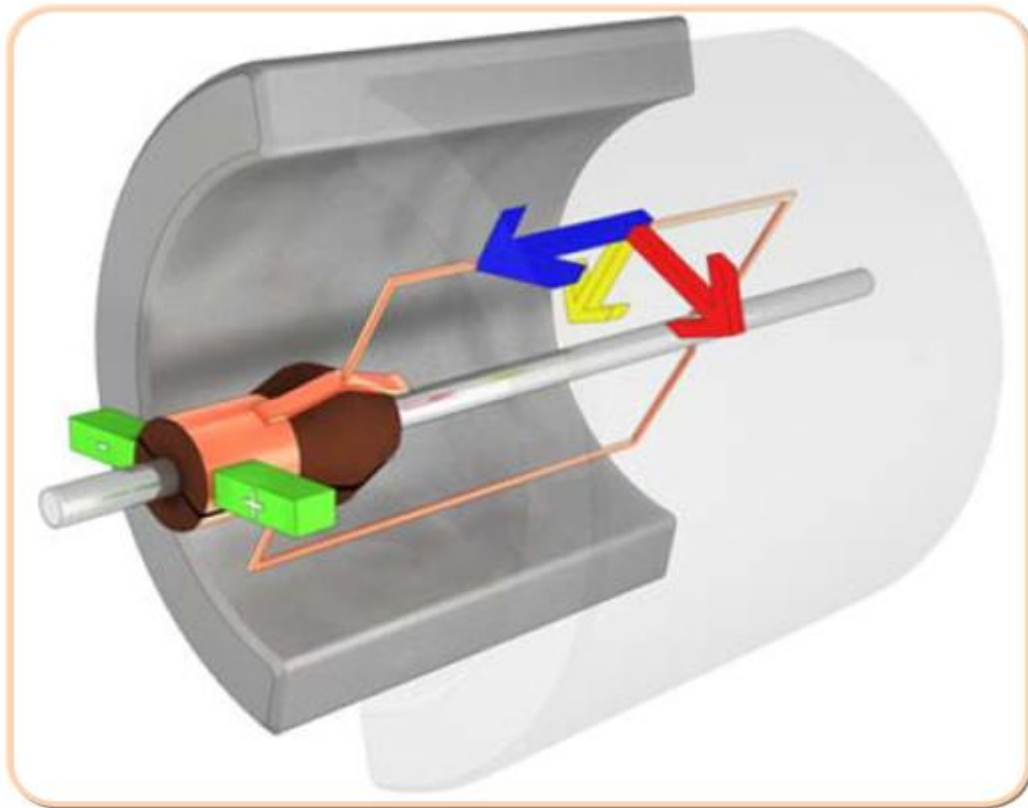


Figure 2.4: la tournure de rotor.

Comme vous pouvez le voir, il y a deux pôles (en vert). Ces pôles transmettent le courant au connecteur central, un fil relie les 2 pôles en formant un rectangle (ce fil représente une bobine de 1 spire), sur ce fil s'exerce la force de Laplace, comme illustré par des flèches, la force de Laplace ne s'exerce bien sûr pas seulement en ce point, mais sur toute la longueur du fil, tant qu'il est perpendiculaire au champ magnétique.

Le moteur illustré sur ce schéma à deux phases Figure II.5, pour plus d'efficacité, cela signifie qu'à chaque moitié de tour du rotor, le courant dans la bobine s'inverse, et que la force est toujours exercée dans le sens de rotation. Le moteur délivre ainsi une puissance élevée et continue, dès une fréquence de rotation basse.

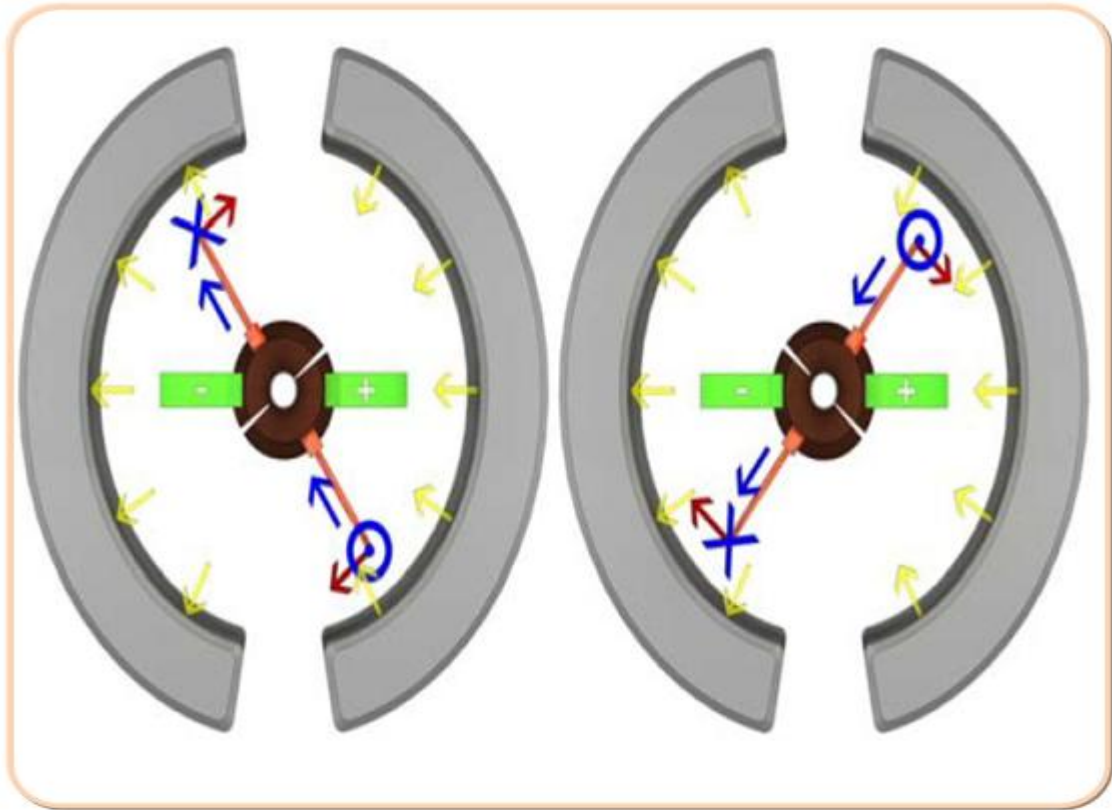


Figure 2.5: les deux phases de moteur électrique.

#### 2.4.1.2. Le Moteur Electrique d'Entraînement

Les performances globales d'un VE dépendent amplement du type de moteur d'entraînement employé. Un moteur électrique convient beaucoup mieux à la propulsion d'un véhicule qu'un moteur thermique. Les voitures électriques pourraient donc avoir une meilleure efficacité au cours de la conversion d'énergie en plus de ne pas produire les émissions associées au processus de combustion avec un bruit inférieur. De plus, un moteur électrique offre un couple élevé et s'adapte à toutes les situations. Il peut récupérer sa propre énergie, celle de la décélération. Si pour un véhicule thermique les freins transforment l'énergie cinétique en chaleur qu'il n'est guère possible de réutiliser. Le VE en revanche, dès que le conducteur relâche l'accélérateur, les roues motrices renvoie progressivement l'énergie cinétique du véhicule au moteur électrique, qui devient alors une génératrice et recharge les batteries. De manière spécifique, le choix du moteur électrique de propulsion et de sa transmission de puissance est déterminé au départ par les caractéristiques de fonctionnement suivantes [23] :

- Assurer un démarrage en côte du VE (couple élevé),
- Obtenir une vitesse maximale,
- Stratégie de pilotage optimisant continuellement la consommation d'énergie (aspect rendement : rendement élevé en étant employé à différentes vitesses).

Ces quelques caractéristiques typiques requises pour les machines utilisées dans les systèmes de propulsion électrique, sont bien illustrées sur la figure 2 .6.exhibant l'évolution du couple/puissance-vitesse.

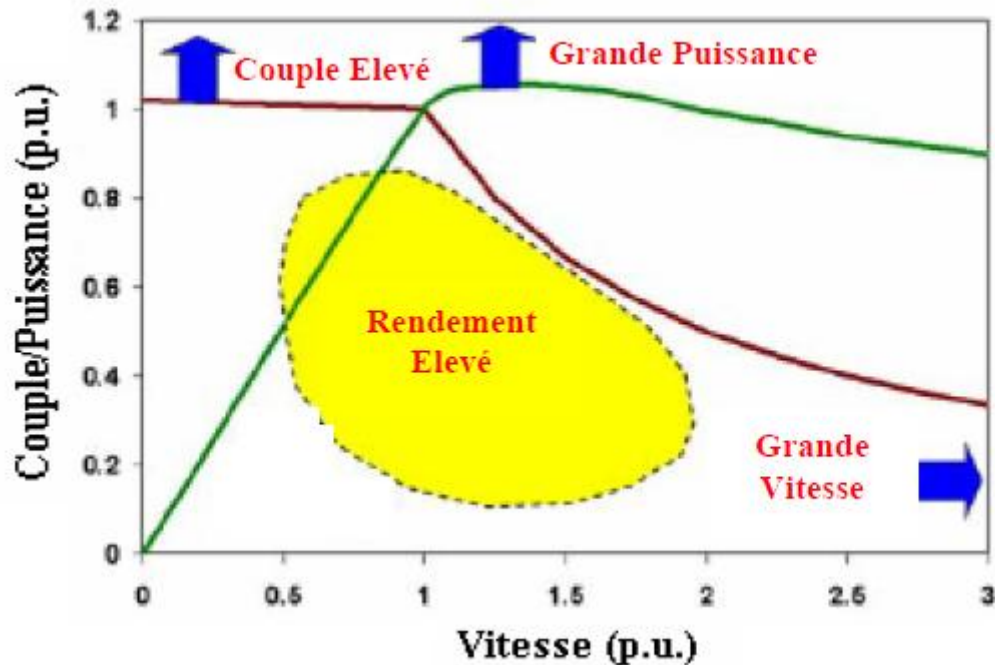


Fig. 2 .6 : Couple/Puissance-Vitesse requises pour VE

Les fabricants des véhicules électriques emploient habituellement différents types de moteurs d'entraînements en tant qu'élément indispensable dans la chaîne de leur système de propulsion. Ceux-ci peuvent être de divers types tels que : le moteur à courant continu (MCC), à induction (MI), synchrone à aimant permanent (MSAP), reluctance variable (MRV) etc. Certains des modèles du VE utilisés par différentes compagnies sont énumérés ci-dessous (Tableau 2.2), avec le type du moteur utilisé.

En plus des caractéristiques de fonctionnement citées précédemment, d'autres considérations importantes de conception sont à prendre en considération à savoir : coût acceptable et encombrement.

#### 2 .4.1.3.Moteurs à Courant Continu

La source d'énergie provenant de la batterie étant à courant continu, le choix d'un moteur à courant continu semble un choix évident. Historiquement, les entraînements utilisant des moteurs à courant continu ont été employés bien en avant dans les véhicules électriques parce qu'ils offrent un contrôle de vitesse simple. De plus, ce type de moteur dispose d'excellentes caractéristiques pour la propulsion électrique (courbe du couple très favorable à faible vitesse). En revanche, leur fabrication est onéreuse et nécessite l'entretien du système balais-collecteur. Leur vitesse est limitée et ayant une faible puissance massique avoisinant en général, les 0,3 à 0,5 kW/kg ; alors que celle

des moteurs à essence est de l'ordre de 0,75 à 1,1 kW/kg. Ce qui les rend moins fiables et non appropriés dans ce domaine d'application. Ces raisons donc, ont conduit les différents industriels à s'orienter vers l'utilisation des machines alternatives triphasées [24].

Tableau 2 .2 : Différents Modèles des Véhicules Electriques

COMPAGNIE	MODELE DU VE	MOTEUR
FAIT	FAIT PANDA ELECTRA	M.C.C. à Excitation Série
FAIT	FAIT SEICENTO	Moteur A Induction
HONDA	HONDA EV PLUS	MSAP
MAZDA	MAZDA BONGO	M.C.C. à excitation shunt
NISSAN	NISSAN ALTRA	MSAP
TOYOTA	TOYOTA RAV 4	MSAP
GENERAL	GM EV 1	Moteur à induction
FORD	FORD THINK CITY	Moteur à induction

#### 2 .4.1.4.Moteurs à Courant Alternatif

L'avancement récent en technologie a rendu les entraînements utilisant les moteurs à courant alternatif beaucoup plus préférables que les entraînements traditionnels avec des moteurs à courant continu. Car étant plus légers, moins coûteux, offrent un rendement beaucoup plus élevé, une fiabilité plus grande, et ils ont également besoin de moins d'entretien que les moteurs à courant continu. Ces facteurs sont d'importance primordiale pour un système de propulsion de véhicule électrique. Dans ce cas, quatre principaux types de moteurs peuvent se discerner :

1. Moteurs à Induction : de construction simple, robuste, ces moteurs sont peu coûteux (bon marché) et ne demandent pas d'entretien. De plus, ils supportent des surcharges pouvant aller jusqu'à 5 ou 7 fois le couple nominal. De bonnes performances dynamiques du contrôle de couple peuvent être réalisées par le contrôle vectoriel ou bien par la commande directe du couple. En revanche, ces commandes assez complexe peuvent augmenter notablement le coût de revient de l'ensemble du système.

2. Moteurs Synchrones : Le moteur à aimants permanents admet une puissance massique plus importante mais le coût des aimants est encore élevé (champ magnétique procuré au moyen des aimants permanents de haute énergie). Ceci mène à la réduction du poids et du volume globaux. En outre, pas de pertes de cuivre au niveau du rotor, donc ils ont un rendement beaucoup plus élevé par rapport aux moteurs à induction. Le moteur à inducteur bobiné quant à lui, semble le mieux placé pour ce type d'application, du moment qu'il dispose d'un degré de liberté supplémentaire grâce à un circuit inducteur permettant d'ajuster le flux d'excitation.

3. Machines Linéaires : Principalement utilisée en traction électrique pour les trains à grande vitesse supérieure à 500 km/h (ce sont des systèmes de sustentation magnétique développés au Japon et qui relèvent de la très haute technologie).

4. Moteurs à Réductance : Construits comme un moteur asynchrone, mais avec un rapport puissance/poids très important, ils en demeurent néanmoins bruyants (ondulations du couple).

Donc, à chaque application de propulsion électrique s'applique un type de moteur différent.

Il n'y a pas de moteur universel, tout comme pour les batteries et les contrôleurs. Le spécifique donnant toujours un meilleur résultat que le standard Chacun des moteurs a des avantages et des inconvénients, mais ce sont essentiellement les notions de coût et de difficulté de la commande qui s'affrontent. Le tableau 2.3 ci-dessous résume bien, de manière qualitative, les avantages et les inconvénients des principaux types de moteurs utilisés dans les véhicules électriques.

De plus, la table 1.3 résume l'ordre de grandeur de puissance maximale nécessaire pour les différentes catégories de véhicules. Ces quelques exemples permettent de constater qu'il est possible de réaliser une motorisation électrique sur de nombreux types de véhicules [25].

Tableau 2.3 : Comparaison des différents Moteurs + : avantage. 0 : neutre. - : désavantage

	<b>Moteur à courant continu</b>	<b>Moteur à induction</b>	<b>Moteur synchrone à aimants permanents</b>	<b>Moteur à réductance</b>
<b>Rapport puissance/poids</b>	0	+	++	+
<b>Vitesse de rotation max</b>	-	+	+	+
<b>Rendement</b>	80-85	85-90	90-95	90-94
<b>contrôlabilité</b>	++	+	+	+
<b>maintenance</b>	-	+	0	+
<b>Coût du moteur</b>	-	++	-	+

Tableau 2 .4 : Puissance Maximale Nécessaire pour divers Véhicules

Type de véhicule	Puissance maximale
Bicyclette assistée	100 à 400 w
Scooter	2 kW
Motocyclette sportive	14 à 25 kW
Voiturette	8 kW
Voiture urbaine	20 à 40 kW
Voiture routière	50 à 70 kW
Véhicule utilitaire urbain	40 kW
Bus urbain	160 kW

#### 2 .4.1.5.Les moteurs roues

La chaîne de traction tout électrique présentée ci-dessus, peut être encore simplifiée en utilisant un moteur pour chaque roue motrice. Ainsi, le différentiel classique est remplacé par un différentiel électrique réalisé par un contrôle indépendant de chaque moteur.

Dans ce cas, deux configurations sont possibles : soit les moteurs sont fixés au châssis donc suspendu, soit les moteurs sont fixés sur les roues formant ainsi ce qui est connu sous le nom de moteur-roue. Dans le premier cas la puissance est transmise sur les roues par des cardans. L'avantage de cette configuration est que la suspension isole les roues de la masse du moteur et la conduite du véhicule est plus facile.

Dans le deuxième cas où les moteurs et les roues sont confondus la transmission est simplifiée. Mais, pour réduire au minimum les masses non suspendues, les moteurs-roue doivent avoir une forte puissance massique. A cause de ces contraintes, ces derniers sont relativement coûteux limitant leur utilisation.

Concernant les moteurs-roue au moins deux configurations peuvent être envisagés : avec réducteur (Figure 2.7.a) ou à entraînement direct (Figure 2.7.b).

Une réalisation d'un moteur-roue avec réducteur a été faite par Michelin, qui a présenté sa roue active (active wheel) lors du Mondial de l'Automobile en 2004. Elle intègre dans une roue un moteur électrique de traction, un frein à disque et une suspension électronique active située dans l'axe verticale de la roue. Très compacte, cette architecture nouvelle influe énormément sur celle du véhicule, qui n'a plus besoin de moteur, de boîte de vitesses, d'embrayage, de cardans, d'arbres de transmission mais aussi d'amortisseurs et de barres antiroulis. En plus, elle agit telle une suspension



active modifiant à tout instant l'assiette du véhicule pour assurer la tenue de route la mieux adaptée.

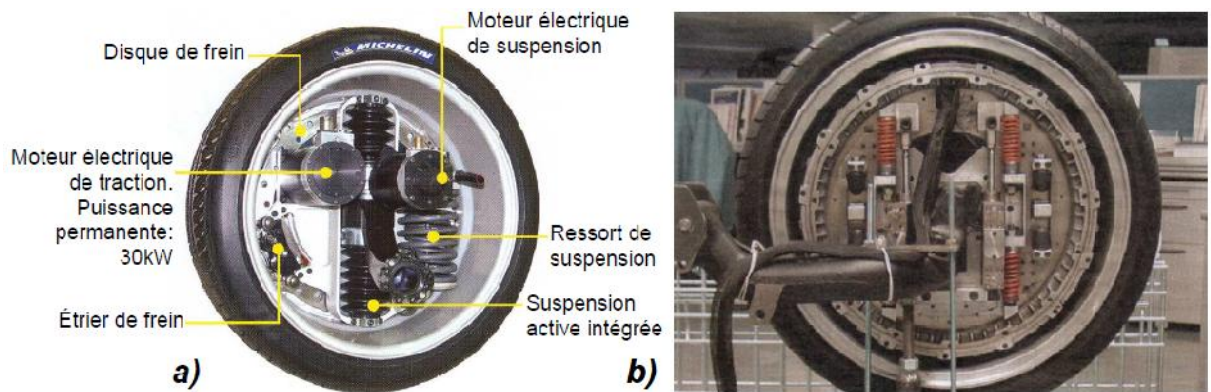


Figure 2.7 : Exemples de roue englobant un moteur-roue : a) Roue active de MICHELIN ;  
b) Roue motrice nouvelle génération BRIDGESTONE

La présence d'un réducteur à rapport fixe a permis à Michelin d'utiliser un moteur de 30 kW ayant un poids extrêmement faible de 5 kg. Cependant, le moteur a besoin d'un système de refroidissement (eau ou air). L'ensemble, avec pneu basse résistance au roulement 195/45 R 17 ou R 18, ne pèse pas plus de 32 kilos [26].

En ce qui concerne le moteur-roue sans réducteur, l'équipementier Bridgestone présente un nouveau concept d'entraînement : un moteur électrique intégré dans la roue et doté d'un système de suspension et d'amortissement. Bridgestone est parvenu à améliorer la sécurité et le confort en « suspendant » le moteur par quatre ressorts et deux amortisseurs et ainsi résoudre les problèmes de poids des parties tournantes nuisibles à la tenue de route.

#### 2.4.2. Le Bloc de Commande et de Contrôle

Le bloc de commande et de contrôle Contrôleur est le cerveau du système de propulsion son rôle est de capter les informations d'état du système (vitesse de rotation, courants, etc.) de les traiter et d'agir en conséquence pour la génération des signaux de commande, appliquées au moteur électrique afin de gérer au mieux la consommation d'énergie.

#### 2.4.3. Le Bloc de Puissance

Une autre vision sur les systèmes électroniques a émergé, cela est dû à l'évolution des semi-conducteurs. En effet, les convertisseurs de puissance permettent maintenant d'élargir le champ d'application des machines électriques. Un convertisseur de puissance est un dispositif de puissances qui assure la liaison entre la source batteries et la machine à commander en modulant l'énergie disponible pour le besoin [26].

## 2.5. Stockage de l'énergie

La batterie de véhicule électrique est un générateur électrochimique, son principe de fonctionnement est identique à celui des batteries de démarrage, de servitude, et d'éclairage que nous connaissons.

Toutefois, en raison de son aptitude à générer de très forts courants, pendant des durées importantes, il est très différent des autres batteries, par sa technologie de fabrication, sa gestion de charge et de décharge, un générateur électrochimique stocke de l'énergie sous forme chimique et la restitue sous forme électrique.

### 2.5.1. Les batteries

Les batteries sont des sources électrochimiques qui convertissent l'énergie électrique en énergie chimique pendant le chargement, et l'énergie chimique en énergie électrique au cours du déchargement. Les batteries peuvent être classées en batteries primaires ou secondaires.

Les batteries primaires (les piles) sont utilisées une seule fois parce que les réactions chimiques qui fournissent le courant électrique sont irréversibles. Les batteries secondaires (les accumulateurs), les seules qui nous intéressent dans ce mémoire, sont réutilisables. Dans ces batteries, les réactions chimiques qui fournissent le courant électrique sont réversibles [27].

Les batteries sont généralement composées de plusieurs cellules empilées ensemble, la tension d'une cellule élémentaire étant faible (de l'ordre au maximum de quelques volts). Une cellule est une unité complète qui possède toutes les propriétés électrochimiques. Fondamentalement, une cellule de batterie est constituée de trois éléments : deux électrodes (positive et négative) immergées dans un électrolyte.

Les batteries sont normalement spécifiées par une capacité exprimée en ampères-heures (Ah). Cette valeur est définie comme l'énergie délivrée lorsque la batterie passe d'un état de charge à un état où la tension à ses bornes chute brutalement, tension dite de "cut-off " (figure 2.8). Notons que la valeur de la capacité dépend du courant délivré (figure 2.9). On peut remarquer sur cette figure que la capacité est plus faible si le courant de décharge est important.

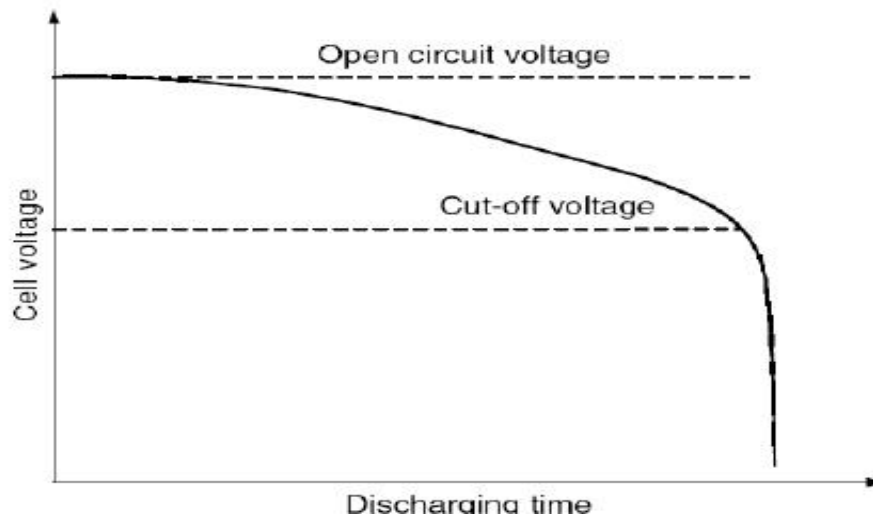


Figure 2.8 : Tension de « cut-off » d'une batterie.

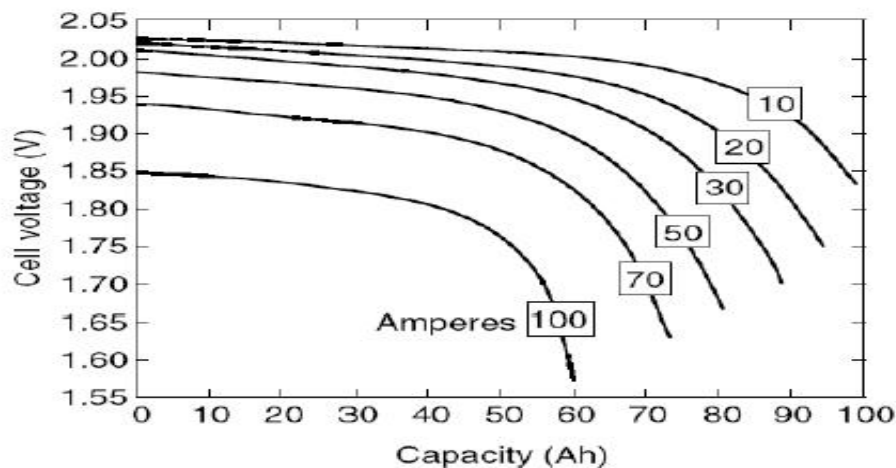


Figure 2.9 : Caractéristique de décharge d'une batterie au plomb.

Un autre paramètre important de la batterie est l'état de charge (state of charge, en anglais, SOC). Une batterie entièrement chargée a un SOC de 100% et une batterie complètement déchargée a un SOC de 0% [27].

Enfin, deux autres grandeurs permettent de comparer les batteries, l'énergie massique et la puissance massique. L'énergie massique est définie comme la capacité d'énergie par rapport au poids de la batterie (Wh/kg). L'énergie massique théorique est l'énergie maximale qui peut être produite par la masse totale des cellules réactives. De son côté, la puissance massique est définie comme la puissance maximale que peut produire la batterie sur une période courte par rapport au poids de batterie. Cette puissance massique est un paramètre important dans les applications embarquées comme les véhicules électriques et conduit les recherches sur la réduction du poids de la batterie et l'engouement actuel pour les batteries à base de lithium.

## 2.5.2. Différentes technologies des batteries

Les technologies de batteries sont variées et nous présentons dans les pages suivantes les familles les plus utilisées dans les systèmes électriques et hybrides à savoir celles basées sur le plomb, le lithium et le nickel.

Pour chacune de ces familles, nous donnons leur principe, les technologies utilisées et des éléments de modélisation et nous comparons leurs principales propriétés.

### 2.5.2.1. Accumulateur au Plomb

C'est en 1859 que Gaston Planté réalisa l'accumulateur au Plomb en plaçant des feuilles de plomb dans de l'acide sulfurique. Après 150 ans d'amélioration, cet accumulateur est loin d'être suranné et il continue de faire l'objet de travaux de recherche, C'est le moins cher des accumulateurs, c'est encore le plus vendu dans le monde et il est presque entièrement recyclable.

Principe :

Le principe de cet accumulateur est inchangé depuis Gaston Planté et on retrouve toujours dans un accumulateur actuel, les deux électrodes en plomb plongeant dans un électrolyte acide sulfurique (figure 2.10).

Cet accumulateur exploite une oxydoréduction du plomb, chacune des électrodes est constituée d'un élément apparaissant sous sa forme réduite et sous sa forme oxydée : une cathode oxydée en  $PbO_2$  et réduite en  $PbSO_4$  et une anode oxydée en  $PbSO_4$  et réduite en  $Pb$ .

Au cours de la décharge et la charge, on a les réactions suivantes :

<i>Décharge</i>	<i>Charge</i>
<b>À la anode (+):</b> $PbO_2 + 4H^+ + 2e^- \rightarrow Pb^{++} + 2H_2O$	<b>À la anode (+):</b> $Pb^{++} + 2H_2O \rightarrow PbO_2 + 4H^+ + 2e^-$
<b>À la cathode (-):</b> $Pb \rightarrow Pb^{++} + 2e^-$	<b>À la cathode (-):</b> $Pb^{++} + 2e^- \rightarrow Pb$
<b>Sulfatation des électrodes:</b> $2Pb^{++} + 2SO_4^{--} \rightarrow 2PbSO_4$	<b>Sulfatation des électrodes:</b> $2PbSO_4 \rightarrow 2Pb^{++} + 2SO_4^{--}$
$Pb + PbO_2 + 4H^+ + 2SO_4^{--} \begin{matrix} \xrightarrow{\text{Décharge}} \\ \xleftarrow{\text{Charge}} \end{matrix} 2H_2O + 2PbSO_4$	

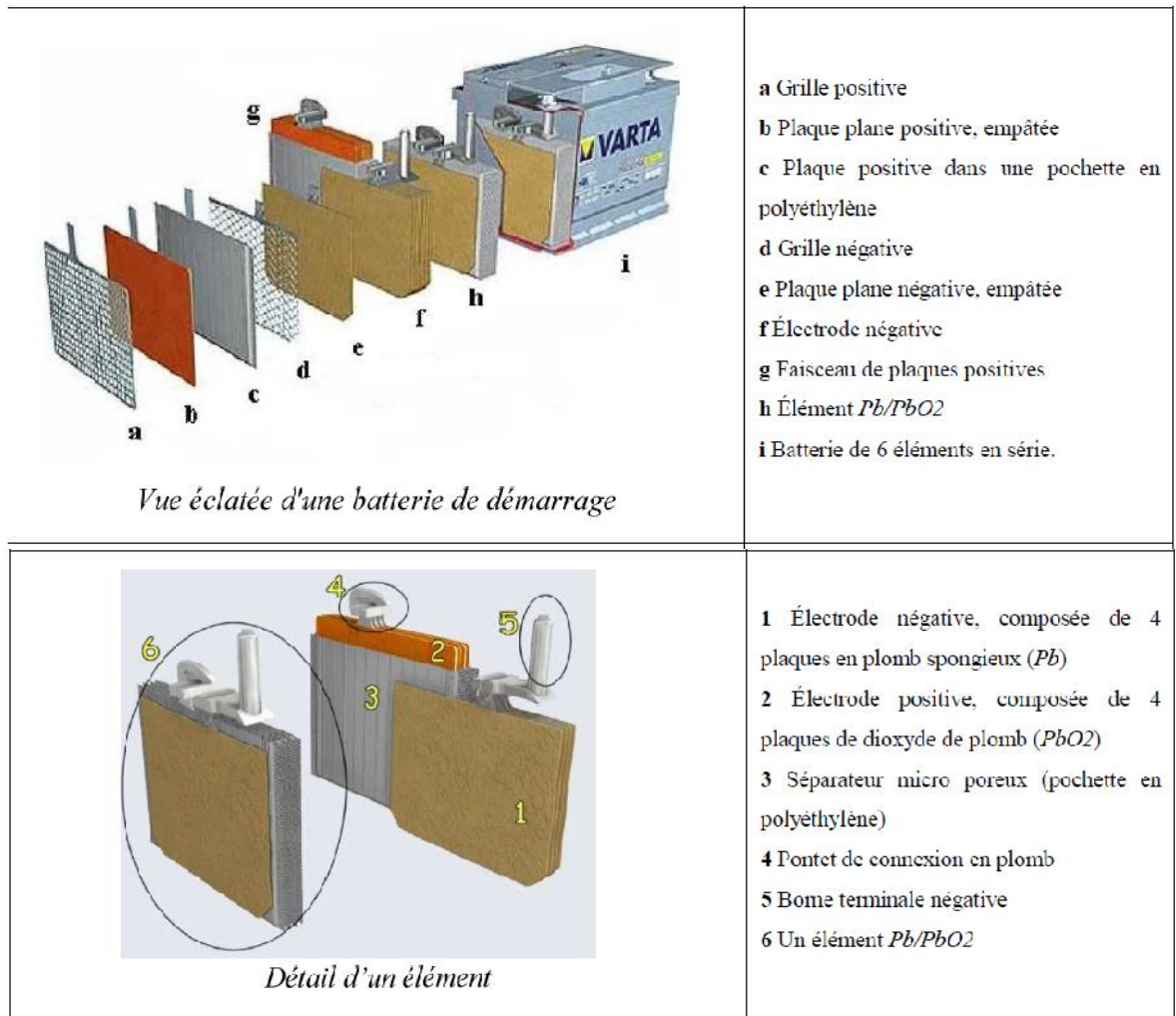


Figure 2.10 : Vue éclatée d'un accumulateur au Plomb et détail d'un élément.

Les accumulateurs au Plomb resteront les plus utilisés si ces résultats sont atteints rapidement et si la durée de charge de ces accumulateurs peut être réduite [28].

### 2.5.2.2. Batteries Lithium-Ion

Ces batteries font partie des nouveaux types de batteries apparus depuis une vingtaine d'année et qui se sont avérés fort prometteurs. Leur énergie et puissance massiques sont élevées par comparaison aux batteries au plomb, respectivement  $150 \text{ Wh.kg}^{-1}$  et  $300 \text{ W.kg}^{-1}$ . Le lithium est en effet le plus léger des métaux et possède un potentiel électrochimique élevé, ce qui en fait le métal le plus attractif pour constituer l'électrode négative d'un accumulateur.

L'électrolyte est constitué d'une solution organique ou d'un polymère solide. La grande légèreté de ce métal autorise l'obtention de densités énergétiques élevées et une densité de puissance importante. Aujourd'hui, cette technologie est considérée comme extrêmement prometteuse et fait l'objet de recherches intensives. Les problèmes de sécurité, liés à des risques d'inflammation des éléments, fréquemment évoqués sont en passe d'être résolus.

Principe :

Il existe deux types de batterie au lithium. Les batteries Lithium-Carbone ou Lithium-Ion et les batteries Lithium-Métal. Dans ces batteries c'est l'électrode négative qui diffère selon que l'on utilise une électrode de lithium métallique ou de carbone.

Le principe de la décharge représenté sur la figure 2.11 est légèrement différent à l'anode selon le type de batterie. Dans un cas, c'est le matériau lithium qui libère les électrons et les ions qui pour les premiers vont à la cathode par le circuit extérieur et pour les seconds à travers l'électrolyte. Dans l'autre cas, le matériau d'insertion libère les ions et les électrons.

Par contre, à la cathode, les réactions sont identiques. Lors de la décharge de la batterie, le lithium relâché par la cathode sous forme ionique  $Li^+$  migre à travers l'électrolyte conducteur ionique et vient s'intercaler dans le réseau cristallin du matériau actif de l'électrode positive.

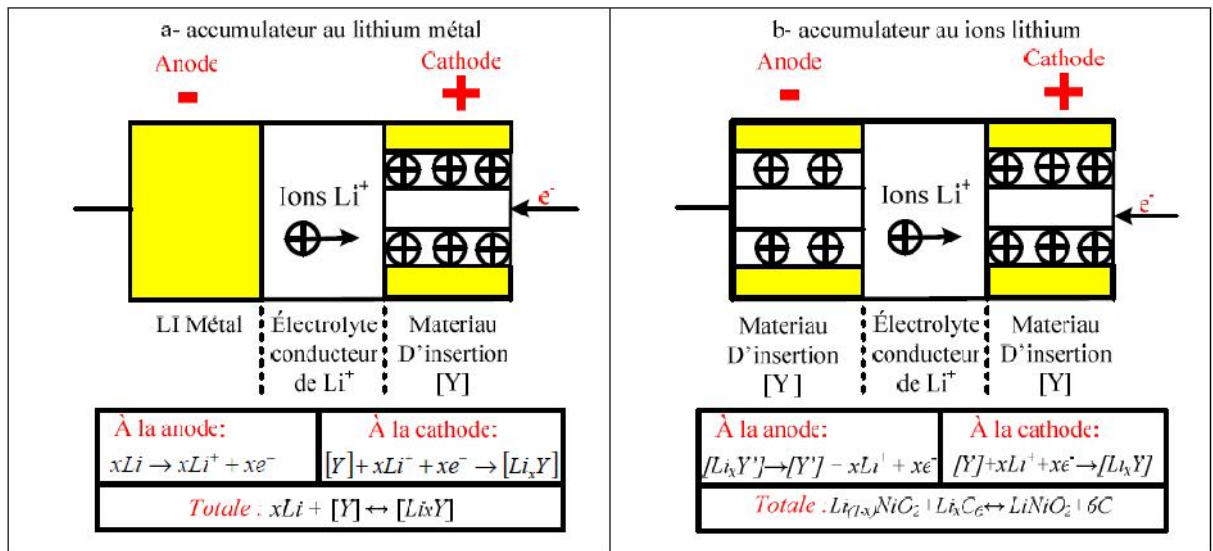


Figure 2.11 : Principe de fonctionnement des batteries au Lithium.

### 2.5.2.3. Batteries au Nickel

Il existe plusieurs types de batteries au Nickel Batteries Nickel Cadmium (Ni-Cd), Batteries Nickel-Hydrure métallique (Ni-MH), Batteries Nickel-Fer (Ni-Fe), Batteries Nickel-Zinc (Ni-Zn), avec chaque fois un type d'électrode différent, l'autre étant réalisée en nickel. L'électrolyte est constitué d'une base forte (soude ou potasse caustique, NaOH ou KOH). Les deux premiers, le Nickel-Cadmium et le Nickel-Hydrure métallique, étant actuellement les plus utilisés.

Tableau 2.5: caractéristiques des batteries

Batteries	Pb	Ni-Cd	Ni-Mh	Zebra	LiCoO <sup>2</sup>	Li-Po	LiFePO <sub>4</sub>	LPM
Date d'apparition	~1850	~1900	~1990	~1990	<2000	<2000	<2000	<2000
Énergie spécifique (Wh/kg)	40	50	80	120	150	190	120	110
Puissance en pointe (W/kg)	700	-	900	150	1500	250	800	-
Nombre de cycles	~500	1500	1000	1000	1200	2000	2000	1800
Coûts (€/kWh)	~200	~600	~1500	~500	~500	~1500	~1000	~1500
Avantages	Faible coût	Fiabilité	Cyclabilité (i.e. durée de vie)	Énergie spécifique, cyclabilité	Énergie et puissance spécifiques	Gain de place	Cyclabilité	Gain de place
Limites	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Forte toxicité du plomb<sup>1</sup>.</li> <li>• Faible énergie spécifique (i.e. faible autonomie).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Forte toxicité du cadmium<sup>2</sup>.</li> <li>• Faible énergie spécifique.</li> <li>• Effet mémoire.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Coût.</li> <li>• Recours à des terres rares (ex : lanthane).</li> <li>• Capacité d'autodécharge (30%).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Puissance limitée.</li> <li>• Forte auto-décharge (12 %/ jour).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Coût.</li> <li>• Nécessité d'un BMS<sup>3</sup> pour éviter les risques d'explosion.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Puissance limitée.</li> <li>• Coût.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Problème de températures pour la charge.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Coût.</li> <li>• Performances à froid.</li> </ul>

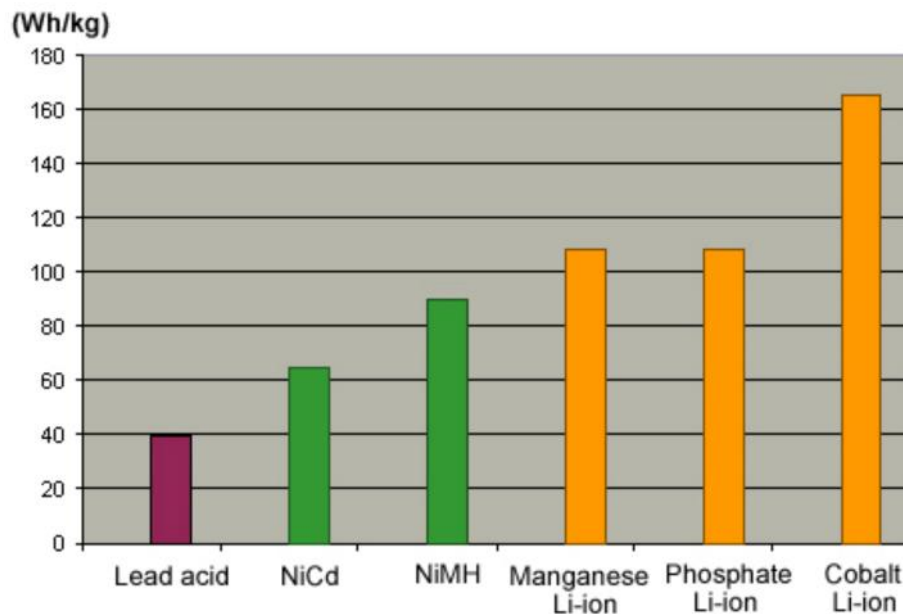


Figure 2.12 : Énergie massique stockable en fonction du type d'accumulateur

Les batteries actuellement existantes utilisent une multitude de composés. Les accumulateurs de première génération étaient au plomb. Sont ensuite apparues les batteries au nickel / cadmium, elles-mêmes suivies par tout un assortiment d'autres compositions aux caractéristiques propres. Cependant, malgré la diversité des technologies utilisées, aucune batterie n'est en mesure, à l'heure actuelle, de répondre à l'ensemble des conditions posées.

Les problèmes sont divers. Les composés peuvent s'avérer nocifs pour l'environnement (métaux lourds), rares (et donc chers) 4, nécessiter un entretien supplémentaire (électrolyse de l'eau de la batterie), poser des problèmes de décharge à l'arrêt ou encore de mémoire de charge (obligation de décharge complète de la batterie, sous peine de perte d'énergie massique). Néanmoins, le principal

problème de ces accumulateurs, quelle que soit la technique utilisée, reste qu'ils offrent à l'automobile qu'ils équipent une autonomie largement inférieure à celles des voitures classiques. A titre de comparaison, l'énergie massique d'une batterie au plomb est de 39 Wh/kg, 69 pour une batterie Nickel métal-hydrure (NiMH) et 125 pour une batterie au lithium. De son côté, l'essence possède une énergie massique de 12'500 Wh/kg, soit une quantité 180 fois supérieure à celle d'une batterie NiMH. En considérant un rendement des moteurs à combustion interne de 14 %, contre 61 % pour les moteurs électriques, le ratio demeure plus de 40 fois supérieure, en faveur du moteur à combustion interne [29].

Il existe plusieurs types de batteries sur le marché. Chacune a ses caractéristiques propres à sa chimie. Plusieurs chercheurs ont conclu que les batteries aux ions de lithium (Li-Ion) sont les mieux adaptées pour une utilisation dans les véhicules électriques et les charges à impulsions de courant. Ces batteries sont intéressantes au point de vue de l'efficacité, la densité de puissance, la masse, le volume, l'autodécharge et la durée de vie.

## 2.6. Véhicule solaire

Cette partie décrit les différents composants du véhicule solaire, la Figure 2.13 donne la structure générale d'un véhicule solaire, le panneau solaire est la source d'énergie, les batteries sont directement connectées sur le bus, et jouent plutôt le rôle de source de puissance, le moteur synchrone autopiloté à aimants permanents est alimenté par des courants rectangulaires 120° délivrés par un onduleur de tension.

## 2.7. Architecture des voitures solaires

Les véhicules solaires présentent très généralement l'architecture décrite par la Figure 2.13. C'est particulièrement celle du véhicule solaire, Cette architecture très générique est aussi celle des véhicules hybrides série, le générateur solaire tenant la place du groupe électrogène embarqué. À l'instar de nombreux systèmes photovoltaïques autonomes, un bus à courant continu interconnecte trois éléments principaux : le générateur PV embarqué, le stockage et le groupe motopropulseur lui-même associé à la dynamique du véhicule. La tension de ce bus est fixée par la batterie et dépend donc de son état de charge sauf si on intercale un convertisseur de liaison entre le bus et le stockage.



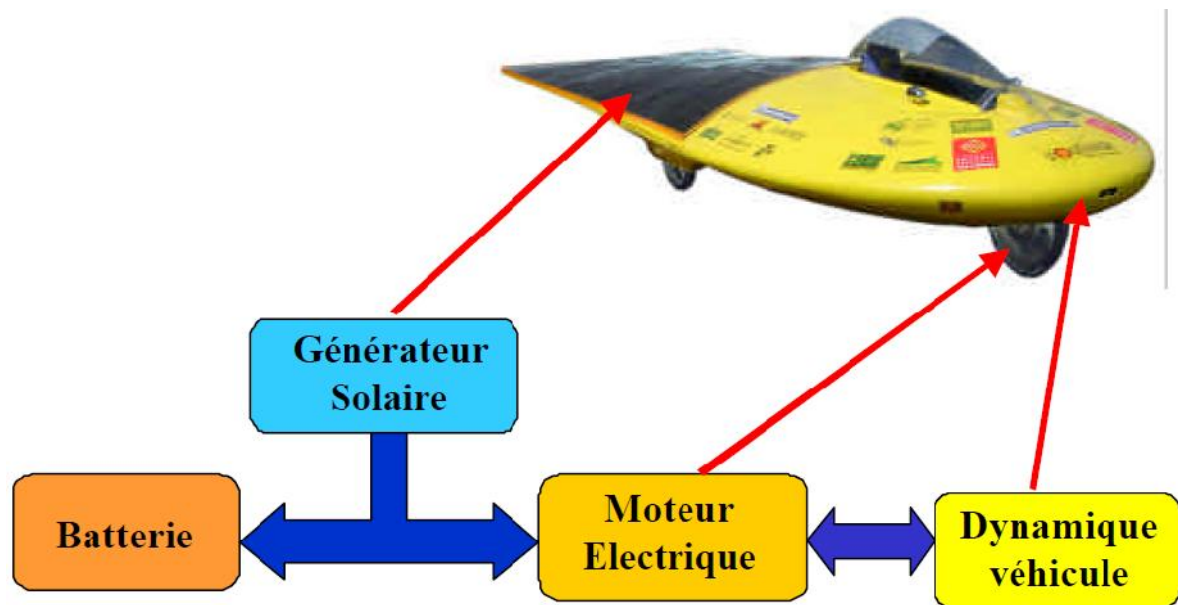


Figure 2.13 : Architecture générale du véhicule solaire.

### 2.8. Ingénierie du générateur PV embarqué

La surface totale du générateur est limitée à  $8 \text{ m}^2$  par le règlement, les cellules photovoltaïques collées sur la coque du véhicule doivent épouser fidèlement la forme non plane de la coque sans dégrader ses performances aérodynamiques, ce qui nécessite une encapsulation souple spéciale bien visible sur les photographies de la Figure 2.14. Mais ces courbures impliquent une exposition solaire non uniforme sur le générateur, ce qui impose de le partager en sections indépendantes afin de réduire les déséquilibres et de maximiser le rendement global, Chacune des sections est reliée directement et indépendamment au bus commun par un convertisseur MPPT (Maximum Power Point Tracking) pour assurer son fonctionnement optimal, la détermination de cette partition doit prendre en compte de nombreuses contraintes structurelles et de fonctionnement telles que formes et surfaces disponibles, tailles et type des cellules, tensions minimales et maximales des sections avec prise en compte de la température et de la position du soleil. Seul un modèle global permet de trancher, le générateur est décrit par la figure 31 : les 760 cellules au silicium de  $10 \times 10 \text{ cm}^2$ , de rendement crête 16,5 % sont regroupées en modules de 35 cellules au centre et 30 cellules sur les côtés. Il est divisé en quatre zones : centrale, arrière et latérales [30].

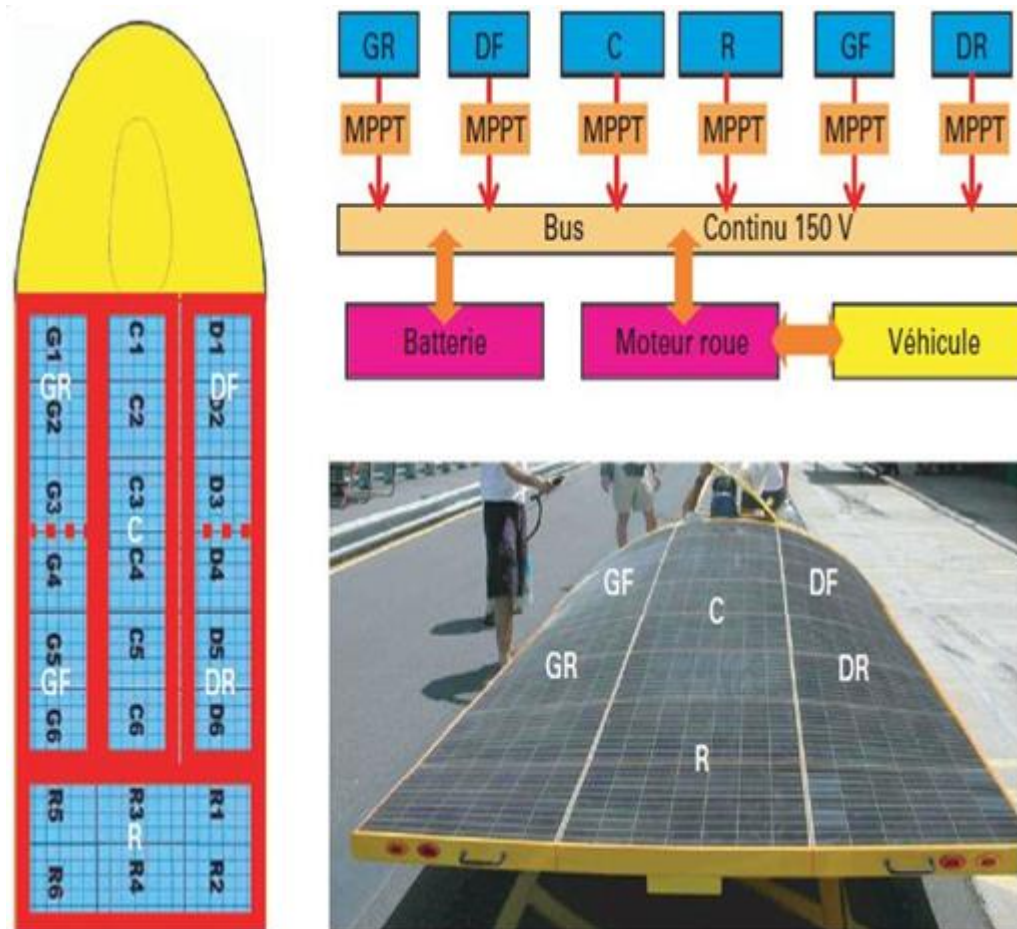


Figure 2.14 : Générateur photovoltaïque partitionné en 6 sections et architecture énergétique avec indication des flux d'énergie.

La simulation globale du système sur une journée en considérant un trajet orienté Nord - Sud par temps clair montre que l'on recueille 7,1 kWh avec 4 sections contre 7,5 kWh avec 6 sections, ce qui privilégie ce dernier choix conduisant à l'ingénierie présentée sur la figure 31. Les sections centrale et arrière comportent six modules en série et les sections latérales seulement trois modules de 30 cellules. La puissance crête du générateur est de 1 200 Wc, ce générateur a délivré une puissance maximale de 1 300 W dans le désert australien et de 1 400 W dans les Pyrénées en conditions plus fraîches ! [31]

## 2.9. La modélisation du véhicule

Ce chapitre décrit les différentes parties du véhicule solaire. La Figure 2.15 donne la structure générale d'un véhicule solaire. Le panneau solaire est la source d'énergie, elle est reliée au bus continu par un convertisseur de liaison muni d'une stratégie de commande MPPT (Maximum Power Point Tracking). Les batteries sont directement connectées sur le bus continu, et jouent plutôt le rôle de source de puissance. Le moteur synchrone autopiloté à aimants permanents est alimenté par des courants rectangulaires 120° délivrés par un onduleur de tension à modulation de largeur d'impulsions contrôlé en courant suivant différentes stratégies de commande adaptées à la vitesse.

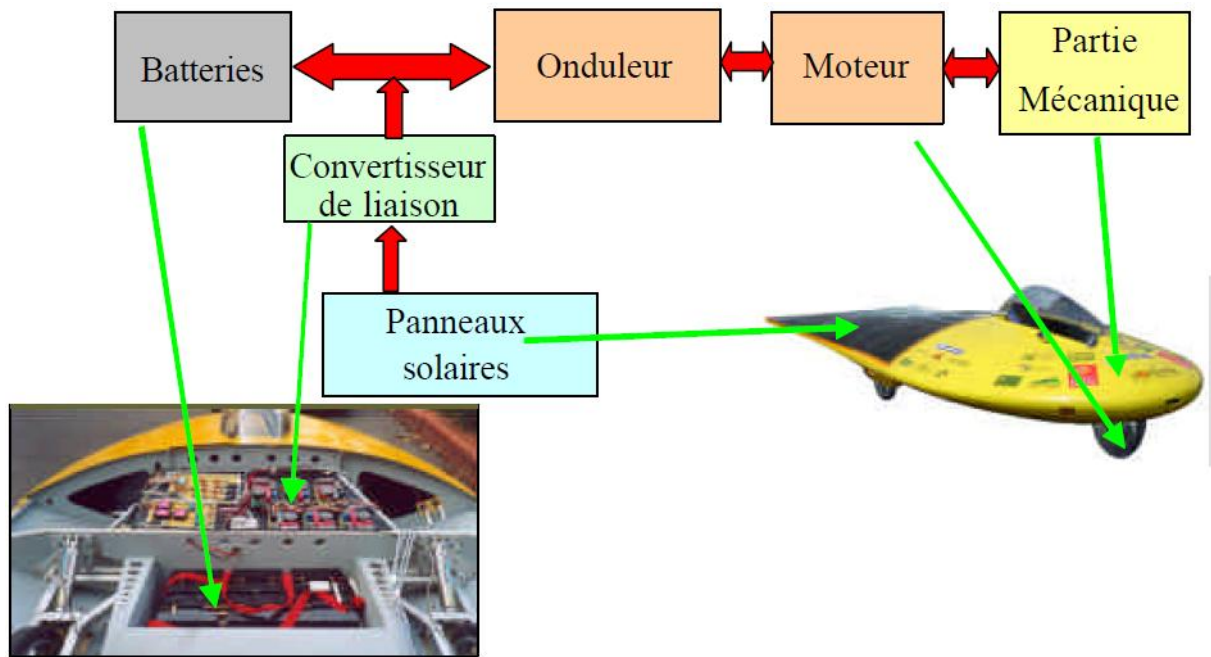


Figure 2.15 : Structure générale du véhicule solaire

## 2.10. Conclusion

Nous avons vu dans ce chapitre que les VE semblent être la réponse moderne aux problèmes d'émissions de gaz à effet de serre et de l'épuisement des ressources fossiles. De plus, ils possèdent de nombreux autres avantages, ils sont silencieux, sans pollution environnementale locale, sans consommation à l'arrêt et possèdent un bon rendement énergétique global. Cependant, le problème de stockage d'énergie embarquée fait que les VE ont de faibles performances.

Ainsi, ses faibles performances engendrent une acceptation faible du marché, donc une production en petite série imposant un prix de production élevé, diminuant encore l'acceptation du marché.

Les voitures solaires ont été toujours un rêve depuis l'invention des cellules photovoltaïques. On voit ainsi que la puissance qui délivrer par les cellules photovoltaïques et la capacité des batteries sont les principales inconvénients de la voiture solaire.

## Chapitre 3

### Les véhicules hybrides

#### 3.1. Introduction

Actuellement, le plus grand consommateur d'énergie fossile est le secteur du transport. Ce secteur combine plusieurs difficultés : croissance forte, totale dépendance à l'égard du pétrole et caractère diffus des consommations d'énergie et des émissions.

Pour cela, des solutions ont été investiguées ; les véhicules électriques hybrides (VEH), Ils représentent un compromis entre le véhicule conventionnel à moteur thermique et le VE. Leur but principal est de diminuer la pollution des véhicules conventionnels ou inversement d'augmenter l'autonomie du VE. Ils peuvent être vus comme une solution intermédiaire, en attendant que les problèmes d'autonomie et d'infrastructure des VE soient résolus.

#### 3.2. Historique

Contrairement à ce que l'on pourrait penser, le Véhicule Électrique Hybride (VEH) est presque aussi vieux que l'automobile à moteur thermique. Des prototypes furent créés non pour abaisser consommation et pollution, mais dans l'optique d'aider le moteur thermique à fournir des performances correctes ou pour augmenter l'autonomie du Véhicule Électrique (VE). Au début du siècle dernier, la technologie électrique était bien plus en avance que celle de son homologue thermique.

Les premiers VEH montrés au grand public sont les véhicules développés par les établissements Pieper de Liège (Belgique) et par la compagnie de voitures électriques de Vendovelli et Priestly (France) en 1899 au salon de Paris, soit déjà plus d'un siècle. En plus d'être les précurseurs des VEH, ils sont également les premiers à avoir mis en place un démarreur électrique sur une automobile. Malheureusement les VEH qui étaient difficile à contrôler, ont été très rapidement concurrencés par les moteurs à allumage commandé améliorés considérablement pendant la première guerre mondiale.

Les progrès en électronique dans le milieu des années 1960 ont poussés les chercheurs à reconsidérer l'utilisation des VEH. Mais par manque de pratique et de recul sur cette technologie, les chercheurs ont préférés s'orienter vers les VE avec batteries et machines électriques modernes [32].

Vers les années 1990, lorsqu'il est clair pour les constructeurs que le VE ne verra jamais son objectif d'atteindre une densité volumique d'énergie comparable au véhicule traditionnel, le VEH est remis à l'ordre du jour. Tous les constructeurs (ou presque) se mettent alors en tête de construire

des prototypes permettant de réduire consommation et pollution. On peut citer Dodge aux U.S.A. avec l'Intrepid ESX 1, 2 et 3 ou encore Renault en France avec la Next. Toutefois les constructeurs se heurtent à un problème majeur : comment convaincre les consommateurs d'acheter un véhicule ayant les mêmes performances, pour un prix parfois double d'un véhicule traditionnel ?

Un seul pays semble néanmoins avoir un engouement certain pour tout type de véhicule nouveau, le Japon. Toyota a en effet jugé dès 1985 que le futur de l'automobile passerait par l'électronique et l'électricité embarquée avec un VEH. En 1989, il ouvre un centre de recherche dédié. Après de longues années d'études, la Prius est présentée et commercialisée au public japonais en 1997. Aujourd'hui elle se vend internationalement [33].

### 3.3. Définition

La condition nécessaire pour qu'un véhicule soit qualifié d'hybride est d'avoir deux sources de natures différentes. Cette définition n'est pas appropriée car un véhicule traditionnel peut être assimilé à un VEH (batterie et réservoir de carburant).

La définition qui semble la plus appropriée est celle exposée par l'International Energy Agency (IEA) dans un rapport technique : « Un véhicule hybride a un groupe motopropulseur dans lequel l'énergie peut être transmise par au moins deux dispositifs de conversion d'énergie différents (exemple du moteur à combustion interne, de la turbine à gaz, du moteur Stirling, de la machine électrique, du moteur hydraulique, de la pile à combustible...) tirant l'énergie d'au moins deux dispositifs de stockage d'énergie différents (exemple du réservoir à carburant, de la batterie, du volant d'inertie, du supercondensateur, du réservoir de pression...). Au moins un des flux, le long duquel l'énergie peut circuler d'un dispositif de stockage d'énergie aux roues, est réversible, tandis qu'au moins un flux est irréversible. Dans un véhicule électrique hybride le dispositif de stockage d'énergie réversible fournit l'énergie électrique ».

Cette définition a néanmoins un point faible. Elle exclue les solutions intermédiaires où un dispositif de conversion d'énergie ne participe pas à la traction du véhicule, avec toutefois la possibilité d'avoir d'autres fonctionnalités contribuant à une réduction de la consommation.

### 3.4. Classifications des véhicules hybrides

Les véhicules hybrides peuvent être classés selon plusieurs critères : leur architecture, leur taux d'hybridation, leur type de recharge interne ou externe (plug-in) de l'élément de stockage d'énergie, le dimensionnement des deux sources d'énergie, etc. Nous aborderons ici la classification selon l'architecture et le taux d'hybridation.

### 3.4.1. Architecture

Plusieurs combinaisons des sources d'énergie des véhicules hybrides sont possibles. Elles dépendent du type de véhicule et de son usage (cycle de conduite). Les principales Configurations des véhicules hybrides électriques les plus utilisées sont les suivantes:

#### 3.4.1.1. Les véhicules Hybride série

Le système hybride électrique série est le plus simple. Il s'agit, en fait, d'un moteur électrique assisté par un moteur thermique ou une pile à combustible pour améliorer l'autonomie du véhicule. La puissance mécanique délivrée par le moteur thermique est transformée en électricité via le générateur. Cette électricité peut servir à charger la batterie via le convertisseur ou à propulser directement le véhicule via le moteur électrique jouant à la fois le rôle de moteur et de transmission mécanique. L'avantage principal de cette configuration est lié au fait que le moteur thermique peut être utilisé à une vitesse constante dans sa plage de meilleur rendement. De plus, l'absence d'embrayage dans tout le lien mécanique lui confère une bonne flexibilité. Par contre, bien que sa chaîne de traction soit la plus simple, il a besoin de trois dispositifs de propulsion: deux moteurs (électrique et thermique) et un générateur. La double transformation d'énergie (mécanique-électrique-mécanique) pénalise le rendement global du système. Un autre désavantage est que les trois composants doivent être dimensionnés sur la puissance maximale pour les cycles les plus exigeants. Mais, pour de petits trajets, l'ensemble générateur/moteur électrique peut être dimensionné sur une puissance moyenne plus faible. Il est encore d'usage de définir le taux d'hybridation série comme étant le ratio entre la puissance du groupe électrogène et celle du moteur électrique de traction:

$$\tau_{série} = \frac{P_{groupe}}{P_{mot\ elec}}$$

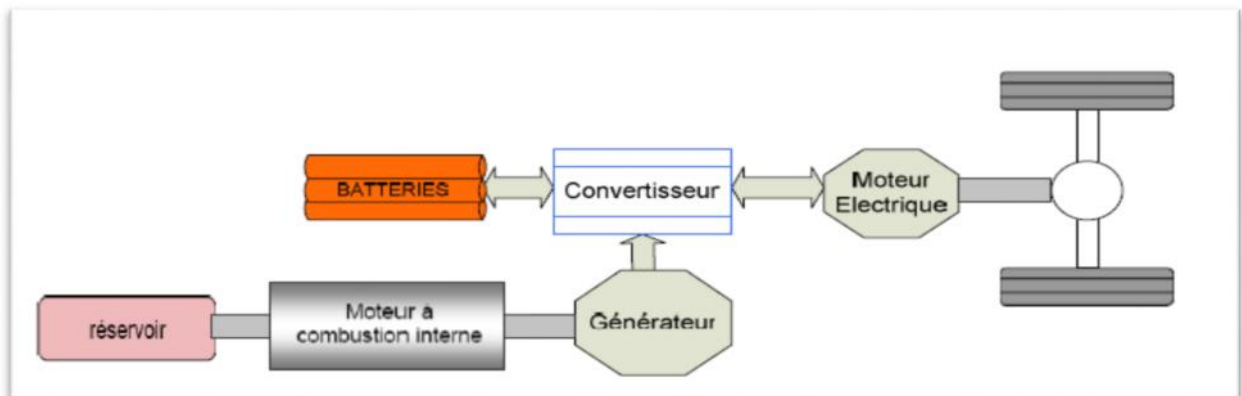


Figure 3.1: Véhicule Hybride Série

Elue voiture de l'année 2012, la Chevrolet Volt est une voiture hybride série. Son moteur électrique assure une puissance de 111 kW (151ch). La consommation moyenne dans le cycle mixte est de 1.2 l/100 km, ce qui correspond à des émissions de CO<sub>2</sub> de moins de 27 g/km. Nous remarquons que par rapport à Q5 hybrid quattro d'Audi, la Chevrolet Volt réalise de meilleures performances énergétiques et environnementales.

### 3.4.1.2. Les véhicules Hybride parallèle

A la différence du système hybride série, l'hybride parallèle permet aux deux moteurs (thermique et électrique) de fournir en parallèle la puissance de propulsion au train roulant.

Les deux moteurs sont généralement couplés à l'arbre de transmission par l'intermédiaire de deux embrayages. La puissance propulsive est alors fournie soit par le moteur thermique, soit par le moteur électrique ou par les deux à la fois. Conceptuellement, il s'agit d'un moteur thermique aidé par un moteur électrique pour diminuer la consommation et l'émission des polluants. La charge de la batterie est assurée par le moteur thermique quand la puissance fournie est supérieure à celle requise pour la propulsion du véhicule. Le moteur électrique peut aussi être utilisé comme générateur pour charger la batterie par le freinage récupératif.

Un autre avantage est que de petits moteurs peuvent être utilisés tout en gardant les mêmes performances. On définit le taux d'hybridation parallèle par le ratio entre la puissance du moteur électrique et la somme des deux puissances du moteur électrique et du moteur thermique:

$$\tau_{\text{parallèle}} = \frac{P_{\text{mot.élec.}}}{P_{\text{mot.élec.}} + P_{\text{mot.therm.}}}$$

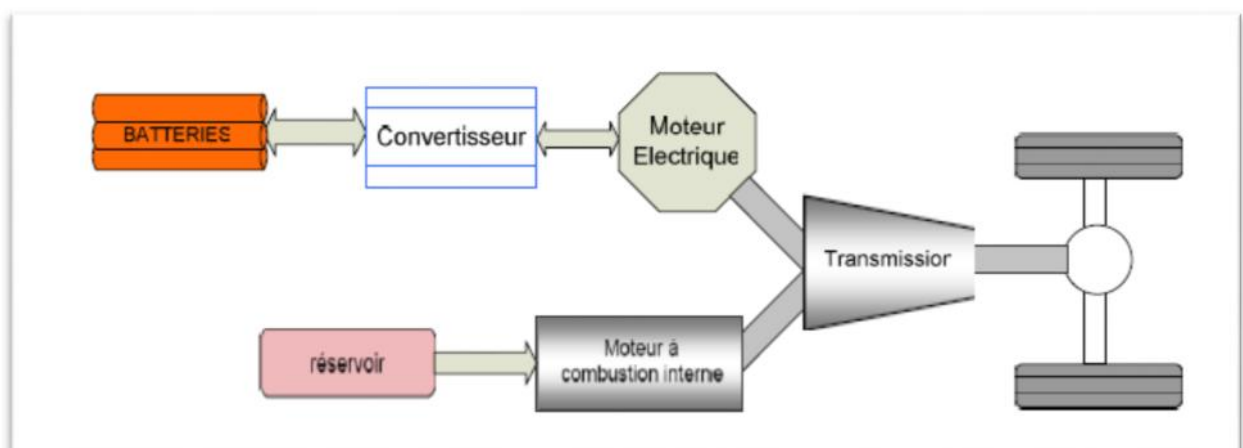


Figure 3.2: Véhicule Hybride Parallèle

Cette architecture permet de limiter le nombre de composants supplémentaires à installer. En contrepartie, le système est complexe mécaniquement puisque plusieurs composants sont liés aux roues.

Le Q5 hybride quattro d'Audi illustre cette technologie. Son moteur à essence 2.0 TFSI et son moteur électrique assurent une puissance de 188kW (245ch) et un couple de 480Nm.

La consommation moyenne dans le cycle mixte est de 6.9 l/100 km, ce qui correspond à des émissions de CO<sub>2</sub> de 159 g/km.

### 3.4.1.3. Les véhicules Hybride doux (mild hybrid)

Cette configuration mérite une attention particulière, car elle s'avère être la plus prometteuse dans un avenir proche pour le marché européen et attire l'attention de beaucoup de constructeurs. La configuration particulière de l'hybride doux est bâtie sur l'hybride parallèle avec un seul arbre. L'embrayage numéro 1 sert à déconnecter le moteur thermique de la transmission quand le véhicule roule en mode électrique pur (uniquement pour les hybrides complets).

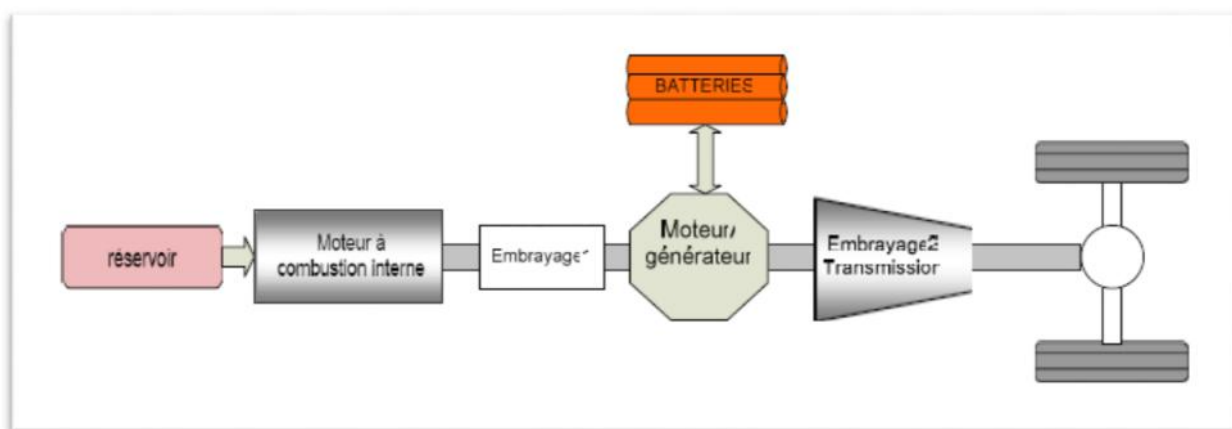


Figure 3.3 : Hybride parallèle avec un seul arbre

Le moteur électrique peut être couplé au moteur thermique soit par une transmission par courroie, soit par une boîte mécanique ou alors le moteur électrique peut être directement intégré au moteur thermique. Dans ce dernier cas, on fait usage d'un Alternateur-Démarrateur Intégré avec Amortissement (ISG), couplé mécaniquement au moteur à combustion interne. L'ISG est un électromoteur d'une puissance de 5 à 10 kW. Il remplace le volant d'inertie sur le moteur et fait office de moteur de démarrage pour la mise en marche du moteur thermique et comme générateur (ou alternateur) lors du fonctionnement normal. De plus, l'ISG peut assister le moteur à combustion interne en cas de fortes charges. Les systèmes ISG permettent de:

- Couper le moteur à combustion interne à l'arrêt du véhicule et le redémarrer rapidement (fonction stop and Start)
- Réduire au minimum le moteur à combustion interne (une partie du pic de puissance peut être livrée par l'ISG): c'est le downsizing. Cela permet aussi d'augmenter le rendement global du moteur à combustion interne.
- Récupérer, via l'ISG, une partie de l'énergie de freinage (même faible) pour recharger les batteries.



Cette technologie peut faire baisser la consommation de carburant de l'ordre de 15 à 20 %. Les hybrides avec Assistance du Moteur Intégrée (IMA) sont similaires aux Alterno- Démarreurs Intégrés, mais ils possèdent un moteur électrique plus important (jusqu'à 25kW) qui peut être utilisé pour mouvoir effectivement le véhicule. L'intégration du moteur électrique sur le moteur thermique rend le groupe motopropulseur plus compact et permet d'utiliser la transmission traditionnelle. Ce système permet des gains intéressants en termes de consommation et d'émissions de polluants avec un coût moins élevé comparativement à celui d'un hybride complet. Le principal désavantage est que la vitesse du moteur électrique doit toujours être la même que celle du moteur thermique. Ce qui réduit fortement la flexibilité du système [34].

#### 3.4.1.4. Autres configurations

Suite à de nouvelles combinaisons entre les systèmes série et parallèle, il est apparu, il y a quelques temps, une troisième catégorie: les véhicules hybrides électriques (VHE) série parallèle. Depuis l'année 2000 on parlait déjà d'une quatrième catégorie: VHE parallèles complexes. L'hybride série-parallèle est la combinaison des deux architectures précédentes avec un lien mécanique additionnel comparable au système parallèle et un générateur additionnel comparable au système série. Ce système regroupe tous les avantages liés aux deux systèmes séries et parallèles. Mais les systèmes hybrides série-parallèle et hybrides complexes sont des systèmes relativement compliqués et coûteux. Cependant, avec les avancées en technologie de commande et de fabrication, certains constructeurs préfèrent ces systèmes. La Prius II est un exemple d'hybride complexe avec une transmission souple. La liste n'est pas exhaustive, plusieurs combinaisons, aboutissant à diverses configurations sont encore possibles.

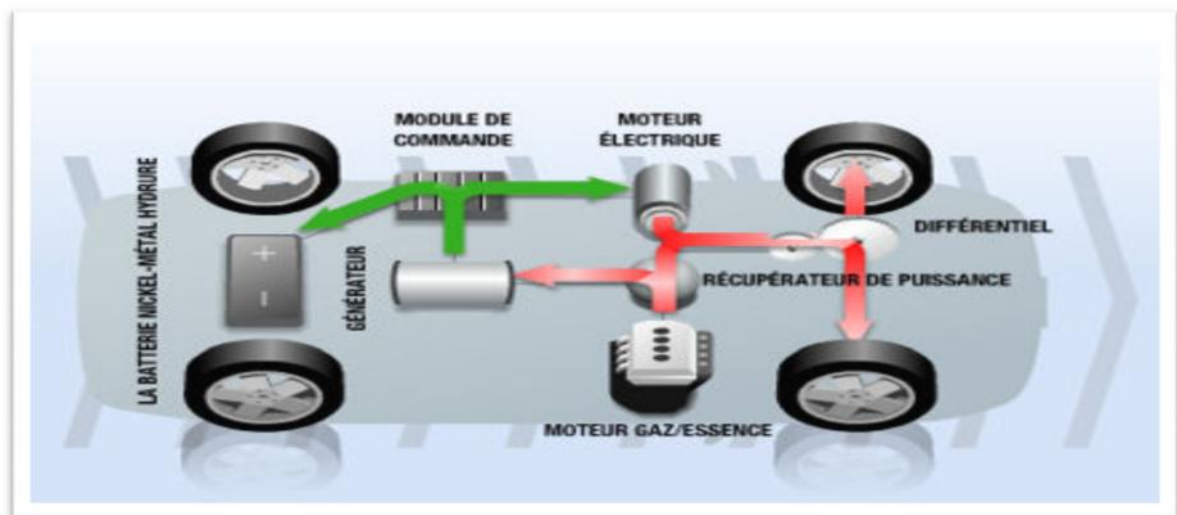


Figure 3.4 : Véhicule Hybride complexe: La Prius II

### 3.5. La source primaire

#### 3.5.1. Moteur à combustion interne

Le fonctionnement d'un moteur thermique traditionnel reste un domaine complexe et réservé à un monde professionnel et spécialisé, par contre, nous pouvons donner quelques idées sur le principe global, qui nous permettra de mieux appréhender et de découvrir la technologie hybride.

Le moteur thermique (ou moteur à explosion) permet de transformer une énergie thermique en énergie mécanique qui dans un premier temps sera linéaire (bielle) puis rotative (vilebrequin).

Le principe de fonctionnement d'un moteur quatre temps (mélange air essence, pour info deux temps air essence huile) se décompose comme suit :

- compression élevée du mélange air essence par le piston
- étincelle provoquée par la bougie, qui permet de faire exploser le gaz compressé contenu dans la chambre à combustion repoussant le piston.
- Ainsi le vilebrequin est mis en mouvement
- Ce dernier va entraîner un système complexe qui mettra les roues en mouvement.

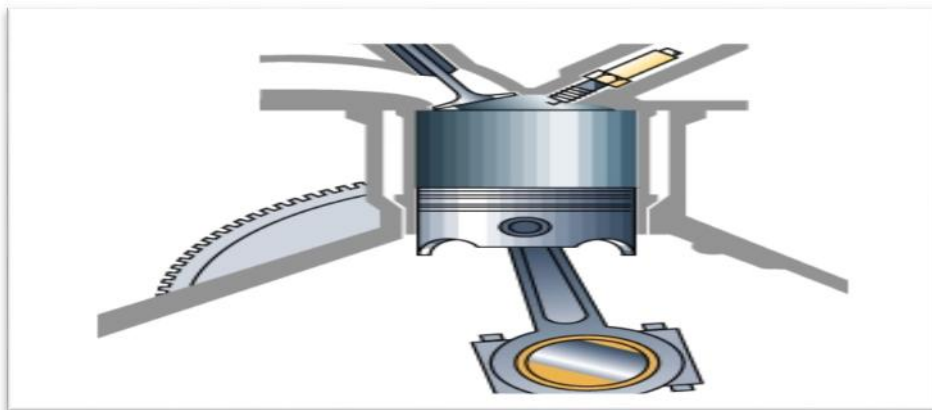


Figure 3.5 : un cylindre de moteur à explosion 4 temps.

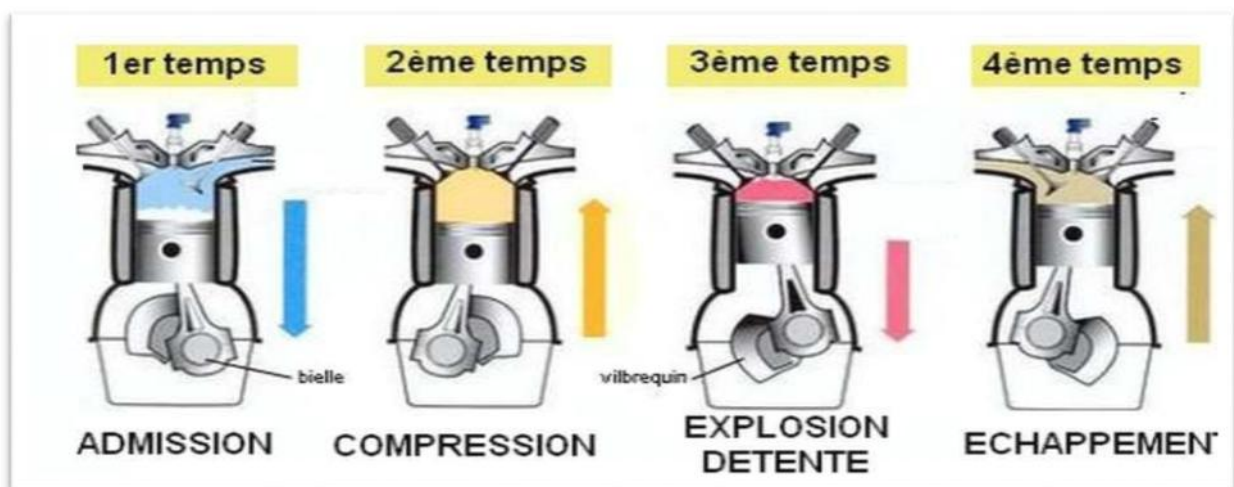


Figure 3.6 : fonctionnement d'un moteur à 4 temps

1<sup>er</sup> temps :

- Ouverture soupape d'admission.
- Descente du piston.
- Aspiration du mélange air essence par le piston.

2<sup>ème</sup> temps :

- Fermeture des soupapes d'admission et d'échappement.
- Remontée du piston.
- Compression du mélange air essence par le piston.

3<sup>ème</sup> temps :

- La bougie émet une étincelle.
- Explosion du mélange.
- La pression fait redescendre le piston.

4<sup>ème</sup> temps :

- Ouverture de la soupape d'échappement.
- Le piston remonte
- Evacuation des gaz brûlés vers le pot d'échappement.

Les récents développements technologiques aussi bien pour le moteur à essence que pour le moteur diesel, rendent ces deux moteurs plus attractifs pour les véhicules hybrides électriques et ceci pour trois raisons. La première, c'est la grande densité énergétique des carburants d'origine pétrolière qui confère une grande autonomie au véhicule avec quelques dizaines de litres. La deuxième raison est liée au fait que les processus de production et de distribution des carburants pétroliers sont totalement maîtrisés et les infrastructures nécessaires à leur diffusion sont largement établies depuis longtemps. Enfin, la troisième raison est liée aux améliorations successives des moteurs à combustion interne que ce soit au niveau des systèmes de dépollution (catalyseurs trois voies ou 4 voies, filtres à particules, etc.) ou au niveau de l'optimisation de la combustion (injection directe et suralimentation, contrôle électronique et des valves de timing, etc.). L'optimisation de la combustion et la réduction de la taille du moteur (downsizing) améliorent fortement le rendement. Le moteur diesel a un grand rendement et se prête mieux au downsizing par rapport au moteur à essence. Il constitue un premier choix pour tout type de véhicule hybride. Evolution: construction des moteurs à combustion interne de petite cylindrée spécialement adaptés au fonctionnement des hybrides

(intermittent) [35].

### 3.6. Le moteur électrique

Dans beaucoup de cas, les machines électriques (moteurs et alternateurs) utilisés dans les véhicules hybrides électriques ne diffèrent pas conceptuellement des moteurs électriques classiques utilisés dans d'autres applications. Selon les performances recherchées, les moteurs électriques qui équipent les voitures peuvent être des moteurs à courant continu (shunt ou série) ou des moteurs à courant alternatif asynchrone (monophasés ou triphasés) ou synchrones monophasés. Le système de commande électronique entièrement analogique utilisé jadis a fortement évolué avec l'électronique de puissance et la commande digitale, ce qui permet de prendre en compte beaucoup de paramètres lors du fonctionnement et de minimiser la consommation d'énergie. Chaque constructeur possède ses propres algorithmes de commande. Les moteurs électriques de traction doivent être caractérisés par:

- un couple élevé à basse vitesse, ce qui permet aux véhicules électriques de s'insérer sans difficultés dans la circulation
- des puissances massique et volumique les plus élevées possibles
- une possibilité de récupération d'énergie pendant le freinage
- Une stratégie de pilotage qui optimise continuellement la consommation d'énergie.

La récupération d'énergie au freinage est possible grâce à la propriété des moteurs électriques de fonctionner de manière réversible soit en moteur, soit en générateur. La Table (3.1) évalue de façon chiffrée et sur base de six critères, les différentes technologies de moteurs électriques utilisés dans les véhicules électriques et hybrides. Les moteurs asynchrones sont avantageux quant à la fiabilité, la robustesse et surtout le coût. Ils sont peu coûteux, car leur construction est simple et ils ne nécessitent pas beaucoup d'entretien. Ils sont par contre plus lourds et de rendement inférieur par rapport au moteur asynchrone à aimants permanents mais ils restent concurrentiels en raison de leur coût réduit.

Tableau 3.1 : Comparatif des moteurs électriques

	Moteur DC	Moteur asynchrone	Moteur brushless	Moteur SR	Moteur PM hybride
Densité de puissance	2,5	3,5	5	3,5	4
Efficacité	2,5	3,5	5	3,5	5
Contrôlabilité	5	4	4	3	4
Fiabilité	5	4	4	3	4
Maturité	5	5	4	4	3
Coût	4	5	3	4	3
<b>Total</b>	<b>22</b>	<b>26</b>	<b>25</b>	<b>23</b>	<b>23</b>

Les innovations en matière de conception des moteurs électriques sont bien remarquables dans la configuration hybride parallèle qui est la plus utilisée. Par exemple la Honda Insight est équipée d'une machine électrique particulièrement performante. C'est un moteur/générateur synchrone, à aimants permanents, ultrafin (60 mm) de 41 cm de diamètre. Il est positionné sur l'arbre moteur à la place du volant d'inertie et joue en plus le rôle de ce dernier [36].



Figure 3.7 : Machine électrique de la Honda Insight

Mais tous les véhicules n'utilisent pas évidemment le même type de moteur et de montage. Dans certains cas, le moteur électrique est connecté sur l'arbre moteur via une courroie ou directement sur la transmission via une boîte de vitesse basée sur un réducteur épicycloïdal comme c'est le cas chez la Toyota Prius.

### 3.7. Stockage de l'énergie électrique

Les batteries constituent un tampon énergétique pour les véhicules hybrides électriques. Elles servent à stocker l'énergie électrique quand le moteur thermique travaille à haut rendement et pendant le freinage récupératif. Cette énergie sera restituée par la suite pour la propulsion du véhicule. Les caractéristiques principales des batteries utilisées dans les véhicules électriques et hybrides électriques sont:

- L'énergie spécifique (Wh/kg ou Wh/l): quantité totale d'énergie qu'une batterie peut contenir par unité de masse ou de volume à une vitesse de décharge déterminée. Ce paramètre est lié à l'autonomie du véhicule.

- La puissance spécifique (W/kg ou W/l): puissance maximale qu'une batterie peut développer par unité de poids ou de volume à un taux de décharge bien déterminé. Ce paramètre est lié à l'accélération et à la vitesse maximale du véhicule et à la capacité de freinage récupératif.

Les deux caractéristiques sont dépendantes et sont généralement antagonistes. Pour un type de batterie donné, le choix d'une grande puissance spécifique entraîne une énergie spécifique minimale et vice versa. On préfère l'énergie spécifique pour les véhicules électriques et la puissance spécifique pour les hybrides.

- Le rendement de charge/décharge (%): ratio entre l'énergie récupérée en sortie (décharge) sur l'énergie nécessaire à la recharge suivante. Le rendement dépend de l'intensité du courant et donc des puissances lors de ces opérations. Les pertes sont dues à l'effet joule et aux réactions électrochimiques internes à la batterie.

- La profondeur de décharge (%): seuil en deçà duquel la batterie subit des dommages irréversibles.

- La durée de vie (nombre de cycles): période pendant laquelle la batterie peut fonctionner en conservant des performances proches de ses performances initiales [37].

Il existe d'autres caractéristiques non négligeables telles que le coût, la nocivité des composants, l'autodécharge et la température de fonctionnement. Les batteries utilisées dans les véhicules électriques et hybrides sont très variées et sont sélectionnées suivant le paramètre privilégié pour un usage donné: accumulateurs acide-plomb, Nickel-Cadmium, Nickel-Métal-Hydrures, les accumulateurs au Lithium (Lithium-ion, Lithium-polymère) et la batterie ZEBRA (NaNiCl: Sodium-Nickel-Chloride).

La Table III.2 reprend les versions les plus avancées, mais ne sert qu'à titre indicatif puisqu'il peut perdre rapidement sa validité suite au développement continu des batteries.

Tableau 3.2 : Comparaison des performances des versions avancées des différents types de batteries.

Batteries	Pb Acide	Ni-Cd	Ni-MH	Li-Ions	NaNiCl
Energie spécifique (Wh/kg)	30-40	40-50	50-80	80-200	90-130
Puissance spécifique (W/kg)	140-300	500	500-1400	600-3000	100-160
Rendement charge/décharge (%)	70-85	70-75	70-80	85-90	80-90
Durée de vie (cycles) @ 80% DOD	300-1000	1000-3000	500-2000	1000-3000	600-1000

La Tableau (3.3) compare les performances énergétiques des batteries Li-Ions aux carburants liquides essence ou gasoil. Le problème fondamental des batteries apparaît clairement: les meilleures d'entre elles n'apportent qu'une énergie spécifique 200 fois plus faible que celle contenue dans les carburants pétroliers. Les véhicules électriques autonomes sont donc très fortement pénalisés en poids ce qui limite leur rayon d'action et leur autonomie. Mais on doit rester prudent, car l'énergie spécifique du diesel n'est pas directement comparable à celle des batteries dans le cas où on n'a pas besoin de beaucoup de capacité de stockage et quand l'efficacité énergétique est élevé (cas des véhicules électriques). Hormis peut-être pour les flottes captives de véhicules, l'autonomie des véhicules électriques est le principal frein à la multiplication des véhicules électriques. La solution réside dans l'adjonction d'une seconde source d'énergie à bord du véhicule, soit au concept de véhicule hybride [38].

Tableau 3.3: comparaison des performances énergétiques des batteries Li-Ions aux Carburants liquides (essence ou gasoil)

Carburant	Essence	Diesel	Batterie Li-Ions
Energie spécifique (Wh/kg)	11833	11667	105
Rendement moyen (%)	12	18	85
Energie spécifique à la roue (Wh/kg)	1420	2100	84

### 3.8. La transmission

Dans le cas des véhicules hybrides électriques séries où c'est toujours le moteur électrique qui assure la traction du véhicule, on n'a pas un besoin réel d'un embrayage ni d'une boîte de vitesses compte tenu de la grande plage de fonctionnement des moteurs électriques, d'un couple important et à l'existence de contrôleur électronique pour faire varier le couple et la vitesse. Lorsqu'il y a un lien entre le moteur thermique et les roues, un embrayage et une boîte de vitesse sont nécessaires pour adapter les caractéristiques du moteur à combustion aux différentes conditions de fonctionnement (couple, vitesse). Ils permettent également au moteur de démarrer depuis l'arrêt et au véhicule de s'arrêter sans caler le moteur. Les différents types de transmissions utilisés dans les

véhicules conventionnels restent valables pour les véhicules hybrides en gardant les mêmes caractéristiques. La transmission manuelle

(TM) est relativement efficace mais doit respecter certaines règles d'usage pour diminuer la consommation. La transmission automatique (TA) est confortable et permet d'éviter les pertes de puissance aux roues pendant le changement de vitesse. Mais elle reste complexe et coûteuse. De plus, la transmission automatique a un rendement faible (présence d'un convertisseur de couple et d'un système hydraulique) par rapport à la transmission manuelle.

La transmission variable continue (CVT) est très prometteuse. Elle permet de transmettre continuellement (avec un minimum de pertes) le couple du moteur aux roues et de faire travailler le moteur dans des conditions de couples et de vitesse indépendantes de la vitesse des roues. Le problème majeur de la transmission variable est son coût et sa masse plus élevés par rapport à la transmission manuelle. Elle donne aussi lieu à des conditions de fonctionnement inhabituelles [39].

### **3.9. Taux d'hybridation**

Nous appelons Taux d'Hybridation (TH) la part de la puissance que peut fournir la source d'énergie secondaire par rapport à la puissance totale disponible à bord. Pour un véhicule hybride thermique/électrique, le taux d'hybridation est égal au rapport de la puissance électrique sur la puissance totale exprimée en pourcentage [33]. En allant d'un véhicule thermique (TH=0%), jusqu'au véhicule tout électrique (TH=100%), il existe 3 principales catégories de véhicules électriques hybrides.

#### **3.9.1. Véhicule thermique assisté électriquement = TH faible**

Situé au bout du spectre des structures hybrides et très proche du véhicule conventionnel, le véhicule thermique assisté électriquement (ou power assist) utilise un système de propulsion électrique en plus du moteur thermique pour diminuer les émissions et la consommation de carburant ; c'est un hybride de type parallèle. Le moteur thermique doit dans ce cas être capable de fournir la puissance moyenne nécessaire véhicule pour fonctionner dans toutes les conditions de circulation.

#### **3.9.2. Véhicule électrique avec prolongation d'autonomie = TH moyen**

Le véhicule électrique à prolongateur d'autonomie (EREV pour Extended Range Electric Véhicule) est un véhicule hybride de type série ou parallèle, avec une utilisation très proche du véhicule tout électrique. La propulsion du véhicule se fait par un moteur électrique alimenté par des batteries de grande capacité maintenues chargées par un petit bloc alternateur-moteur thermique. Suivant l'option choisie, le moteur thermique peut fournir la puissance permettant au véhicule de



continuer à fonctionner lorsque la batterie est déchargée, mais avec un niveau de puissance maximale réduit : le véhicule est alors majoritairement utilisé comme un véhicule électrique.

En 2011, le constructeur suédois Volvo Car a annoncé la réalisation des prototypes électriques dotés d'un prolongateur d'autonomie sur les modèles électriques C30 et V602.

Pour accroître leur autonomie, les voitures électriques Volvo reçoivent un moteur à combustion interne. Le premier concept technique repose sur une Volvo C30 électrique avec prolongateur d'autonomie en série. Elle sera équipée d'un moteur à combustion trois cylindres délivrant 60 ch. Le moteur thermique est relié à un générateur électrique de 40kW. La puissance fournie par le générateur sert essentiellement à entraîner le moteur électrique de 111 ch (82 kW) de la voiture.

### 3.9.3. Le véhicule électrique hybride proprement dit = TH élevé

Le véhicule électrique hybride désignera par la suite, un véhicule possédant deux sources d'énergie d'égale importance. Cet hybride a donc la capacité de rouler uniquement en électrique grâce à une batterie permettant de parcourir une distance en tout électrique significative et possède un moteur thermique suffisamment important pour fournir la puissance nécessaire à toutes les conditions de circulation.

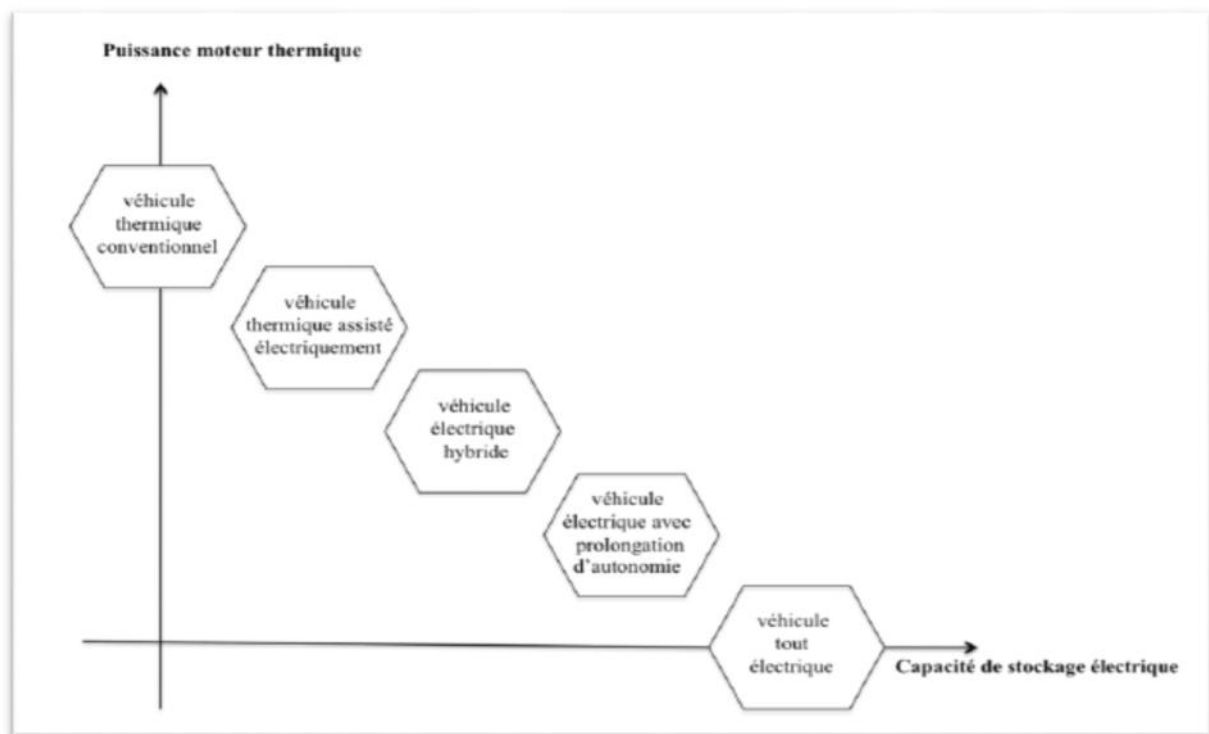


Figure 3.8 : Classification des véhicules suivant le taux d'hybridation

### 3.10. Les différents fonctionnements suivant le régime

Le but recherché est une consommation économique du carburant, tout en gardant les mêmes caractéristiques d'une cylindrée "normale". Pour cela les ingénieurs et constructeurs ont déterminé différentes phases (démarrage, vitesse de croisière, freinage=récupération d'énergie). Pour

économiser le carburant consommé, un usage sélectif du moteur thermique et électrique a fait naissance.

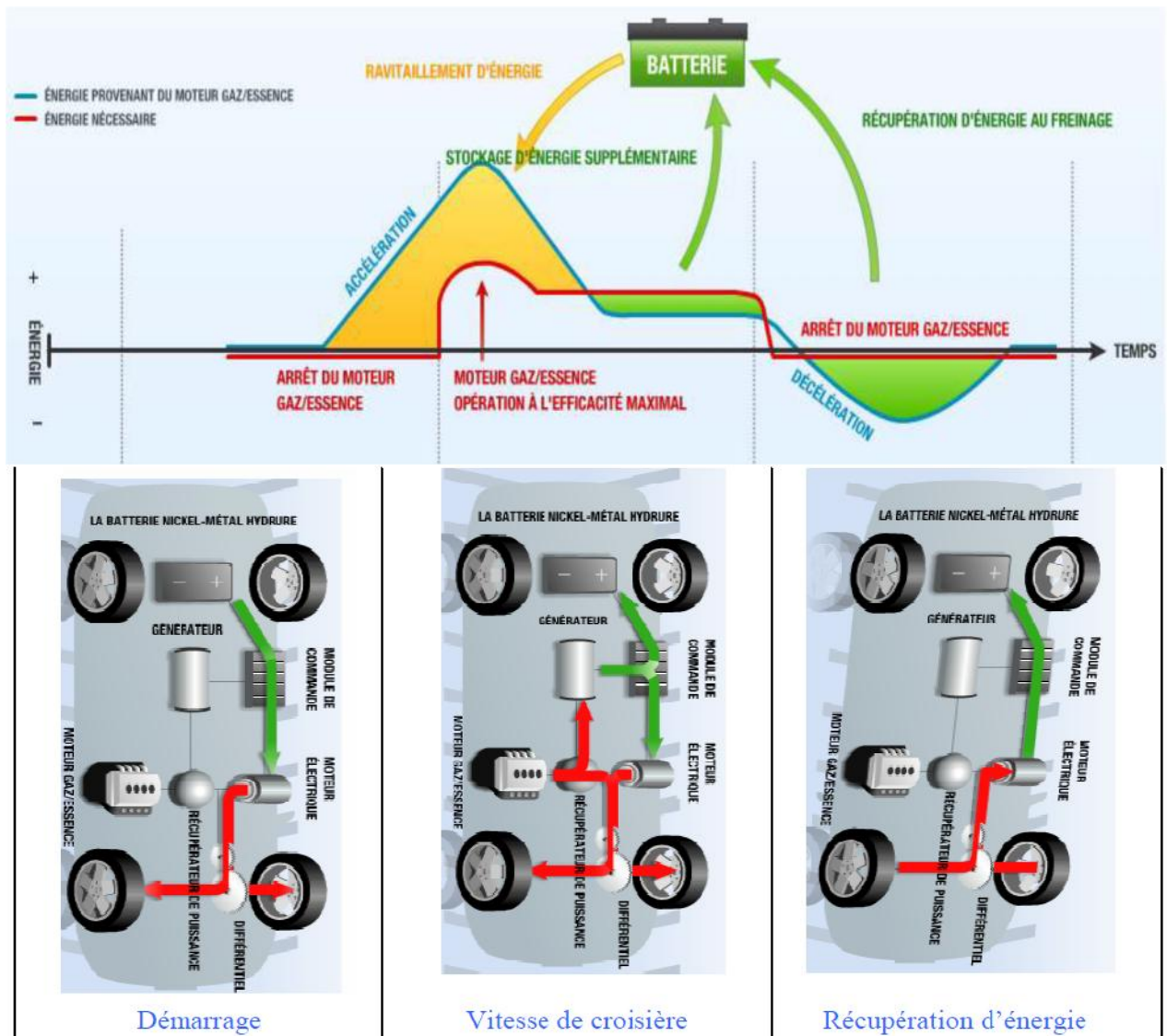


Figure 3.9 : Les différents fonctionnements suivant le régime

Démarrage et en milieu urbain : Vitesse basse : le moteur thermique n'est pas assez puissant, seul le moteur électrique est utilisé

Vitesse de croisière : Le moteur thermique est efficace pour la rotation des roues mais aussi pour alimenter le générateur qui lui va alimenter le moteur électrique ou la batterie.

Récupération d'énergie : Décélération ou freinage, récupération de l'énergie cinétique de la rotation des roues en faisant fonctionner le moteur électrique en tant que générateur pour recharger les batteries.

### 3.11. Comparaison des systèmes hybride et non-hybride

Maintenant, on peut analyser les caractéristiques du système de stockage non-hybride, composé de batteries seulement. Ce système est évidemment le moins volumineux et le plus léger à

cause de l'absence de super-condensateurs (ou les batteries de système hybride) et de convertisseurs. Par contre, les batteries doivent être dimensionnées pour répondre à toute la demande de puissance. Pour cela, il est nécessaire d'utiliser des batteries plus puissantes, contenant moins d'énergie et ayant une durée de vie plus faible. De plus, le choix de la batterie et le dimensionnement du bloc sont plus complexes, car il est nécessaire de respecter toutes les contraintes de puissance, d'énergie et de tension en un seul bloc. Un surdimensionnement est presque inévitable pour les satisfaire toutes. Malgré cela, le coût de cette architecture est le plus faible. C'est au niveau de la durée de vie que le système de stockage hybride devient intéressant.

Les super-condensateurs viennent assister les batteries dans les phases de fonctionnement abusif pour éviter leur détérioration prématurée. La légère augmentation du coût initial, du volume et de la masse du système de stockage hybride vaut la peine si on analyse le système sur toute sa vie utile. En effet, le remplacement des batteries coûterait beaucoup plus cher que le prolongement de sa durée de vie [40].

### **3.12. Avantages et inconvénients des véhicules hybrides**

Les systèmes hybrides font de plus en plus parler d'eux, en effet ils se répandent petit à petit sur le marché commercial. Nous trouvons certes de nombreux avantages, mais quelques points restent tout de même à améliorer.

Les avantages sont divers. On trouve le point le plus important, qui est l'économie de carburant, ce qui nous mène aux faibles émissions en ce qui concerne la pollution, mais on trouve aussi comme point positif une conduite agréable et performante.

On se demande, de nos jours, de combien de réserve de pétrole dispose-t-on ? La seule réponse à donner est qu'il faut gérer la consommation de carburant. Les systèmes hybrides jouent un rôle primordial dans cette perspective. En effet, cette technologie combine intelligemment les moteurs électrique et thermique. On a alors une consommation de carburant faible. Prenons un exemple : une voiture hybride X aurait la puissance d'un calibre supérieur tout en consommant comme une cylindrée de taille inférieure ! Le conducteur peut aussi gérer sa propre consommation grâce à la combinaison des moteurs (conduite basse vitesse usage du moteur électrique, donc pas de pollution).

Les hybrides appartiennent à la catégorie la plus basse des machines polluantes. On a donc affaire à un système propre, qui pourrait résoudre de nombreux problèmes comme la pollution.

Les émissions de CO<sub>2</sub> diminuent fortement avec une telle technologie, ainsi que les autres substances contenues dans les gaz d'échappement. La combustion est elle aussi plus efficace et des éléments purifient ces gaz d'échappement.

Les systèmes hybrides ont une très bonne autonomie. Les batteries se rechargent lors de l'utilisation du moteur thermique. En effet, lorsque la voiture fonctionne sur moteur à essence, ce dernier produit de l'énergie qui passe ensuite dans la batterie principale par le biais d'un générateur.

Le système de freinage veille aussi à la recharge car une partie de l'énergie cinétique est transformée en énergie électrique.

La conduite est agréable avec une accélération linéaire et puissante. On assiste aussi à une réduction du bruit, qui en fait des voitures quasi silencieuses. Il ne faut pas non plus oublier la souplesse au démarrage grâce à l'utilisation du moteur électrique. Pour finir, le crédit d'impôt pour l'achat d'un véhicule propre va augmenter, tandis que les propriétaires d'automobiles très polluantes paieront leur carte grise plus chère. Le point majeur des inconvénients, ou plutôt point à améliorer, est le prix d'un véhicule hybride ! Celui-ci reste bien élevé comparé aux automobiles "classiques". Cependant on pourrait assimiler cette dépense à un effort financier qui sera compensé par l'économie en consommation de carburant.

L'utilisation de pièces supplémentaires, comme la batterie hybride, en font une voiture plus lourde. Hors ville, le moteur électrique est peu ou pas utilisé. Enfin, le bruit quasi-silencieux, émis par un véhicule hybride, peut s'avérer dangereux pour les piétons qui n'entendraient pas le véhicule arriver [41].

### **3.13. Conclusion**

Face à une constante évolution de la pollution atmosphérique, des répercussions sur la santé de l'homme ainsi que sur l'environnement constituent un facteur à prendre en compte. De plus une consommation abondante des énergies fossiles nous a poussé à concevoir un concept innovant en terme de pollution et de consommation qui soit le plus adapté pour répondre à ces attentes. Ce dernier est : les technologies hybrides.

Ingénieurs et constructeurs ont développé les systèmes hybrides par le biais de l'association d'un moteur thermique à celui d'un moteur électrique. Cette fusion a permis de répondre à certains problèmes que pose la voiture traditionnelle, comme les émissions de gaz, la nuisance sonore, la consommation... Pour faire face à ces problèmes écologiques, des normes sévères ont été établies. Les véhicules hybrides appartiennent donc aux classes de machines les moins polluantes, ils répondent donc à ces principes. En effet, à faible régime, une automobile classique consomme beaucoup plus qu'un véhicule hybride, celui-ci n'utilisant que son moteur électrique en ville et ne polluant donc pas. Une des solutions envisagées pour cesser complètement la pollution est le tout électrique. Cette dernière fait ses preuves en milieu urbain mais est un inconvénient sur route ; la technologie hybride, permet un confort en tout milieu.

Mais Il n'existe pas une hybridation parfaite, chaque hybridation répond à des critères de performance pour les faibles vitesses, les forts couples, la simplicité de la commande ou la simplification de la chaîne de traction mécanique.

## Chapitre 4

### *Les véhicules hybrides solaires*

#### 4.1. Introduction

Dans les dernières années, une attention croissante a été passée vers les applications de l'énergie solaire aux voitures.

Malgré un effort technologique important et quelques résultats spectaculaires, plusieurs limitations, telles que la densité de puissance faible, la disponibilité imprévisible de la source solaire et inconvénients énergétiques (augmentation du poids et de la friction et les pertes aérodynamiques dus à des composants supplémentaires), provoquent les voitures solaires pur pour être encore loin de faisabilité pratique. D'autre part, le concept d'une voiture électrique hybride assisté par l'énergie solaire, panneaux apparaît plus réaliste [42].

Dans les dernières décennies les véhicules hybrides solaires (VHS) ont évolué pour maturité industrielle. Ces véhicules représentent maintenant une solution réaliste aux problèmes importants, tels que la réduction de la pollution gazeuse dans le lecteur urbaine ainsi que les exigences d'économie d'énergie. En outre, il y a un grand nombre de conducteurs qui utilisent leur voiture tous les jours, pour de courts trajets et à puissance limitée [43].

Les considérations ci-dessus ouvrent des perspectives prometteuses en ce qui concerne l'intégration de panneaux solaires avec des véhicules hybrides (thermique, électriques), avec un intérêt particulier dans la possibilité de stocker de l'énergie, même pendant les phases de stationnement.

Une difficulté spécifique dans le développement d'un (VHS) modèle de véhicule hybride solaire concerne les nombreuses interactions mutuelles entre les flux d'énergie, Le dimensionnement du véhicule, la performance, le poids et les coûts, dont les connexions sont beaucoup plus critiques que soit dans les véhicules électriques ou hybrides classiques. Des études préliminaires sur les flux d'énergie dans un VHS a été récemment menée par les auteurs [44].

Ce chapitre présente une étude plus détaillée sur le dimensionnement d'une voiture hybride solaire. Les analyses d'optimisation sont bases sur un modèle de la dynamique longitudinale du véhicule, mis au point pour tenir compte, en plus de l'impact de poids et de coût, également l'influence du flux d'énergie et les stratégies de lutte adoptées.

#### 4. 2. Structure du véhicule hybride solaire

Différentes architectures peuvent être appliquées à VHS : série, parallèle et parallèle-série. Ces deux dernières structures ont été utilisées toutes les deux dans la plupart des voitures hybrides disponibles sur le marché : Toyota Prius (parallèle-série) et Honda Civic (parallèle). Au lieu de cela, pour les véhicules hybrides solaires de la structure de la série semble préférable, en raison à sa simplicité, comme dans certains prototypes récentes de VHS [42]. Avec cette approche, les panneaux photovoltaïques (PV) aident le Générateur électrique (EG), alimenté par la CIE, à la recharge de la batterie B à la fois dans le mode de stationnement et les conditions de conduite, à travers le nœud électrique FR. Le moteur électrique EM peut soit fournir la puissance mécanique pour la propulsion ou restaurer une partie de la puissance de freinage en cas de freinage régénératif. Dans cette structure, le moteur thermique peut travailler la plupart du temps à puissance constante (PAV), correspondant à son efficacité optimale, tandis que le moteur électrique peut EM atteindre une puissance crête PEM:

$$PEM = P_{av}$$

Panneaux photovoltaïques en conditions réelles et disponibles pour la propulsion, une calculatrice solaire développé à l'US National Renewable Energy Lab a été utilisé [44].

La calculatrice fournit l'énergie solaire nette pour différentes positions du panneau: avec mécanisme de suivi 1 ou 2 axes ou pour des panneaux fixes, à différents angles d'inclinaison et d'azimut. La solution la plus évidente pour les voitures solaires est l'emplacement des panneaux sur le toit et le capot, presque horizontale

la position. Néanmoins, deux options supplémentaires peuvent être prises en compte: (i) des panneaux horizontaux (sur le toit et le chapeau) avec une axe de suivi, afin de maximiser l'énergie capturée pendant le mode de stationnement; (ii) des panneaux situés également sur les côtés et à l'arrière de la voiture à près de positions verticales. La superficie maximale du panneau peut être estimée en fonction des dimensions de la voiture et de la forme, au moyen d'un modèle géométrique simple [43].

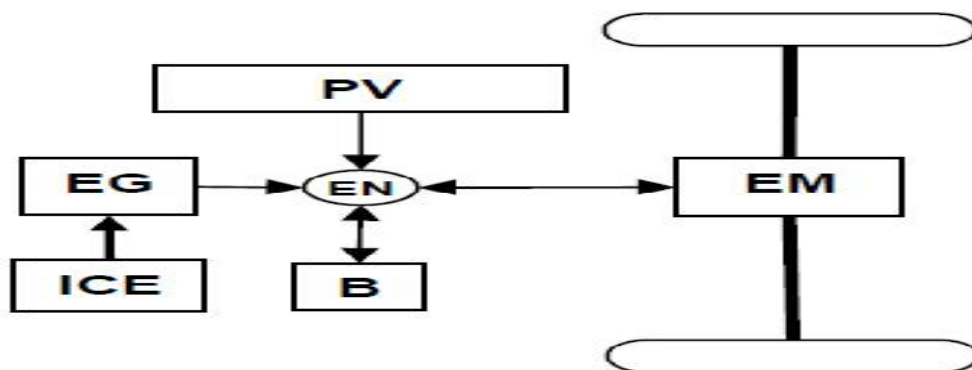


Figure 4.1 - Schéma du véhicule solaire hybride série.

L'énergie à partir de panneaux photovoltaïques peut être obtenue résumant la contribution de stationnement (P) et la conduite (d) les périodes. Alors que dans le premier cas, il est raisonnable de supposer que le photovoltaïque a une vue dégagée du ciel, cette hypothèse pourrait échouer dans la plupart des conditions de conduite. Par conséquent, l'énergie captée lors de la conduite peut être réduite d'un facteur  $<1$ . Pour estimer la fraction de l'énergie solaire captée par jour, pendant les heures d'entraînement (hd), on suppose que l'énergie solaire est distribuée sur tous les jours. Un facteur  $<1$  est ensuite introduit pour tenir compte de plus dégradation due à charger et processus de décharge dans la batterie pour l'énergie prise lors de parking. L'énergie solaire nette disponible pour la propulsion, stockée au cours de Le parking et les modes de conduite, peuvent donc être exprimées comme suit:

$$E_{s,p} = \eta_p A_{PV} e_{sun} \frac{h_{sun} - h_d}{h_{sun}} \alpha$$

$$E_{s,d} = \eta_p A_{PV} e_{sun} \frac{h_d}{h_{sun}} \beta$$

Où  $e_{sun}$  est l'énergie quotidienne moyenne capturé par des panneaux solaires en position horizontale. Ci-après, on suppose  $e_{sun}$  égale à 4,3 kWh / jour, ce qui correspond à peu près à une latitude de 30 ° dans les mois Juin. L'énergie nécessaire pour conduire le véhicule pendant la journée  $E_d$  (kWh) peut être calculé en fonction de la moyenne positif  $P_{av}$  puissance (kW) et les heures de conduite  $h_d$ :

$$E_d = \int_{h_d} P(t) \cdot dt = h_d P_{av}$$

La consommation de carburant pour les véhicules conventionnels et le VHS peut alors être calculée et comparée. Bien sûr, en parallèle avec les économies de carburant, correspondant réduction des polluants et des émissions de CO2 par rapport au véhicule conventionnel est également atteint.

### 4.3 Modèle de conception optimale de VHS

Les véhicules solaires hybrides peuvent représenter une solution intéressante pour faire face à la fois économiser l'énergie et les questions environnementales, mais relativement peu d'efforts de recherche ont été dépensés dans ce sens. Bien que plusieurs prototypes et quelques travaux théoriques démontrent la faisabilité de cette idée générale, une présentation détaillée des résultats et des performances ne sont pas généralement disponibles sur la littérature ouverte, et un effort systématique pour la conception et le contrôle d'un véhicule hybride solaire semble toujours portés disparus. Ce travail semble particulièrement nécessaire puisque le scénario technologique évolue rapidement, et les nouveaux composants et solutions sont de plus disponibles ou sera disponible dans le prochain avenir.



En outre, les coûts et les prix sont également soumis à des variations rapides, nécessitant ainsi le développement d'un modèle général considérant à la fois les aspects techniques et économiques liées à la conception et l'exploitation d'un VHS. Une difficulté spécifique à développer un modèle VHS est dû aux nombreuses interactions mutuelles entre les flux d'énergie, système de propulsion composante dimensionnement, la dimension des véhicules, les performances, le poids et les coûts, dont les connexions sont beaucoup plus critique que dans un système classique et également dans les voitures hybrides.

Des études préliminaires sur les flux d'énergie dans un VHS ont été récemment mis au point par des chercheurs. Le modèle décrit les flux d'énergie entre les panneaux horizontaux et / ou verticaux solaires, moteur à combustion interne, générateur électrique, moteur électrique et les batteries, compte tenu de la dynamique longitudinale du véhicule et l'effet des stratégies de contrôle. Le poids du véhicule est prévu, à partir d'une base de données de véhicules utilitaires, compte tenu des effets de groupe motopropulseur dimensionnement, les dimensions des véhicules et l'utilisation possible de l'aluminium. Les effets de dimensions des véhicules sur les pertes aérodynamiques et zone de panneau maximale peuvent également être pris en compte. Le modèle prédit les coûts supplémentaires par rapport aux véhicules classiques, La comparaison du VHS et véhicule conventionnel sur un cycle de conduite est obtenue en intégrant un simulateur de dynamique véhicule, précédemment mis au point par les auteurs, avec les sous-modèles du électrique les composants (c.-à-batterie, le moteur électrique et le générateur) dérivé de la conseillers [46].

#### **4.4 Batteries solaires**

Les batteries solaires stockent l'énergie produite par les panneaux photovoltaïques afin d'assurer l'alimentation électrique en toutes circonstances (jour ou nuit, ciel dégagé ou couvert). Une batterie utilisée avec des panneaux solaires est une batterie à décharge lente (appelée aussi batterie solaire). Ces batteries sont spécifiquement conçues pour les applications solaires. Elles n'ont pas les mêmes caractéristiques qu'une batterie de voiture par exemple, elles se déchargent plus progressivement et supportent mieux les décharges fréquentes peu profondes.

Nous pouvons brancher une batterie solaire directement sur un panneau solaire, mais il 'y le risquez 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 de notre véhicule.

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.

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

La première question à se poser est la question de la capacité de stockage d'énergie solaire, dont vous avez besoin.

La capacité d'une batterie solaire est exprimée en Ampères Heure (Ah) ce qui désigne le débit totale d'énergie de la batterie dans des conditions données (10 heures, 20 heures, ...) Avec un régulateur solaire (qui se branche entre les panneaux solaires et la batterie), nous régulons la charge de la batterie, qui ne doit pas dépasser 90%, ni ne doit descendre sous les 40%, car une surcharge comme une décharge trop profonde endommage ces batteries et diminue leur durée de vie.

Donc, si nous reprenons notre exemple, une batterie 100 Ah – 12V, pourra se décharger au mieux de 60Ah (60% x 100Ah). Cela représente par rapport à notre besoin quotidien en énergie  $60 \text{ Ah} \times 12\text{V} = 720 \text{ Wh}$

- Le montage en parallèle (qui consiste à relier les bornes "+" aux bornes "+" et les bornes "-" aux bornes "-") permet d'additionner les capacités de stockage (en Ah) tout en conservant la même tension (en Volts).

- Le montage en série permet d'additionner la tension des batteries, en revanche la capacité en Ah reste celle d'une seule batterie.

Il est reste de déterminer l'autonomie de notre besoin, Pour cela, nous pouvons fixer le nombre de jour d'autonomie de notre installation Photovoltaïque, c'est-à-dire le nombre de jours pendant lesquels nos batteries n'ont pas besoin d'être rechargées tout en conservant une consommation d'énergie normale. En général, cela représente le nombre de jours consécutifs sans soleil auquel nous pouvons faire face.

par exemple un besoin d'énergie de 900 Wh par jour et que vous choisissiez une autonomie de 3 jours, votre besoin de stockage sera de  $3 \times 900 \text{ Wh} = 2700 \text{ Wh}$  (pour simplifier, car il faudrait ajouter à cela une déperdition de charge de 15% à 30% à cause du câblage, de l'onduleur ...). Soit en 12V, une capacité de  $2700 \text{ Wh} / 12\text{V} = 225 \text{ Ah}$ .

Comme indiqué plus haut il est recommandé de ne pas décharger sa batterie au-delà de 50%, donc il faut prévoir le double en capacité de batterie, soit 450 Ah.

Donc nous pourrions choisir avec une bonne marge de sécurité 4 batteries de 150 Ah – 12V qui nous donneront une capacité cumulée de 600 Ah.

La capacité d'une batterie solaire (appelée aussi batterie à décharge lente) se mesure en ampères heure (Ah). Elle représente le "débit" potentiel de la batterie.

Mais il faut ajouter à cela la vitesse de décharge de la batterie qui a un impact sur la capacité : plus la rapidité de la décharge est importante, plus la capacité réelle de la batterie sera faible.

Ainsi une batterie présentant la capacité de 70 Ah en C100 aura réellement une capacité de 70 Ah si la décharge prend 100 heures, environ 55 Ah en 20 heures et seulement 50 Ah en 10 heures.

Pour le dire autrement : si on décharge complètement cette batterie selon une intensité de 5 Ampères, la décharge ne durera que 10 heures ( $10 \times 5 = 50$ ) cette même décharge durera 20 heures à la cadence de 2,75 A ( $2.75 \times 20 = 55\text{Ah}$ ) et enfin 100 heures à la cadence de 0,7 A ( $0.7 \times 100 = 70$  ah).

Dans une installation photovoltaïque, cette capacité n'est qu'une base de travail, car il est hors de question de décharger une batterie à 100% : cela la détruirait [47].

## 4.5. Le générateur photovoltaïque

### 4.5.1. Modèle avec deux diodes

Le modèle électrique le plus proche du générateur photovoltaïque est un modèle à deux diodes avec des facteurs de forme différents et des lois de comportement, par rapport à la température, différentes (Figure 4.2).

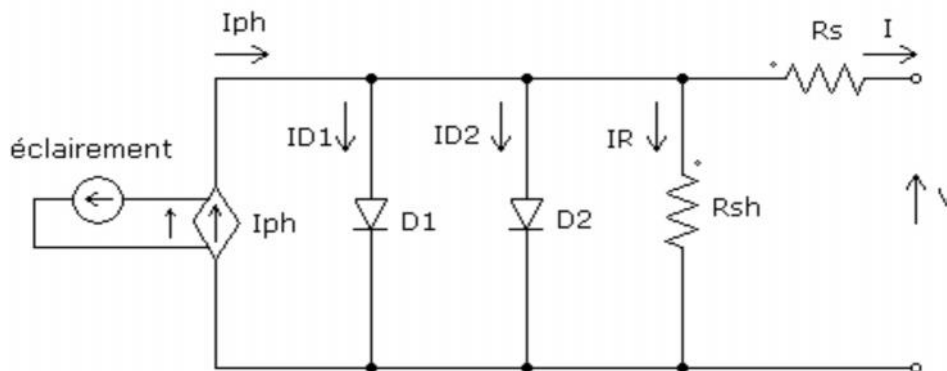


Figure 4.2 : Modèle électrique équivalent du générateur photovoltaïque

A partir de ce schéma, nous définissons le premier modèle de la cellule photovoltaïque. On modélise également les chutes ohmiques et les courants des fuites par deux résistances :

- une résistance «shunt » en parallèle ( $R_{sh}$ ) modélise les courants de fuite dus aux effets de bord de la jonction PN. Elle est de l'ordre de quelques ohms ( $4 \Omega - 30 \Omega$ ).
- une résistance en série ( $R_s$ ) modélise les pertes aux contacts et connections. Elle est normalement très petite.

La caractéristique tension–courant est donnée par la relation :

$$I = I_{Ph} - I_{D1} - I_{D2} - I_R$$

Avec:

$$I_{ph} = I_{cc \text{ std}} \cdot G/1000 \cdot [\delta I_T \cdot (T-298)+1]$$

- $I_{ccstd}$  : courant de court-circuit de la cellule photovoltaïque dans les conditions standards et optimales:  $G=1.000 \text{ W/m}^2$  et  $T=25^\circ\text{C}=298\text{K}$ .
- $G$  : éclairement [ $\text{W/m}^2$ ]       $T$  : température [K]
- $\delta I_T$  : variation de courant de court-circuit par rapport à la température [K-1].

$$I_{D1} = I_{s1} + \exp\left(\frac{e(v + R_s \cdot I)}{\eta_1 \cdot k \cdot T}\right) - 1$$

$e$  : charge de l'électron       $k$  : constant de Boltzmann:  $k = 1.380 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$

$\eta$  : Constant dépendant du matériau semi-conducteur [sans dimension]

$T$  : température [K]       $I_s$  : courant inverse de saturation de la diode, il est dépendant de la température selon une loi différente pour chaque matériau [A]

$K_1$  : constant thermique du fabricant       $E_g$  : Energie de gap [J]

$V$  : tension [V]       $I$  : courant [A].

$$I_{D2} = I_{s2} + \exp\left(\frac{e(v + R_s \cdot I)}{\eta_2 \cdot k \cdot T}\right) - 1$$

$$I_{s2} = k_2 \cdot T^{5/2} \cdot \exp(-E_g/k \cdot T)$$

Dans cette équation, le courant est fonction de la température, de la tension aux bornes de la cellule, de l'éclairement et de lui-même. Le modèle est donc implicite. La solution la plus simple, pour éviter ce problème, est de négliger la résistance série à ce niveau dans le modèle de cellule et de l'inclure ensuite comme résistance de câblage  $R_s$  dans le modèle de simulation complet. Une autre option est de mettre en œuvre un algorithme itératif capable de calculer le courant par des approximations successives. On obtient ainsi une modélisation classique et performante d'une cellule photovoltaïque.

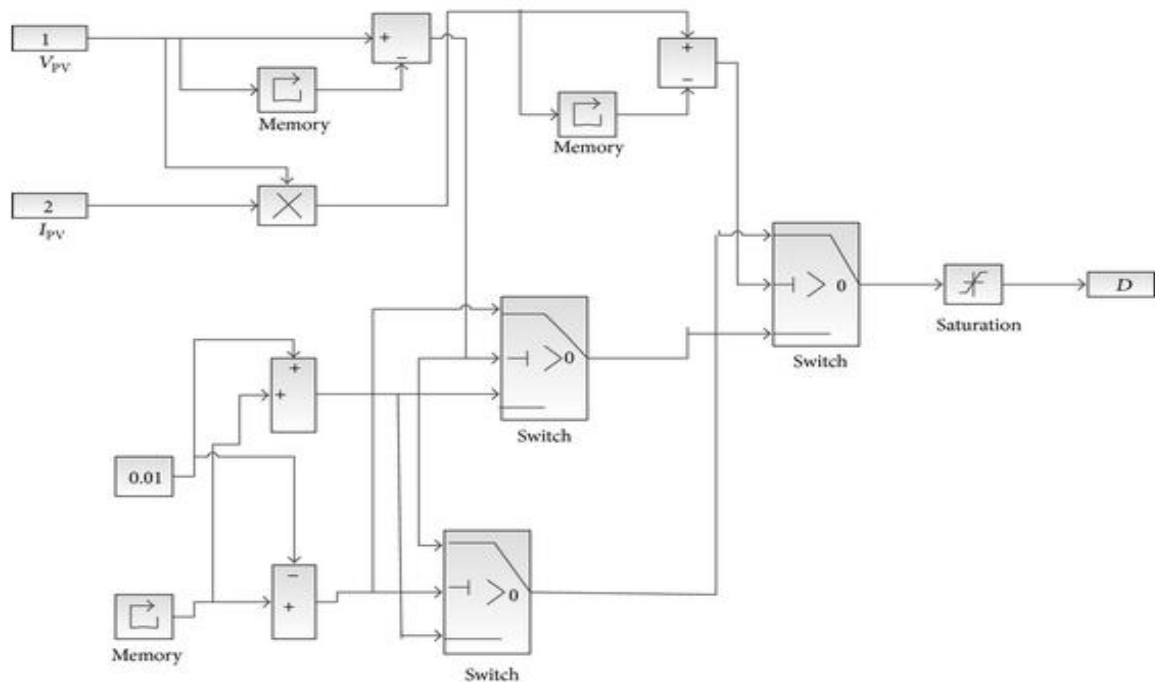


Figure 4.3. : PV modèle Simulink

#### 4.6. Position du problème de la gestion d'énergie

Dans un véhicule conventionnel, l'enfoncement de la pédale d'accélération traduit directement la puissance demandée par le conducteur à fournir par la source unique. Mais dans un véhicule hybride solaire, l'opération est beaucoup plus complexe. La présence d'une source d'énergie réversible introduit des degrés de libertés supplémentaires dans la réalisation de la puissance demandée. Une mauvaise gestion d'énergie peut amener à une consommation de carburant analogue, voire supérieure de celle d'un véhicule conventionnel équivalent.

Le problème de la gestion d'énergie consiste alors à trouver la meilleure répartition de la puissance entre les différentes sources d'énergie. Plusieurs critères de performances interviennent pour le choix de cette répartition, telles que la consommation de carburant, les émissions de polluants, la durée de vie des composants, le confort de conduite, etc. En raison de la difficulté de prise en compte quantitative de certains paramètres de nature subjective (confort de conduite) et de la complexité de certains modèles (vieillessement), les critères considérés sont souvent la consommation énergétique du véhicule et/ou les émissions de polluants. Les algorithmes permettant de résoudre ce problème d'optimisation sont appelés lois de gestion d'énergie ou encore stratégies de commande ou aussi stratégies de gestion de l'énergie (énergie Management Stratégie ou EMS).

La commande d'un véhicule hybride connue sous le terme de superviseur ou UCVH (Unité de Contrôle de Véhicule Hybride) est en relation avec tous les organes de la chaîne de traction (sources, moteur thermique, moteurs électriques,...). Les lois de gestion d'énergie représentent la

partie supervision de la commande. A chaque instant, elles calculent les points de fonctionnement optimaux ainsi que les alternances de phases de recharge/décharge de l'élément de stockage d'énergie.

#### **4.6.1. Modes de fonctionnements**

Dans les véhicules hybrides à moteur thermique, la gestion d'énergie peut être basée sur une approche par fonction. Nous présentons dans ce paragraphe les différentes fonctionnalités qui adaptent le comportement des machines (thermiques et électriques) aux conditions d'utilisation. Ces fonctionnalités participent à la réduction de la consommation du carburant et/ou à la récupération d'énergie électrique [48].

##### **4.6.1.1. Mode démarrage (Stop-and-Start)**

Nommé aussi Stop-and-Go, le Stop-and-Start consiste à couper systématiquement le moteur thermique, quand aucune puissance n'est demandée. Cette fonctionnalité est en particulier destinée à être utilisée lors des arrêts aux feux rouges et en présence des embouteillages. Ce système permet au moteur thermique d'être redémarré rapidement et sans vibration après un arrêt de courte durée, grâce à une machine électrique suffisamment puissante. Le gain apporté par ce système provient de la disparition de la consommation de carburant au ralenti, une consommation qui ne produit aucune énergie utile et augmente significativement les émissions de polluants.

##### **4.6.1.2. Mode régénération**

Dans ce mode, appelé aussi flux série, le moteur électrique fournit un couple négatif et le moteur thermique fournit un couple supérieur au couple de consigne. L'énergie provenant du moteur électrique est alors stockée dans les batteries. Un des avantages de ce mode est de pouvoir déplacer les points de fonctionnement du moteur thermique. Par exemple, quand le véhicule avance à vitesse stabilisée, il est possible d'augmenter légèrement la charge du moteur thermique lui permettant ainsi de fonctionner dans une zone de meilleur rendement. Le supplément d'énergie est ensuite récupéré par la machine électrique pour recharger l'élément de stockage.

##### **4.6.1.3. Mode récupératif**

Le but est de récupérer l'énergie cinétique du véhicule, lors des phases de freinage ou de décélération du véhicule sous la forme d'une énergie électrique, qui est ensuite stockée. Si les éléments de stockage atteignent leur limite de charge maximale, le frein mécanique prend le relais pour continuer de décélérer le véhicule jusqu'à l'arrêt. L'énergie cinétique sera dissipée sous forme de chaleur dans les freins comme c'est le cas dans les véhicules conventionnels.

##### **4.6.1.4. Mode boost**

Cette fonction n'existe que dans les véhicules hybrides où les deux couples peuvent s'additionner (architecture hybride parallèle ou parallèle à dérivation de puissance). En effet, le

mode boost correspond à une assistance du moteur thermique, lors de fortes demandes de puissance par le moteur électrique qui développe un couple positif et participe à la traction du véhicule (principe présent à bord des Formule1 d'aujourd'hui). Ce mode est activé pour décharger le moteur thermique afin de le placer sur un point de fonctionnement de meilleure efficacité.

#### **4.6.1.5. Mode thermique pur**

Durant ce mode, le moteur électrique n'est pas utilisé. Il convient à des situations où le rendement thermique est bon (sur une autoroute, par exemple), ou bien lorsque le stockage est déchargé ou complètement plein. Si l'élément de stockage est déchargé, le moteur thermique le recharge et donc ça rejoint le mode flux série.

#### **4.6.1.6. Mode électrique pur**

Cette fois-ci, c'est le moteur thermique qui est à l'arrêt, la machine électrique assure à elle seule la traction du véhicule. C'est le mode « zéro émission » avec une consommation nulle en carburant. La durée d'activité de ce mode dépend de la charge des éléments de stockage ; tandis que les performances dynamiques de traction dépendent des puissances maximales que peuvent fournir les machines électriques qui lui sont associées.

### **4.7. Modélisation d'un véhicule électrique hybride**

Dans cette partie de 4<sup>ème</sup> chapitre, nous examinons un modèle de véhicule hybride-électrique de type série/parallèle sous Matlab /Simulink, en utilisant les positions de la pédale (accélérations/décélérations) déduites du cycle de conduite, comme signal d'entrée principale.

La simulation illustre le flux d'énergie et sa distribution en vertu des différents modes de fonctionnement du véhicule hybride.

Tous les éléments de traction sont modélisés et regroupés pour créer un modèle énergétique capable de simuler le comportement hybride, qui associe les différentes sources d'énergie de manière efficace et optimale à l'aide d'un système de commande qui se base sur une logique permettant un partage de puissance bénéfique qui se traduit par une économie du carburant diminuant les rejets polluants l'atmosphère.





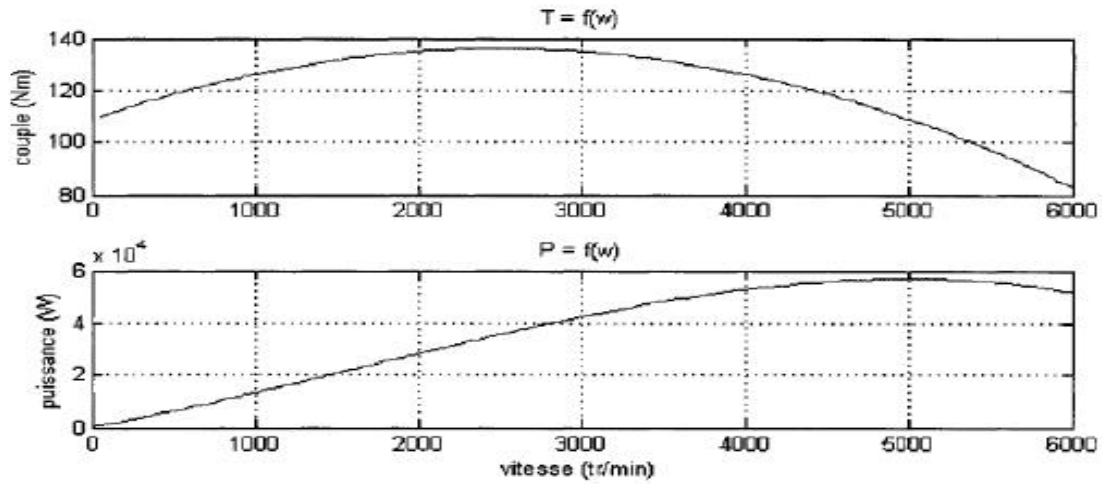


Figure 4.5 : les Caractéristiques Couple/Vitesse et Puissance/Vitesse du moteur thermique

#### 4.7.2. Modèle de la batterie

Un modèle de batterie standard présenté dans [1] est mis en œuvre dans le présent document. Pour éviter le problème de la boucle batterie algébrique, ce modèle utilise uniquement l'état de charge (SOC) de la batterie comme une variable d'état. En outre, le modèle dans [1] peut caractériser précisément quatre types de chimies de batterie, y compris la batterie plomb-acide.

La batterie est modélisée à l'aide d'une simple série connectée source de tension commandée avec une valeur ohmique constante, où la source de tension contrôlée est décrite par :

$$E = E_0 - K \frac{Q}{Q - \int i dt} + A \exp \left( -B \int i dt \right),$$

$$V_{\text{Battery}} = E - R_{\text{in}} I_{\text{Battery}},$$

où  $E_0$  est la tension à la batterie de charge (V),  $K$  est la tension de polarisation (V),  $Q$  est la capacité de la batterie (Ah),  $A$  est la zone d'amplitude exponentielle (V),  $B$  est le temps de la zone exponentielle inverse constante (Ah)<sup>-1</sup>,  $V_{\text{batterie}}$  est la tension de batterie (V),  $R_{\text{in}}$  est la résistance interne de la batterie ( $\Omega$ ),  $I_{\text{batterie}}$  est le courant de la batterie (A),  $\int i dt$  est la charge est fourni et tirée par la batterie (Ah).

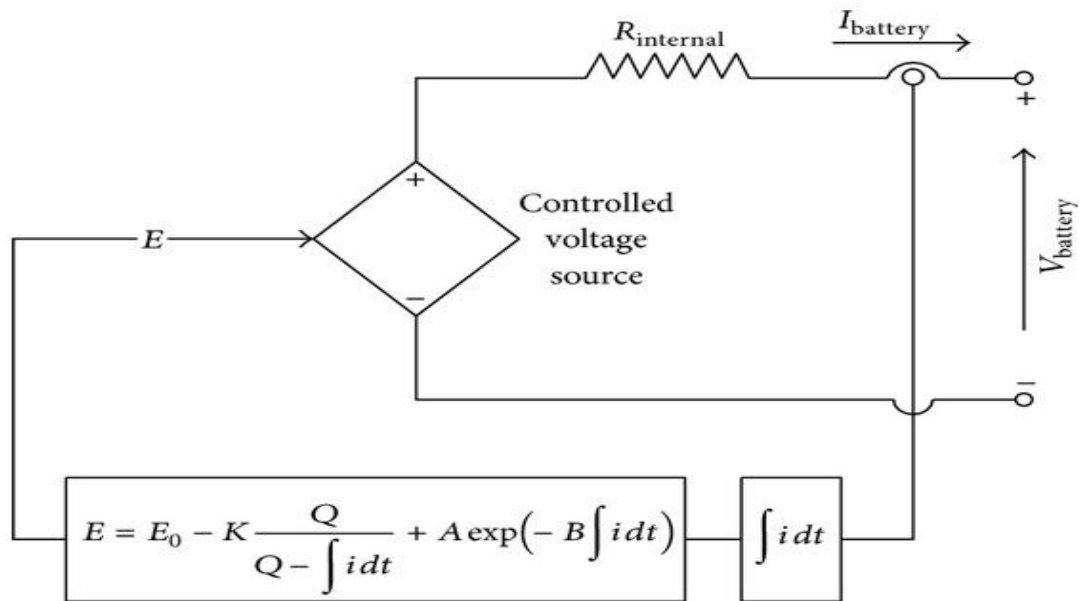


Figure 4.6: modèle de batterie standard non linéaire.

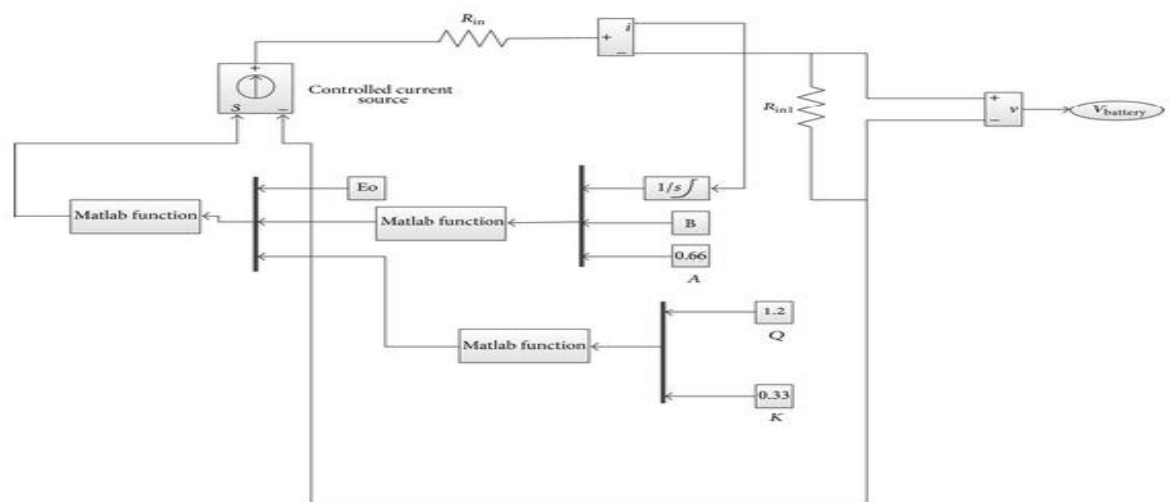


Figure 4.7: Le diagramme Simulink du modèle de batterie

### 4.7.3. Modèle de Moteurs Électriques

Le bon choix de la partie électrique du véhicule hybride est l'élément majeur pour la réussite du mariage entre le thermique et l'électrique.

Pour cela Le moteur synchrone à aimants permanents (MSAP) semble à plus d'un titre, la solution la plus adaptée pour une traction automobile grâce à ses performances techniques et en particulier, sa compacité et son rendement. Il a été retenu par Toyota dans la Prius pour les raisons suivantes : bon rendement, bonnes performances dynamiques, champ magnétique important dans l'entrefer, pas de source de tension continue pour l'excitation.

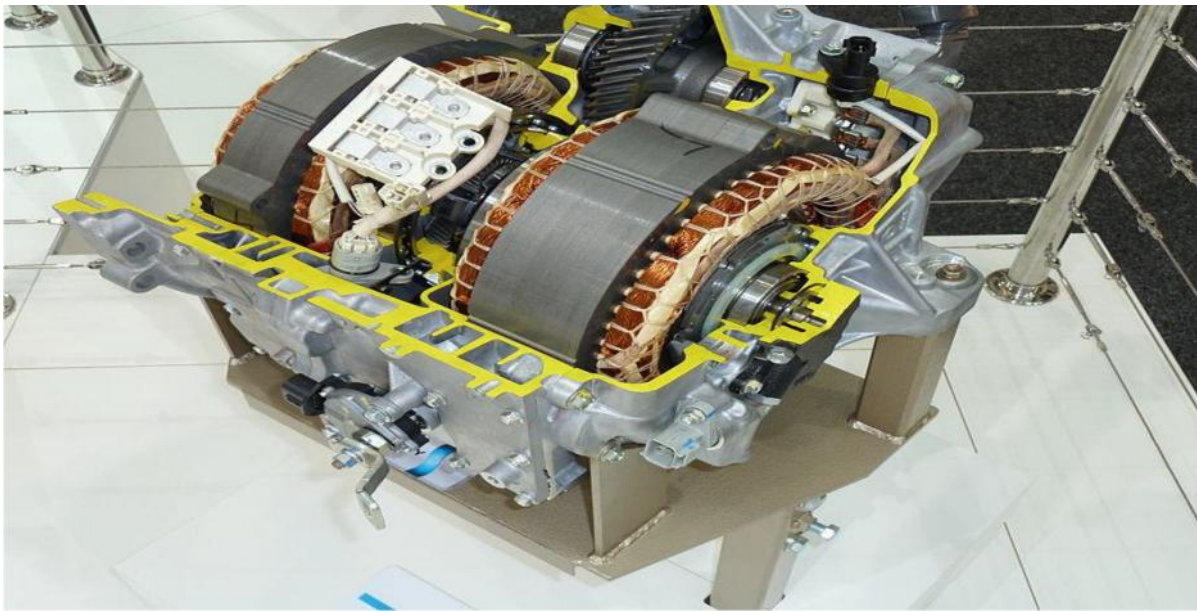


Figure 4.8 : Toyota e-CVT transmission : MG1 est à gauche, MG2 à droite, le train épicycloïdal au centre.

Les véhicules hybrides équipés d'un moteur à courant alternatif, alors il est nécessaire d'interposer entre la source d'énergie et le (ou les) moteur(s) de traction un dispositif de conversion appelée onduleur, qui transforme l'énergie électrique à courant continu en énergie électrique à courant alternatif et qui permet de réaliser la commande du couple des moteurs et le réglage de la vitesse du véhicule tant en mode traction qu'en mode freinage.

La conversion DC/AC peut être réalisée de multiples manières. Mais l'usage, les particularités des véhicules routiers et la rationalisation des solutions industrielle ont conduit à privilégier une structure d'onduleur à six interrupteurs bidirectionnels constituée par l'association d'un IGBT et d'une diode montes en antiparallèle et commandes selon une loi du type MLI (Modulation de Largeurs d'Impulsion, en anglais (PMW). Ce type de montage permet d'associer une source de tension (de type batterie) et un récepteur de type source de courant (moteur asynchrone, moteur synchrone bobine, a aimant permanent ou a reluctance variable).

L'onduleur est commandé par la technique de Modulation de la Largeur d'Impulsion (MLI). Elle consiste à imposer aux bornes de la machine des tensions, hachées à fréquence fixe, évoluant en fonction des références de tension obtenues à partir des régulateurs des courants. A l'aide d'un signal triangulaire appelé porteuse, ces tensions sont modulées en largeur d'impulsion afin de déterminer les instants de commutation et la durée de conduction de chaque interrupteur de l'onduleur. A chaque instant, l'un des deux interrupteurs de chaque bras est en conduction et l'autre est bloqué.

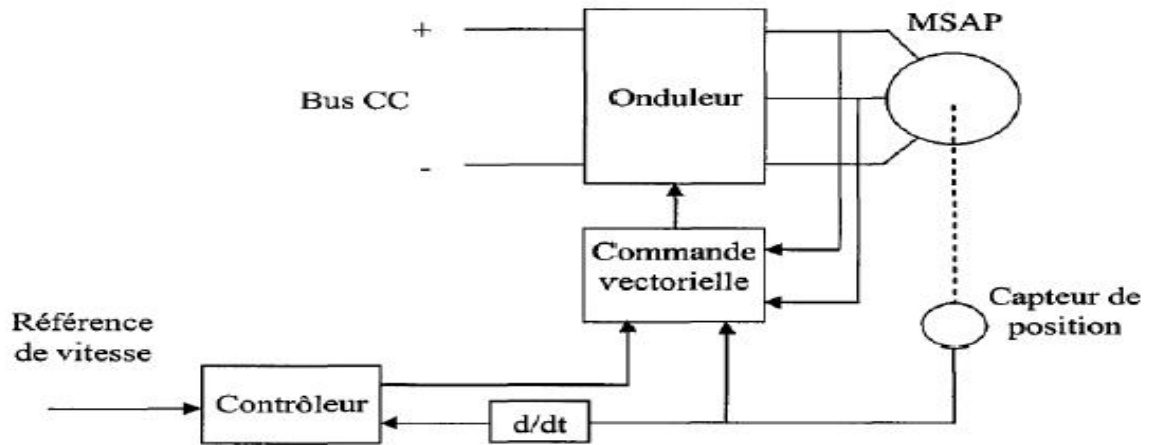


Figure 4.9 : Schéma de principe de l'entraînement électrique du moteur.

L'entraînement électrique de la génératrice

La MSAP utilisée en mode génératrice est entraînée par le moteur thermique et fournit une puissance au moteur électrique.

Le fonctionnement de l'entraînement est donc identique à celui du moteur électrique. Une régulation de vitesse y est également effectuée. Les modèles de l'onduleur, de la commande vectorielle et du contrôleur sont parfaitement similaires à ceux de l'entraînement électrique du moteur. [50]

#### 4.8. Simulations et Résultats

D'après la répartition optimale des couples nous retrouvons les principales fonctionnalités du véhicule hybride : à l'arrêt du véhicule, le moteur thermique est systématiquement éteint. La machine électrique assure le démarrage de celui-ci jusqu'à une certaine vitesse, ou le moteur thermique s'allume pour assurer la traction et en même temps recharger la batterie via la machine électrique qui fonctionne en mode générateur (flux série). A vitesse stabilisée du véhicule (quand celle-ci est inférieure à 50km/h), la traction est en mode électrique pur. Toutes les décélérations du véhicule sont assurées par la machine électrique permettant ainsi la récupération de l'énergie de freinage.

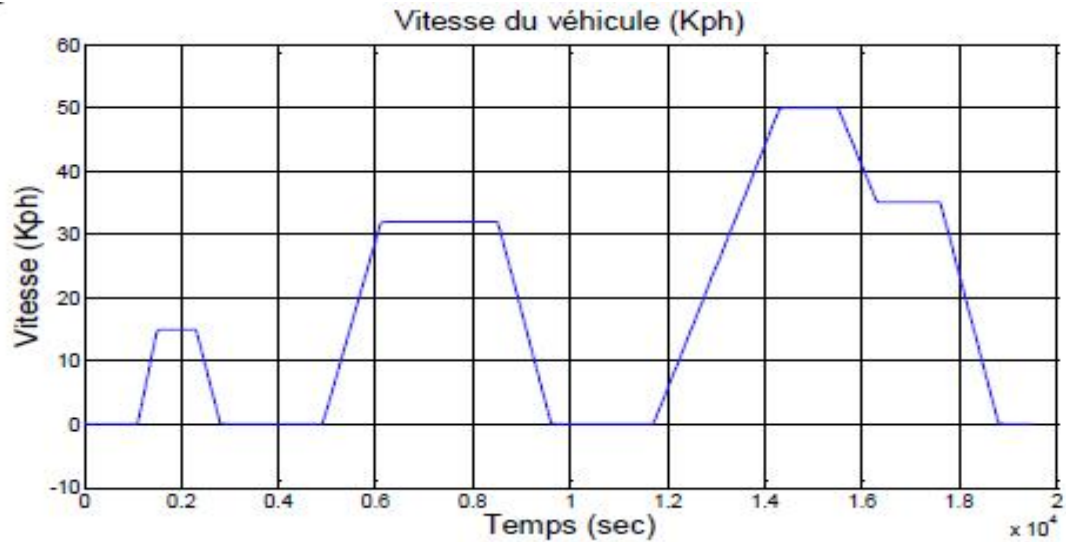


Figure 4.10 : Vitesse du véhicule (Km/h)

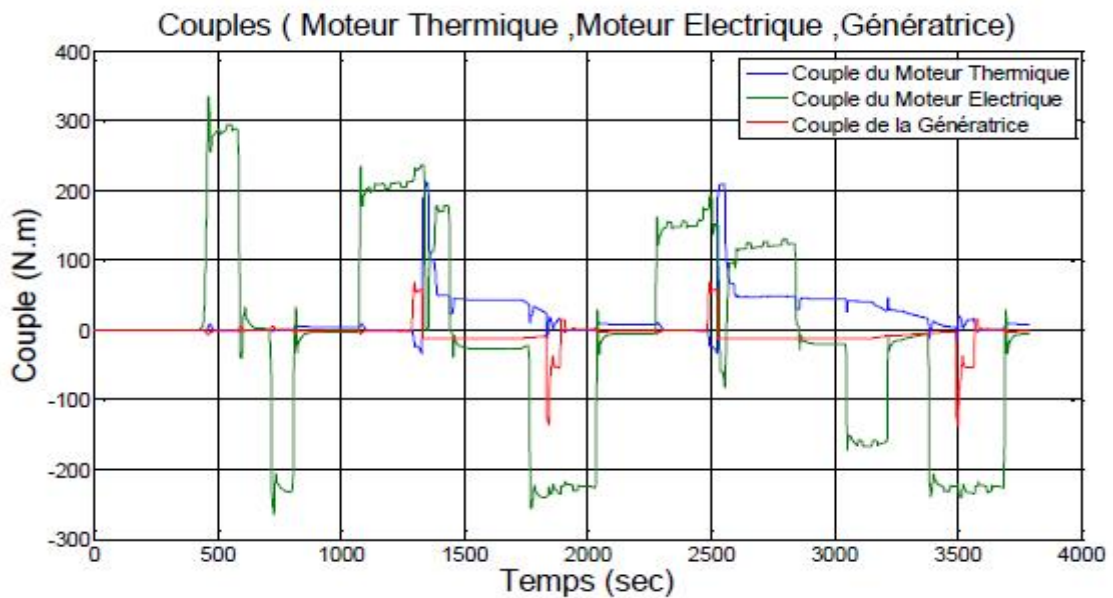


Figure 4.11 : Couples Moteurs Thermique, Electrique et Génératrice

Les états des moteurs du véhicule confirment le résultat de la simulation, le moteur électrique affiche une contribution continue au long du cycle de conduite mais l'état du moteur thermique illustre une sollicitation seulement lors des fortes demandes de puissances tel que les accélérations, et finalement la génératrice s'active quand le moteur thermique est éteint pour alimenter le moteur électrique, elle se désactive instantanément quand le moteur thermique se met en marche puis elle redémarre pour recharger la batterie.

On note que l'ajout de la motorisation électrique diminue de manière significative l'utilisation du moteur thermique et permet même d'avoir un roulement tout électrique.

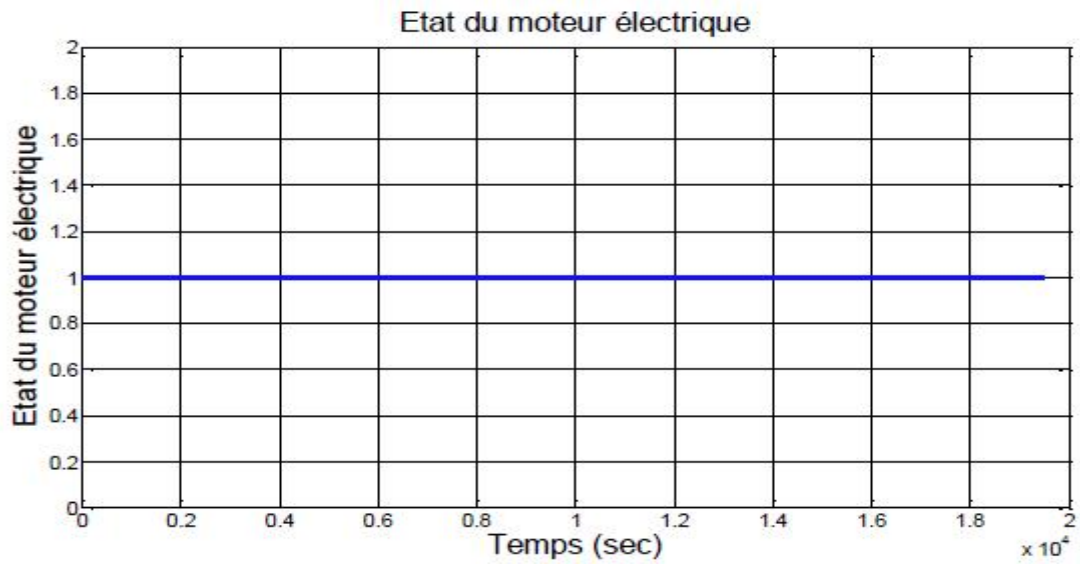


Figure 4.12 : Etat du moteur Électrique

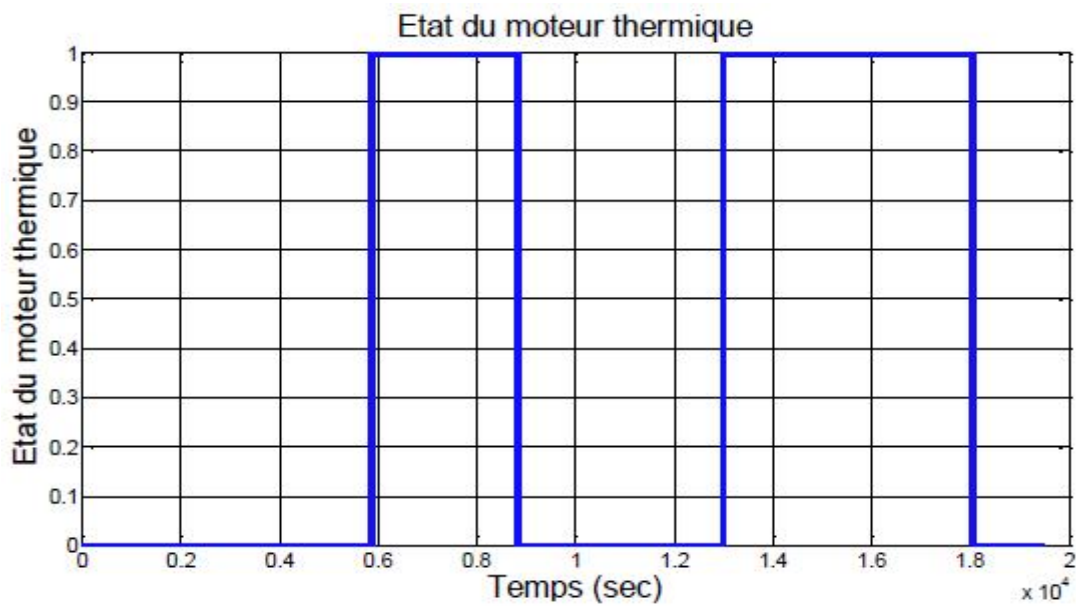


Figure 4.13 : Etat du Moteur Thermique

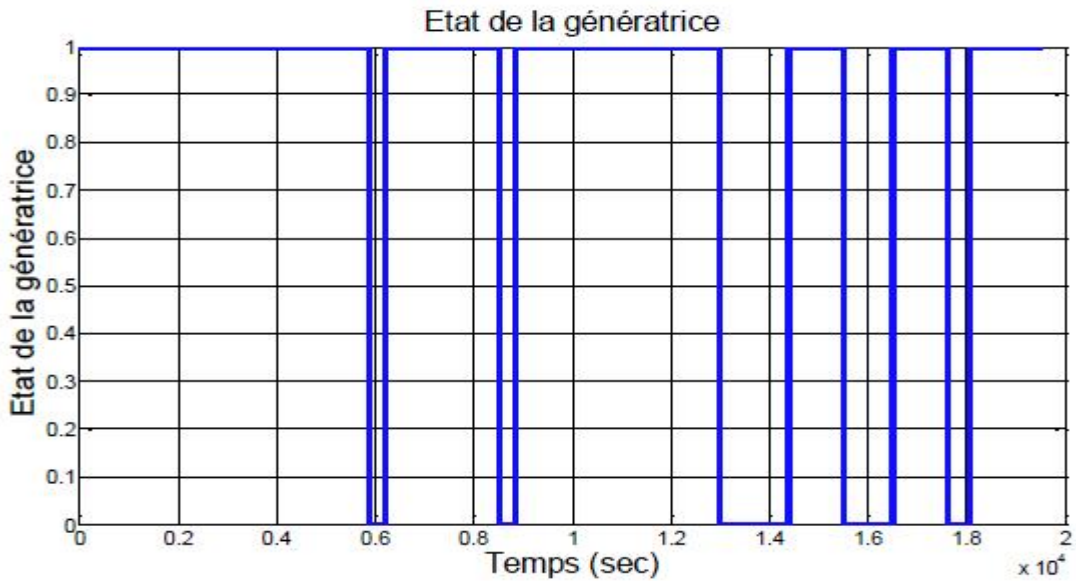


Figure 4.14 : Etat de la Génératrice

L'allure de la consigne de vitesse délivrée par le conducteur via la pédale d'accélération est identique celle illustré par le couple thermique.

A partir de la position de la pédale d'accélérateur et de la vitesse du véhicule, le calculateur détermine la vitesse de rotation optimale du moteur thermique et la consigne d'ouverture du papillon des gaz.

En fin de compte, le mode tout électrique a été simulé, toute la gamme électrique est activée lorsque le moteur est éteint.

L'intention de garder le moteur thermique éteint est largement due à son inefficacité à basse vitesse. Avec un système de stockage d'énergie limitée et la puissance du groupe moteur/générateur le mode tout électrique a été activé à basse vitesse et dans les conditions de faible puissance.

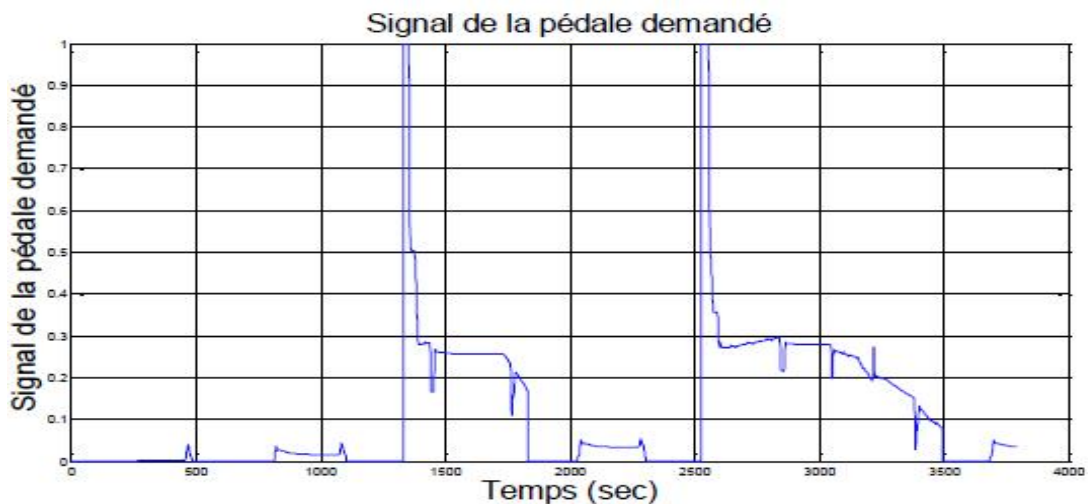


Figure 4.15 : Signal de la pédale d'accélération

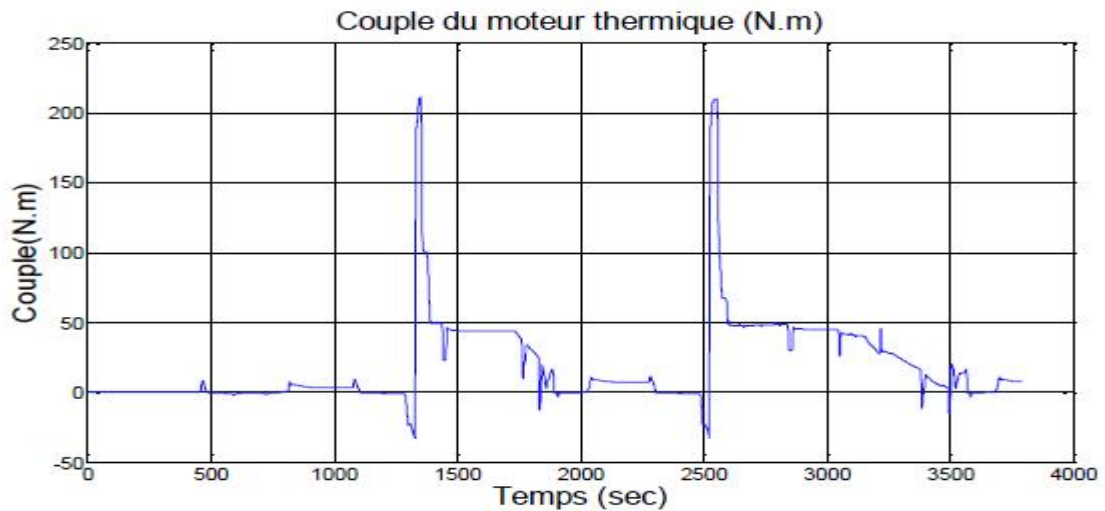


Figure 4.16: Couple du Moteur Thermique

L'état de charge de la batterie (%) est l'historique de la batterie « State Of Charge » SOC lors du cycle de conduite utilisé.

La première SOC était de 100%. La plage de fonctionnement est comprise entre 100% et 95%.

La tendance à la baisse de la courbe reflète la nature de décharge au cours de la période de simulation courte. La fluctuante du SOC a été causé par l'alimentation de la batterie par le freinage récupératif.

En raison de la limite de fonctionnement de la batterie à un faible niveau de charge SOC, le véhicule atteint un point où le moteur thermique doit démarrer.

Par conséquent, le temps du mode tout électrique dans ce cycle de conduite était de 60 secondes (Etat du Moteur Thermique), sauf si la capacité du système de stockage de l'énergie a été augmenté, la durée du mode tous électrique est toujours relative à l'état de charge de la batterie et il n'y a pas de temps déterminé ou de gamme pour cela.

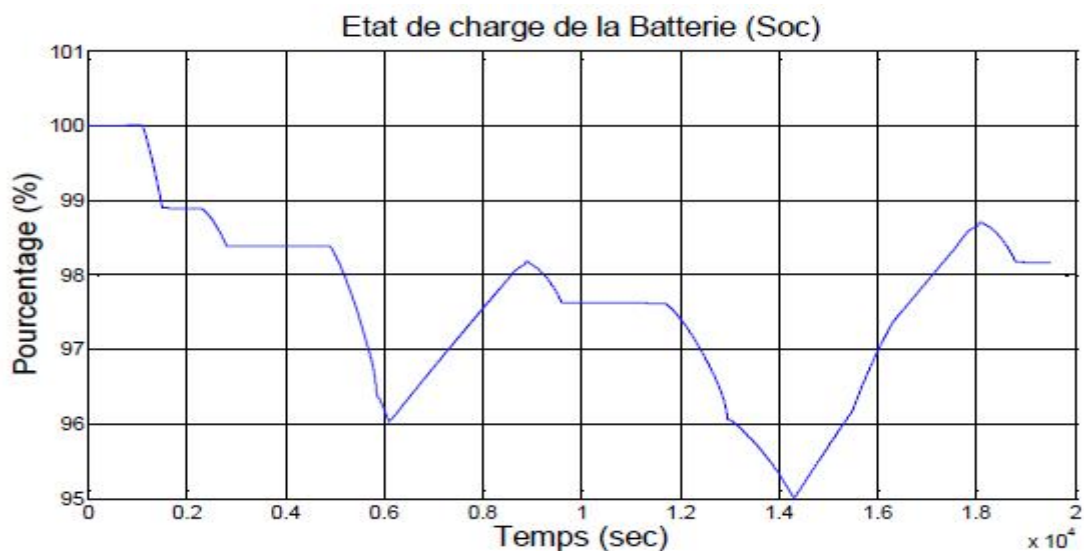


Figure 4.17 : Etat de charge de la batterie



La tension du bus continu des onduleurs éleveit par l'hacheur à 500 V, permettant ainsi, d'avoir un plus faible courant (donc moins de pertes) pour une même puissance demandée. La tension du bus augmente lors des phases d'accélération et de récupération au freinage.

La tension délivrée/reçue par la batterie elle est maintenue autour de 220 V, pour les phases d'accélération, la tension chute au-dessous de 220 V pour alimenter le moteur et pour les phases de décélération, la batterie se recharge en récupèrent l'énergie du freinage.

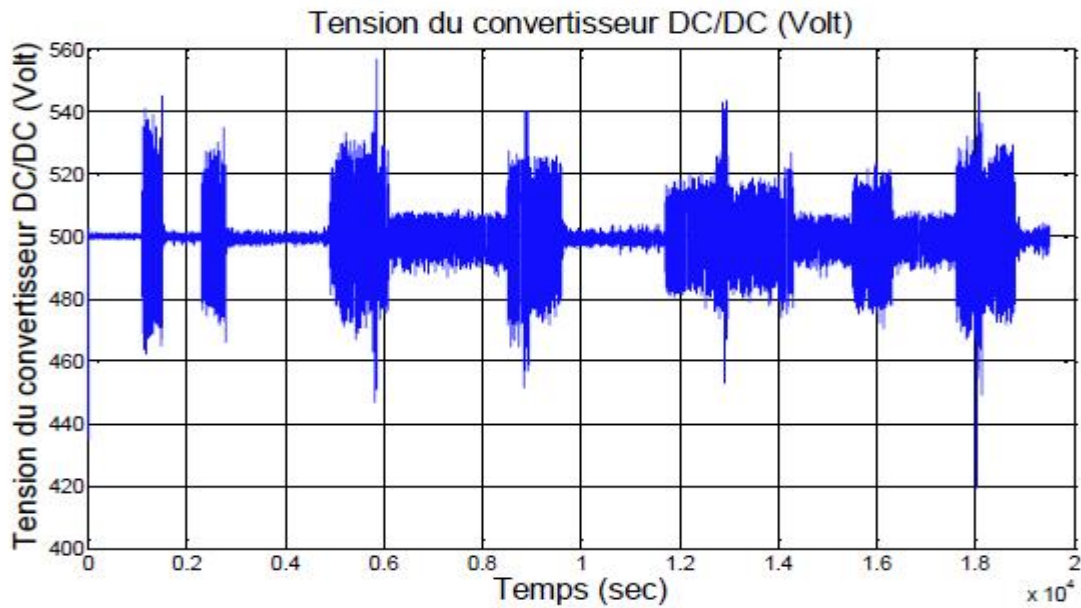


Figure 4.18 : Tension du Bus Continu

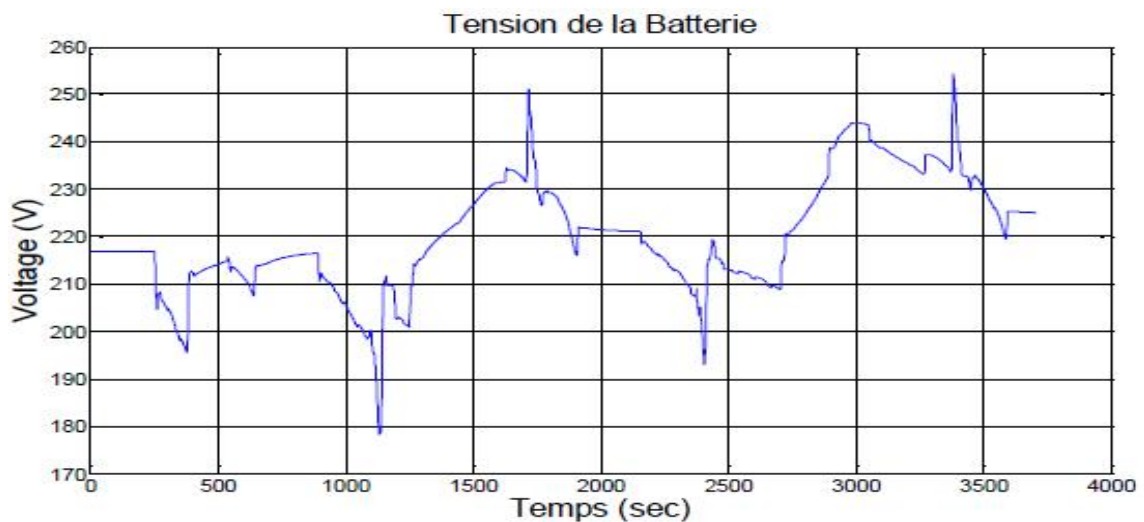
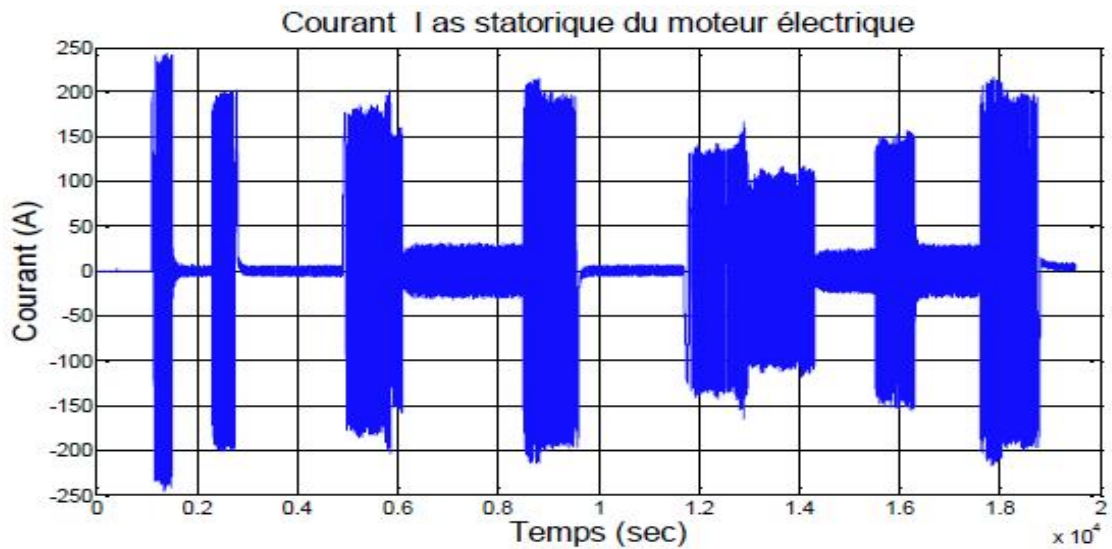
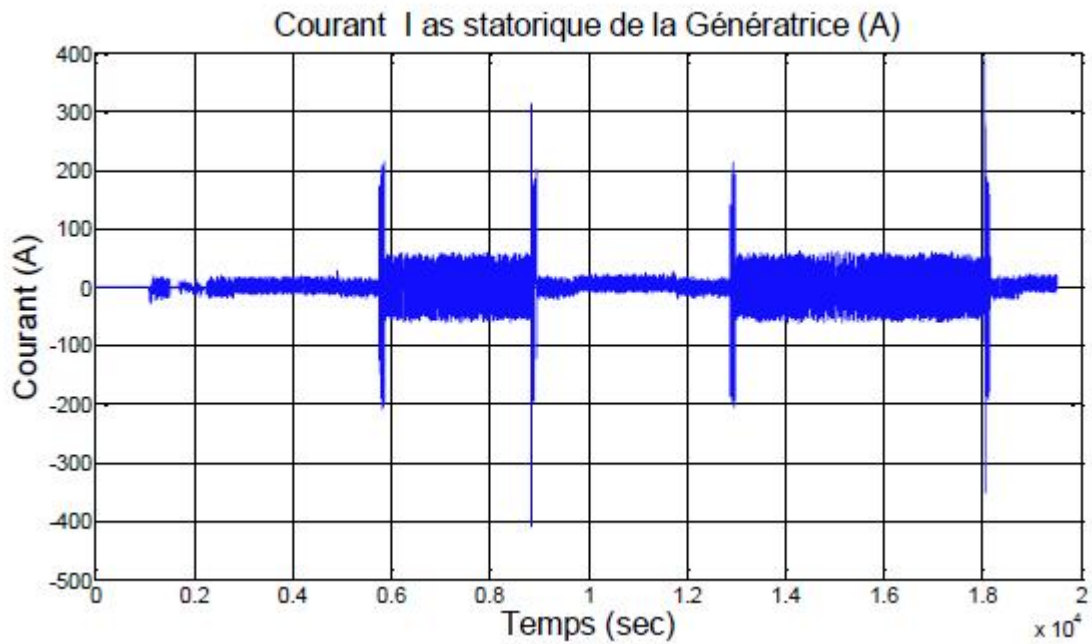


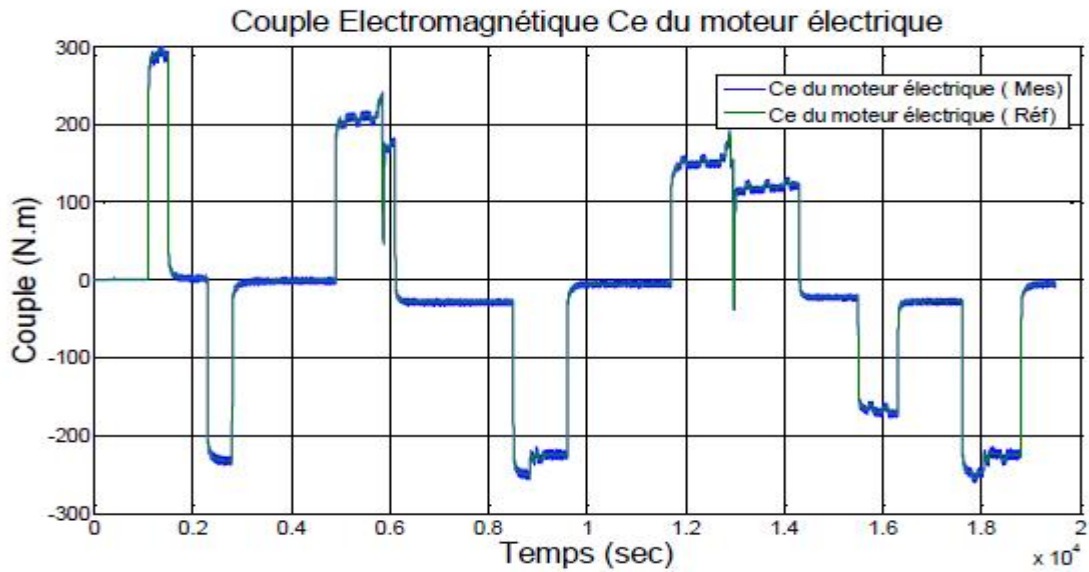
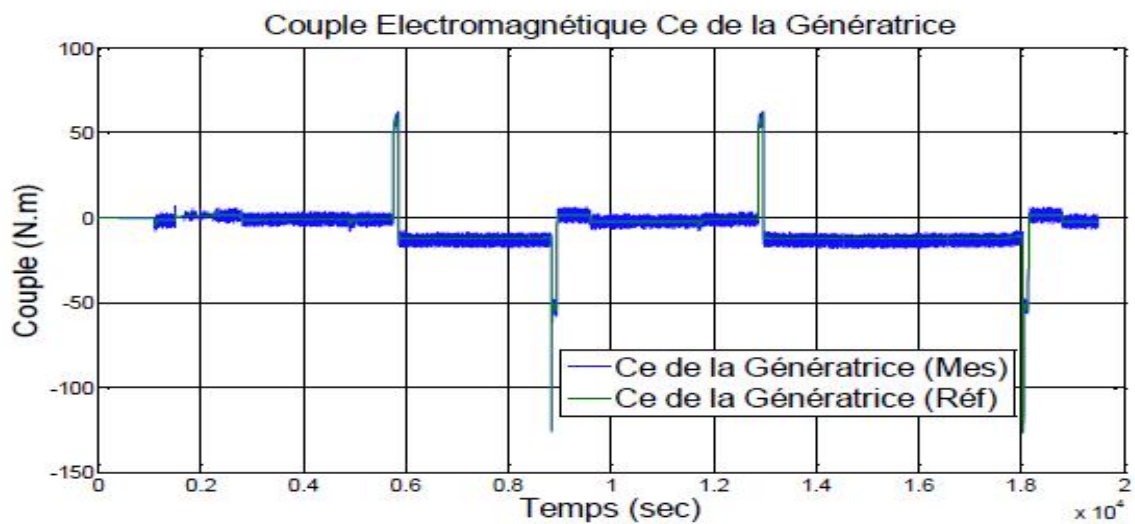
Figure 4.19 : Tension de la Batterie

Dans la figure illustrant l'évolution temporelle d'un courant de phase statorique lors d'une variation de la vitesse. L'amplitude ainsi que la fréquence s'adaptent suite à la variation de la vitesse.

Figure 4.20 : Courant  $I_{as}$  statorique du moteur électriqueFigure 4.21 : Courant  $I_{as}$  statorique de la génératrice

Dans les variations des couples électromagnétiques des moteurs.

Nous soulignons d'abord, un couple moteur élevé pendant le démarrage. Les moteurs maintiennent ces couples électromagnétiques élevés de l'arrêt jusqu'à la stabilisation de leurs vitesses. A ce moment-là, les couples moteurs commencent à diminuer puis ils se stabilisent à leur tour.

Figure 4.22: Couple Electromagnétique  $C_e$  du moteur ElectriqueFigure 4.23 : Couple Electromagnétique  $C_e$  de la génératrice

L'allure de la vitesse (RPM) du moteur électrique est identique à celle du véhicule cela est dû au mode tout électrique qui domine la traction du véhicule.

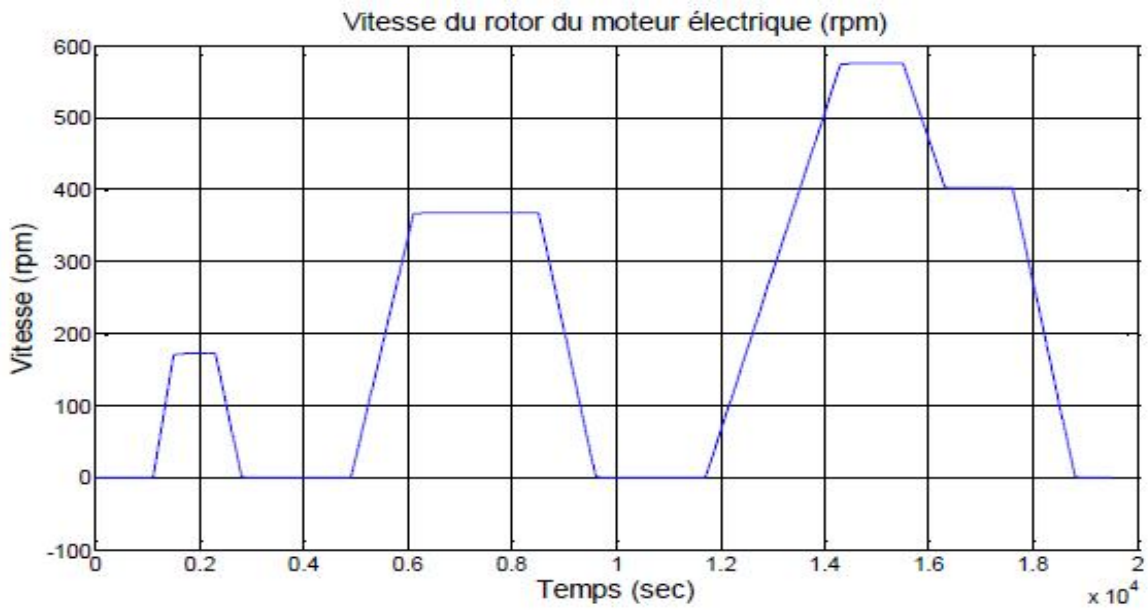


Figure 4.24 : Vitesse du rotor (rpm) du moteur électrique

L'allure de la vitesse (RPM) de la génératrice est identique à celle de la figure qui illustre la vitesse du moteur thermique cela est expliqué par l'architecture mixte du véhicule hybride utilisé, où la génératrice est entraînée par le moteur thermique.

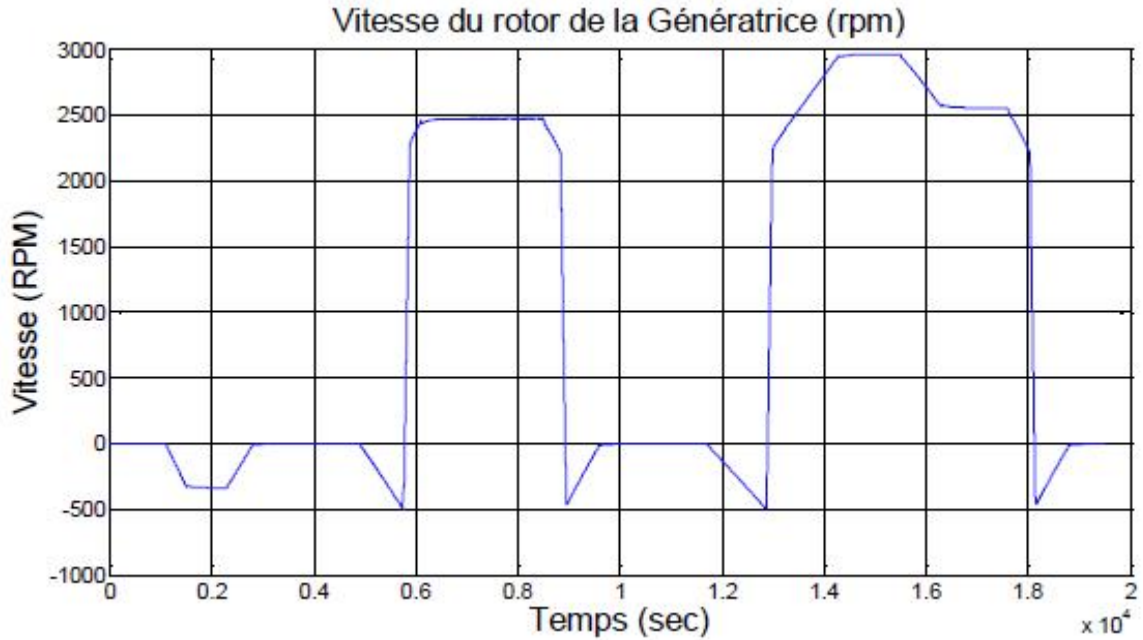


Figure 4.25 : Vitesse du rotor (rpm) de la génératrice

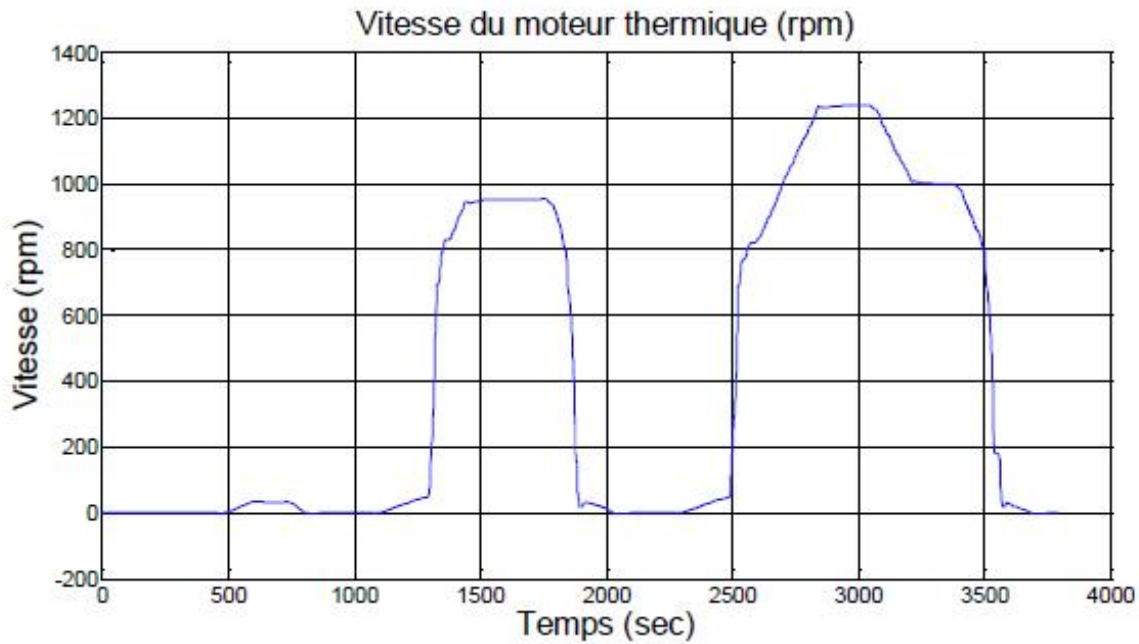


Figure 4.26 : Vitesse du moteur thermique (rpm)

La stratégie de commande choisit la meilleure répartition de puissance entre le moteur électrique la génératrice et la batterie.

Cette stratégie a permis de garder le moteur électrique toujours alimenté sans épuiser la batterie et permettre sa recharge dans les décélérations cela permet principalement d'utiliser le moteur thermique au meilleur de son rendement et de réduire les émissions d'oxydes de carbone et même de les supprimer notamment par un démarrage tout électrique.

#### 4.9. Conclusion

L'intégration de panneaux photovoltaïques dans les véhicules hybrides est de plus en plus possible, en raison de la flotte électrification croissante, à l'augmentation des coûts de carburant, les progrès en termes de technologie de panneau PV, et à la réduction de leur coût. Véhicules hybrides solaires peuvent donc représenter une solution intéressante pour faire face à la fois les économies d'énergie et les questions environnementales. Bien sûr, ces véhicules ne peuvent pas représenter une solution universelle, puisque le meilleur équilibre entre les avantages et les coûts dépendrait de profil de la mission: en particulier, des réductions significatives de la consommation de carburant et les émissions peuvent être obtenus lors de l'utilisation typique dans les conditions urbaines pendant les jours ouvrables. En outre, l'intégration de l'énergie solaire contribuerait également à réduire le temps de recharge de la batterie.

l'architecture employée ainsi que la stratégie de commande permettent d'avoir un partage de puissance très favorable au niveau de la consommation du carburant car au-dessous de 50km/h , le

véhicule est largement capable de rouler en mode tout électrique en gardant le moteur thermique éteint , au-delà de cette vitesse ,la stratégie de commande hybride arrive à propulser le véhicule en utilisant la double motorisation électrique et thermique sous la contrainte du niveau de charge de la batterie , Pour effacer de problème on a eu recours à la récupération de l'énergie du freinage, la génératrice assiste elle aussi pour fournir de l'énergie électrique son rôle consiste à convertir la puissance mécanique fournie par le moteur thermique.

reste à dire que la grande observation faite au long de ce travail est qu'une mauvaise stratégie de gestion énergétique nous conduit vers un véhicule hybride électrique qui pollue plus que son homologue conventionnel, cela nous oblige à doubler les efforts pour concevoir les véhicules capables d'arriver au but zéro émissions.

## **Conclusion générale**

L'intégration de modules photovoltaïques dans les véhicules hybrides est de plus en plus possible, en raison de la flotte électrification croissante, à l'augmentation des coûts de carburant, les progrès en termes de technologie de panneau PV, et à la réduction de leur coût. Véhicules hybrides solaires peuvent donc représenter une solution intéressante pour faire face à la fois les économies d'énergie et les questions environnementales. Bien sûr, ces véhicules ne peuvent pas représenter une solution universelle, puisque le meilleur équilibre entre les avantages et les coûts dépendrait de profil de la mission: en particulier, des réductions significatives de la consommation de carburant et les émissions peuvent être obtenus lors de l'utilisation typique dans les conditions urbaines pendant les jours ouvrables. En outre, l'intégration de l'énergie solaire contribuerait également à réduire le temps de recharge de la batterie.

Mettre un module solaire sur un véhicule hybride existante peut être juste la première étape: afin de maximiser leurs avantages, re-conception et l'optimisation de l'ensemble du système véhicule-groupe motopropulseur qui serait nécessaire. Une attention particulière doit être accordée à maximiser la puissance nette à partir de modules solaires, et à adopter des solutions de pointe pour l'électronique de puissance. En outre, ces véhicules exigeraient des solutions spécifiques pour la gestion et la maîtrise de l'énergie, de Pentecôte capacités plus avancées de pré-analyse.

L'adoption de toits mouvement pour les phases de stationnement et l'utilisation de panneaux solaires sur les fenêtres et les côtés latéraux améliorerait contribution solaire, au-delà du panneau fixe classique sur le toit de la voiture. En outre, ces solutions permettraient de réduire l'écart entre la contribution solaire à basses et hautes latitudes, étendant ainsi le marché potentiel de ces véhicules. Des opportunités intéressantes sont également liés à une éventuelle reconversion des véhicules classiques aux véhicules solaires hybrides légers, au moyen de kits seront distribués après-marché.

Les points de vue sur les questions de coûts de véhicules solaires hybrides sont encourageants. Quoi qu'il en soit, comme il arrive de nombreuses innovations, la faisabilité économique complète ne pouvait pas être immédiate, et un soutien financier des gouvernements serait certainement approprié. Mais le récent et quelque peu inattendu succès commercial de certaines voitures hybrides électriques indique qu'il y a des raisons d'espérer qu'un nombre important d'utilisateurs est déjà prêt à dépenser plus d'argent pour contribuer à sauver la planète de la pollution, les changements climatiques et l'épuisement des ressources.

L'objectif de cette mémoire est de modéliser de commander et de simuler un véhicule électrique hybride solaire. Le modèle conçu a permis l'étude du comportement du véhicule face à l'ajout d'une deuxième source d'énergie. l'architecture employée ainsi que la stratégie de commande permettent d'avoir un partage de puissance très favorable au niveau de la consommation du carburant car au-dessous de 50km/h. le véhicule est largement capable de rouler en mode tout électrique en gardant le moteur thermique éteint , au-delà de cette vitesse ,la stratégie de commande hybride arrive à propulser le véhicule en utilisant la double motorisation électrique et thermique sous la contrainte du niveau de charge de la batterie . Pour éviter ce de problème on a eu recours à la récupération de l'énergie du freinage. la génératrice assiste elle aussi pour fournir de l'énergie électrique son rôle consiste à convertir la puissance mécanique fournie par le moteur thermique.

Les simulations faites sous Simulink/Matlab montrent un véhicule stable qui suit le cycle de conduite imposé. le choix des composants et les avancées technologiques en matière d'électronique. Électronique de puissance et d'automatique ont facilité l'intégration d'une énergie propre aux sein des véhicules traditionnels, Nous avons indiqué dans ce mémoire. l'importance de la gestion d'énergie car la disponibilité au bord du véhicule de deux types d'énergies impose un partage efficace qui servira à rouler sans contraintes , autrement dit que la grande observation faite au long de ce travail est qu'une mauvaise stratégie de gestion énergétique nous conduit vers un véhicule hybride électrique qui pollue plus que son homologue conventionnel , cela nous oblige à doubler les efforts pour concevoir les véhicules capables d'arriver au but zéro émissions .



## Bibliographie

- [1] Livre Blanc Technologique, Le Potentiel de l'Energie Solaire sur le Plateau. Continental Externe des Etats-Unis, Original disponible pour téléchargement à Mai 2006.
- [2] Bent. Sorensen, " Renewable Energy Its physics, engineering, use, environmental impacts, economy and planning aspects", Roskilde University Energy & Environmen Group, Institute 2, Universitetsvej 1, P. O. Box 260 DK-4000 Roskilde, Denmark.
- [3] Chenoufi Hakim, " Optimisation du procede technologique de realisation d'une cellule solaire par la technique de diffusion ", Mémoire de magistère, université de Batna, 2005.
- [4] : R. JIMMY et AL, Le pompage photovoltaïque, Édition Multi mondes, 1999.
- [5] M. G. VILLALVA and J. R. GAZOLI, and E. R. FILHO 'Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays, Jornal of power electronics, May 2009.
- [6] A. BILBAO Réalisation d'un commande mppt numérique, université de rovira i virgili ,2006.
- [7] H. BELGHITRI. Modélisation, simulation et optimisation d'un système hybride éolien-photovoltaïque, mémoire de magister, 2009.
- [8] A. LABOURET et M. VILLOZ préface de jean louis bal ,Energie solaire photovoltaïque, livre 4 édition, 2008.
- [9] B. FLECHE - D. DELAGNES ,Energie solaire photovoltaïque.doc, juin 2007, <http://www.scribd.com>.
- [10] M. BELHAD , Modélisation D'un Système De Captage Photovoltaïque Autonome, mémoire de magister université de bachar ,2008.
- [11] S. ABADA Etude et optimisation d'un générateur photovoltaïque pour la recharge d'une batterie avec un convertisseur sepic, Mémoire Maître ès Sciences , Université Laval, 2011.
- [12] S. PETIBON ' Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques', université de Toulouse, 2009.
- [13] L. ABBASSEN ' Etude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque' Mémoire de magister, université mouloud Mammeri Tizi ouzzo, 2011.
- [14] L. ZAROOUR ' Etude technique d'un système d'énergie hybride photovoltaïque éolien Hors réseau', Thèse Magister université de Constantine, 2007.
- [15] Z. BENDJELLOULI ' Contribution à la modélisation d'une cellule solaire', Mémoire de magister université de bachar, 2009.
- [16] C. C. CHAN, K. T. CHAU, Modern Electric Vehicle Technology, Oxford University

Press Inc., New York, 2001, ISBN: 0-19-850416-0

[17] THIERRY MAHE, Motorisations hybrides: Que Faire?, Industrie et Technologie, mai 2005.

[18] Agence Internationale de l’Energie (IEA), Véhicules Electriques: Technologie, Performances et perspectives, Editions TECHNIP, Paris, France, 1994.

[19] Energie & Développement Durable Magazine, avril 2004.

[20] CLAUDE-ERIC BARBIER 'Modélisation et simulation du système véhicule électrique pour la conception et le contrôle de sa chaîne de traction', Thèse, Institut national polytechnique de Toulouse, 22.10.1994.

[21] MEHRDAD EHSANI, YIMIN GAO, SEBASTIEN E. GAY, ALI EMADI , Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles – Fundamentals, Theory, and Design, CRC Press LLC, 2005, USA.

[22] EHSANI, M., GAO, Y., & MILLER, J. M. (2007). Hybrid electric vehicles: architecture and motor drives. Proceedings of the IEEE, 95(4), 719-728.

[23]. DÖRFFEL, D. (2003). Peace-of-Mind Series Hybrid Electric Vehicle Drivetrain. Transfer thesis, School of Engineering Sciences, University of Southampton, Southampton, UK.

[24].SCHOTT, P., POIROT, J. P., & BAURENS, P. (2001, August). Modelisation et simulation de la source d'energie a pile à combustible du vehicule hydro-gen. In Annales de Chimie Science des Matériaux longer published by Elsevier. l’Ecole des Mines de Paris.

[25] FANG, X., KUTKUT, N., SHEN, J., & BATARSEH, I. (2011). Analysis of generalized parallel-series ultracapacitor shift circuits for energy storage systems. Renewable Energy, 36(10), 2599-2604.

[26] J. HSU, Report on toyota prius motor thermal management, tech. report, ORNL, 2005.

[27] A.L. Allègre, A. Bouscayrol , R. Trigui, Influence of control strategies on battery/supercapacitor hybrid energy storage systems for traction applications, Proceedings of Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC) – Detroit, 2009.

[28] EHSANI, Y. GAO, S. GAY, and A. EMADI “Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles: Fundamentals, theory, and design,– 2005.

[29] W. LHOMME “Gestion d’énergie de véhicules électriques hybrides basée sur la représentation énergétique macroscopique” Thèse de l’ Université des Sciences et Technologies de Lille – Le 16 Novembre 2007 .

[30] MAI Minh “Conception optimale d’une motorisation électrique pour application à un véhicule hybride léger” Thèse de l’ Université de Franche-comté de Belfort – Le 12 Octobre 2011 .

[31] World Solar Challenge. World Solar Challenge technical regulations for the 2011 event.technical-regulations.pdf, 2010a.

[32] The artemis european driving cycles for measuring car pollutant emissions, Science of the total Environment, 334 (2004).

[33] RICHARD T.M. Smokers, ARJAN J.J. DIJKHUIZEN and ROB G. WINKEL, Annex VII - Overview Report 2000 - Worldwide Developments and Activities in the Field of Hybrid Road-vehicle Technology, Agence Internationale de l’Energie (IEA), Hybrid & Electric Vehicle, 2000.

[34] C. C. CHAN, K. T. CHAU, Modern Electric Vehicle Technology, Oxford University Press Inc., New York, 2001, ISBN: 0-19-850416-0.

[35] ESA PORTAL « Le réchauffement de la planète : mythe ou réalité ? », 07 décembre 2001.

[36] S. DasGupta, J. K. Jacobs, B. Fleet, R. Bhola, G. Milicic, A. Amarei, H. Hutt, M. Boda, G. DasGupta, A Long Range, Ultra-Safe, Low Cost Electric Vehicle, EVS21, Monaco, 2-6 April 2005.

[37] ROBERT L. GRAHAM, Plug-In Hybrid Electric Vehicles, a Market Transformation Challenge: The DaimlerChrysler/EPRI Sprinter Van PHEV Program, EVS21, Monaco, 2-6 April 2005.

[38] IQBAL HUSAIN, Electric and Hybrid Vehicles: design fundamentals, CRC Press LLC, 2003, ISBN: 0-8493-1466-6.

[39] FABRICE HERREBOUDT, Direction de la recherche, Renault, Pollution automobile, AGM-ITA, Revue Techniques avancées, Numéro 48, Juin 1999.

[40] B.MULTON, L.HIRSINGER, Problème de motorisation d’un véhicule électrique, Première partie, Revue 3E.I n°4, Décembre 1995, pp.53-64 ; Deuxième partie, Revue 3E.I n°5, Mars 1996.

[41] NADIA MUSTAFA, Taxi! Now urban commuters can have it all: style, service and sustainability, Time Style&Design, Green Living – Is Sustainability the New Luxury?, Summer 2006 Supplement to Time.

Wikipedia, Hybrid vehicle, on-line: [http://en.wikipedia.org/wiki/Hybrid\\_vehicle](http://en.wikipedia.org/wiki/Hybrid_vehicle).

- [42] Lhomme Walter Novembre 2007 Thèse de Doctorat : Gestion D'énergie De Véhicules Electriques Hybrides Basée Sur La Représentation Energétique Macroscopique.
- [43] ALI EMADI, YIMIN GAO AND MEHRDAD EHSANI 2010 .Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles Second Edition .
- [44] BAILLY, Guillaume 2006. Simulation multi-domaines d'un système de propulsion hybride électrique sous l'environnement Matlab / Simulink. Mémoire de maîtrise électronique, École de technologie supérieure.
- [45] OLIVER.,T 2009 OLIVIER TREMBLAY LOUIS-A.Dessaint Experimental Validation of a Battery Dynamic Model for EV Application Electrical Engineering Dep, Ecole de Technologie Superieure Canada.2009 .
- [46] SASAKI K., YOKOTA M., NAGAYOSHI H., KAMISAKO K. (1997), Evaluation of an Electric Motor and Gasoline Engine Hybrid Car Using Solar Cells, Solar Energy Material and Solar Cells (47), 1997.
- [47] SEAL M.R. (1995), Viking 23 - zero emissions in the city, range and performance on the freeway. Northcon - Conference Record 1995. IEEE, RC-108.p 264-268.
- [48] SEAL M.R., CAMPBELL G. (1995), Ground-up hybrid vehicle program at the vehicle research institute. Electric and Hybrid Vehicles - Implementation of Technology SAE Special Publications n 1105 1995.SAE, Warrendale, PA, USA.p 59-65.
- [49] S.LETENDRE, R.PEREZ, CHRISTY HERIG, Vehicle Integrated PV: a Clean and Secure Fuel for Hybrid Electric Vehicles, Proc. of Annual Meeting of the American Solar Energy Society, June 21-26, 2003, Austin, TX.
- [50] ARSIE I., DI DOMENICO A., MAROTTA M., PIANESE C., RIZZO G., SORRENTINO M. (2005); A Parametric Study of the Design Variables for a Hybrid Electric Car with Solar Cells, Proc. of METIME Conference, June 2-3, 2005, University of Galati.